

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
LABORATOIRE DE HAUTE TENSION

Mémoire du projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

THEME :

**Caractérisation de l'état de surface d'un
isolateur pollué à l'aide des signaux du
courant de fuite et de la tension
appliquée.**

Proposé par :

Pr.A.MEKHALDI

Etudié par :

Mohammed Adnane DOUAR

Mohamed Chérif BOUZIDI

Promotion JUIN 2009

ENSP 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, ALGER

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr. A. Mekhaldi pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension ainsi que ses précieux conseils dans le domaine de la recherche scientifique.

Nous remercions Mr. A. Boubakeur pour l'intérêt qu'il a porté à notre modeste travail.

Nos remerciements vont également à Mr. M. Tegar pour son aide et ses qualités humaines.

Un grand merci pour l'intérêt qu'a porté Mr. R. Tahmi à notre travail, à sa précieuse aide et à ses qualités humaines qui nous ont permis de rattraper le temps perdu.

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

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

Dédicace

A mes très chers parents, dont le sacrifice, l'amour, la patience, le soutien, l'encouragement et les prières sont l'essence de ma réussite.

Merci d'être si fiers de moi.

A la mémoire de mes grands-parents

A mes chers frères et sœurs : Loulou, Bahi, Khaled, Manou, Djida et Zahroua.

A toute ma famille

A mes COPCHs Nizar "Haroune" et Issam

A toute Jma3a tchawe3na " tche3 tchayatch".

A toute la promo ENSP 2009

A tous ceux qui ont su croire en moi

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce modeste travail aya wiw !!!

Chérif

Dédicace

A mes très chers parents

A toute ma famille

A toute la promo ENSP 2009

A mes amis

Adnane

Liste des symboles

a	: Amplitude maximale du signal X(n)
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale
CWT	: Continuous Wavelet Transform
D	: Diamètre de la particule de quartz
D'	: Diamètre de la particule de corindon
db	: Daubechies
E	: Energie du signal
f_0	: Fréquence du signal X(n)
DOF	: Degree Of Fulfilment
DP	: Décharges partielles
DSP	: Densité spectrale de puissance
DWT	: Discrete Wavelet Transform
ESDD	: Equivalent salt deposit density
FFT	: Fast Fourier Transform
H	: fonction de Heaviside
HF	: High Frequency
HFCT	: High Frequency Current Transform
I_f	: Courant de fuite de l'isolateur en porcelain 20 kV _{eff}
KTM	: Kaiselghur Test Method
L_c	: Distance de contournement sous pollution
LF	: Low Frequency
M	: Nombre d'éléments du vecteur X
m	: Dimension de l'espace R
MWL	: Molar Weight Loss
Monitoring	: Surveillance
N	: Longueur du spectre pour le signal considéré
NaCl	: Chlorure de Sodium
ND	: Rapport entre le nombre de décharges positive et négatives
NSDD	: Non Soluble Deposit Density
p_s	: Overhang shed
PVC	: Poly-vinyle-chloride
QMF	: Quadrature Mirror Filter
RH	: Relative Humidity
RMSE	: Root Mean Squared Error
RP	: Reccurrent plot
s	: Spacing shed
SA	: Spectral Analysis
S_{dB}	: Energie du signal en décibel
SEM	: Scanning Electron Microscopy
SGWT	: Second Generation Wavelet Transform
SIR	: Silicon Rubber
STD-MRA	: Standard deviation - Multi Resolution Analysis

SSE	: Sum of Squared Error
SLM	: Solid Layer Method
S_t	: Distance de contournement dans l'air
T	: Période d'échantillonnage du signal
TFTC	: Transformée de Fourier à temps continu
TFTD	: Transformée de Fourier à temps discret
THD	: Total Harmonic Distorsion
TNS	: Traitement numérique du signal
trunc	: Fonction qui donne la partie entière d'un nombre réel
W_{eff}	: Largeur effective de l'isolateur
W_r	: Largeur réelle de l'isolateur
WT	: Wavelet Transform
$w(n)$: Fonction de fenêtrage
$X_a(nT)$: Signal à la sortie du filtre anti-repliement
$X_e(n)$: Signal échantillonné pour n
$X(f)$: Transformée de Fourier du signal $x(t)$
$ x(t) $: Module du signal $x(t)$.
XRD	: X-Ray-Diffraction
α_1	: Angle de courbure
α_u	: Inclinaison de l'ailette par rapport à l'horizontale
β	: Facteur de forme de la distribution de Weibull
σ	: Conductivité volumique
ε	: Valeur seuil
$\Delta\Phi$: Gamme de déphasage
Φ_{mean}	: Phase moyenne

Sommaire

Introduction générale.....1

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

I-1-Introduction.....	4
I-2-Décharges électriques sous pollution d'un isolateur composite à ± 800 kV (UHVDC).....	4
I-3-Comparaison des performances sous pollution d'un isolateur à long fût et d'un isolateur à disque utilisés en HVDC.....	6
I-4-Influence de la forme de l'isolateur sur les décharges superficielles et la tension de contournement sous pollution.....	8
I-5-Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère pollués artificiellement.....	9
I-6-Analyse du courant de fuite sur un isolateur en porcelaine 20 kV contaminé avec de la poussière de ciment et de la vapeur saline.....	11
I-7-Etude du phénomène d'érosion d'un isolateur SIR exposé aux décharges partielles.....	14
I-8-Characterisation du procédé d'érosion par les méthodes d'analyses temps-fréquences.....	16
I-9-Utilisation de la SGWT pour le filtrage des signaux de décharges partielles	18
I-10-Analyse du courant de fuite sur des isolateurs pollués par la technique RP	20
I-11-Analyse micro-structurale d'isolateurs sains et d'isolateurs en porcelaine soumis à un vieillissement dû au champ électrique.....	21
I-12-Etude de la pollution des isolateurs en céramique par la détection des décharges partielles.....	24
I-13-Calcul de l'impédance de défaut due aux décharges électriques par la modélisation et l'expérimentation.....	26

Chapitre II : Théories du traitement du signal.

II-1-Généralités sur le traitement du signal.....	29
II-2-Catégories de signaux.....	30
II-2-1-Signaux déterministes.....	30
II-2-2-Signaux aléatoires.....	31
II-3-Transformée de Fourier	32
II-3-1-Propriétés de la transformée de Fourier d'un signal continu.....	32
II-3-2-Propriétés de la transformée de Fourier d'un signal à temps discret :	
II-3-2-1-Définition.....	33
II-3-2-2-Propriétés.....	34
II-3-2-3-Cas particulier.....	35
II-3-3-Théorème d'échantillonnage.....	35
II-3-4-Estimation de spectre.....	37
II-3-4-1-Périodogramme.....	37
II-3-4-2-Périodogramme moyenné.....	37
II-3-4-5-Periodogramme de Welch.....	38
II-3-5-Utilisation des fenêtres.....	39
II-3-6-Conclusion.....	39
II-4-Transformée en ondelette.....	41
II-4-1-Historique.....	41
II-4-2-Intérêt du traitement par les ondelettes.....	41
II-4-3-Transformée en ondelette continue (CWT).....	43
II-4-3-1-Définitions.....	43
II-4-3-1-1-Concepts mathématiques pour les ondelettes.....	43
II-4-3-1-2-Ondelette de Morlet.....	45
II-4-3-2-Scalogramme.....	47

II-4-3-3-Calcul des coefficients de la CWT.....	47
II-4-4-Transformée en ondelette discrète (DWT)	50
II-4-4-1- Introduction.....	50
II-4-4-2- Expression mathématique.....	50
II-4-4-3- Algorithme de décomposition pyramidale.....	50
II-4-4-4-Décomposition en bandes de fréquences.....	52
II-4-4-5-Niveau maximal de décomposition.....	53
II-4-4-6-Choix de l'ondelette analysante.....	54
II-4-5-Conclusion.....	56

Chapitre III : Techniques expérimentales.

III-1-Introduction.....	57
III-2-Dispositif expérimental.....	57
III-3-Préparation et caractéristiques de l'objet d'essai :	
III-3-1-Description du modèle étudié.....	58
III-3-2-Objet d'essai.....	59
III-4-Préparation des solutions polluantes.....	60
III-5-Méthode de pulvérisation.....	61
III-5-1-Pollution uniforme.....	61
III-5-2-Pollution non uniforme.....	61
III-5-2-1-Pollution du côté HT et terre.....	61
III-5-2-2-Pollution de la couche centrale.....	61
III-6-Mesure du courant de fuite.....	63
III-7-Mesure de la longueur et du nombre des décharges parallèles.....	64
III-8-Mesure du déphasage courant-tension.....	64
III-9-Conclusion.....	65

Chapitre IV : Etude du comportement du modèle plan.

IV-1-Introduction.....	66
IV-2-Etude de la tension de contournement.....	67
IV-2-1-Identification du système d'électrodes formé par le modèle plan...	67
IV-2-2-Tension de contournement pour le cas uniforme.....	68
IV-2-3-Tension de contournement pour le cas non-uniforme.....	69
IV-2-3-1-Pollution côté HT et terre.....	69
IV-2-3-2-Pollution de la couche centrale.....	70
IV-2-3-3-Discussion.....	71
IV-3-Etude du courant de fuite.....	72
IV-3-1-Cas sec.....	73
IV-3-2-Pollution uniforme.....	73
IV-3-3-Pollution non-uniforme.....	74
IV-3-3-1-Couche polluée du côté HT.....	74
IV-3-3-2-Couche polluée du côté terre.....	76
IV-3-3-3-Couche centrale polluée.....	77
IV-3-4-Discussion.....	78
IV-4-Analyse du déphasage courant de fuite-tension appliquée.....	79
IV-4-1-Cas sec.....	79
IV-4-2-Pollution uniforme.....	80
IV-4-3-Pollution non-uniforme.....	81
IV-4-3-1-Couche polluée du côté HT.....	81
IV-4-3-2-Couche polluée du côté terre.....	82
IV-4-3-3-Couche centrale polluée.....	83
IV-4-4-Discussion.....	84
IV-5-Etude des décharges parallèles.....	84

IV-5-1-Etude de la longueur critique.....	85
IV-6-Conclusion.....	88

Chapitre V : Energie des harmoniques du courant de fuite et de la tension.

V-1-Introduction	89
V-2-Analyse de la tension appliquée.....	89
V-4-1-4-Tension appliquée 21 kV _{eff}	90
V-4-1-5-Tension appliquée 27 kV _{eff}	91
V-4-3-4-Tension appliquée 21 kV _{eff}	93
V-4-3-5-Tension appliquée 40 kV _{eff}	93
V-4-3-6-Etude de la couche 25 cm pour une tension de 36 kV _{eff}	94
V-5-Conclusion	96

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

VI-1-Introduction	98
VI-2-4-Conductivité 1,2 mS/cm	99
VI-2-5-Conductivité 10,1 mS/cm.....	100
VI-3-Conclusion sur l'analyse par la CWT	101
VI-4-Pollution non-uniforme	102
VI-4-1-Pollution côté HT.....	103
VI-4-2-Pollution du côté terre.....	106
VI-4-3-Pollution de la couche centrale.....	110
VI-5-Conclusion sur l'analyse par la DWT.....	113

Chapitre VII : Modélisation du comportement du modèle plan.

VII-1-Introduction	114
VII-2-Paramètres d'évaluation utilisés	114
VII-2-1-Analyse des résidus (erreur d'approximation).....	114
VII-2-2-Somme des carrés des erreurs (SSE).....	114
VII-2-3-Coefficient de détermination R^2	115
VII-2-4-Coefficient R^2 ajusté.....	115
VII-2-5-Erreur standard (RMSE).....	115
VII-3-Modélisation de la tension de contournement.....	116
VII-3-1-Conductivité uniforme.....	116
VII-3-2-Conductivité non uniforme.....	117
VII-3-2-1- Pollution du côté HT	117
VII-3-2-2-Pollution du côté terre.....	118
VII-3-2-3-Pollution de la couche centrale.....	119
VII-4-Modélisation du courant de fuite.....	120
VII-4-1-Conductivité non-uniforme.....	121
VII-4-1-1-Pollution du côté HT.....	122
VII-4-1-2-Pollution du côté terre.....	123
VII-4-1-3-Pollution de la couche centrale.....	124
VII-4-2-Conductivité uniforme.....	124
VII-4-2-1-Conductivité 0.01mS/cm.....	125
VII-4-2-2-Conductivités 0.19, 0.71 et 1.2 mS/cm.....	126
VII-4-2-3-Conductivité 10.1 mS/cm.....	127
VII-5-Modélisation du déphasage courant de fuite-tension appliquée.....	128
VII-5-1-Pollution uniforme.....	129

VII-5-2-Pollution non-uniforme.....	136
VII-5-2-1-Pollution du côté HT	136
VII-5-2-2-Pollution du côté terre.....	137
VII-5-2-3-Pollution de la couche centrale.....	140
VII-6-Modélisation de la longueur et du nombre des décharges parallèles.....	142
VII-6-1-Modélisation de la longueur des décharges parallèles.....	142
VII-6-1-1-Conductivité 0.01 mS/cm.....	143
VII-6-1-2-Conductivité 0.19 mS/cm.....	144
VII-6-1-3-Conductivité 0.71 mS/cm.....	145
VII-6-1-4-Conductivité 1.2 mS/cm.....	146
VII-6-1-5-Conductivité 10.1 mS/cm.....	147
VII-6-2-Modélisation du nombre de décharges parallèles.....	148
VII-6-2-1-Conductivité 0.01 mS/cm.....	149
VII-6-2-2-Conductivité 0.19 mS/cm.....	150
VII-6-2-3-Conductivité 0.71 mS/cm.....	151
VII-6-2-4-Conductivité 1.2 mS/cm.....	152
VII-6-2-5-Conductivité 10.1 mS/cm.....	153
VII-6-3- Modélisation de la longueur critique des décharges parallèles.....	154
VII-7-Conclusion sur la modélisation.....	155
Conclusion générale.....	156
Références bibliographiques.....	159

*Introduction
générale*

De nos jours, la réalisation et la conception d'isolateurs ayant d'excellentes performances dans des conditions de pollution extrêmes est devenue un des facteurs déterminants pour assurer un bon fonctionnement des lignes de transmission d'énergie électrique [1]. Le contournement des isolateurs est l'un des grands problèmes actuels auquel les ingénieurs s'efforcent de trouver des solutions.

Le contournement des isolateurs sous haute tension et en présence d'impuretés conductrices est lié à l'apparition des décharges électriques qui progressent à leurs surfaces conductrices jusqu'au court-circuit. Il peut être caractérisé par deux phases successives [2]:

- Initiation d'une décharge électrique instable à un certain seuil de tension à cause d'un assèchement local de la surface conductrice.
- Progression de la décharge électrique avec l'augmentation du courant de fuite sous des conditions de pollution favorables, pour former un arc de contournement stable qui modifie partiellement la conductivité du milieu.

Ce phénomène reste à ce jour complexe [3] malgré de nombreuses recherches effectuées [4] pour comprendre le développement de la décharge électrique qui mène au contournement de l'isolateur en présence de couches fortement conductrices. La complexité de ce phénomène impose aux chercheurs d'effectuer plus d'expériences en laboratoires et in situ, sous des conditions de pollution artificielles ou naturelles afin d'en comprendre le mécanisme. Toutefois, les méthodes d'essais sur site sont les plus intéressantes mais nécessitent plusieurs années pour permettre une étude convenable du comportement de l'isolateur [5].

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

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

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

Le deuxième chapitre présente de manière succincte l'environnement du traitement du signal par la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes. Nous insistons sur le concept d'énergie qui va nous permettre d'évaluer son importance dans le courant de fuite pendant la décharge électrique. Cela pourrait être une explication du phénomène d'évaporation de la solution conductrice pendant la décharge. Par la suite, nous introduisons la théorie des ondelettes discrètes et continues dans lesquelles nous décrivons les principales idées se rapportant à l'analyse multi-résolution ainsi qu'à la représentation temps-échelle, qui peuvent faire l'objet d'une surveillance de l'état de surface des isolateurs.

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

Le quatrième chapitre est entièrement consacré à l'étude du comportement du modèle plan lorsque la pollution est uniforme avec plusieurs conductivités, et lorsque la pollution est non uniforme pour trois cas de figures. Nous présentons les résultats concernant la tension de contournement, le courant de fuite, le déphasage courant de fuite-tension appliquée et l'évolution de la longueur et du nombre de décharges parallèles à la surface du modèle plan.

Le cinquième chapitre présente les résultats du traitement du courant de fuite et de la tension appliquée pour déterminer un critère de diagnostic d'apparition des décharges électriques en mesurant l'énergie présente dans les deux signaux par l'analyse spectrale.

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

Le septième et dernier chapitre est entièrement consacré à la modélisation du comportement de l'isolateur pour caractériser de manière empirique la variation des grandeurs principales (tension de contournement, courant de fuite, déphasage, longueur et nombre des décharges parallèles) et faciliter l'étude des phénomènes liés à la pollution des isolateurs.

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

Chapitre I :

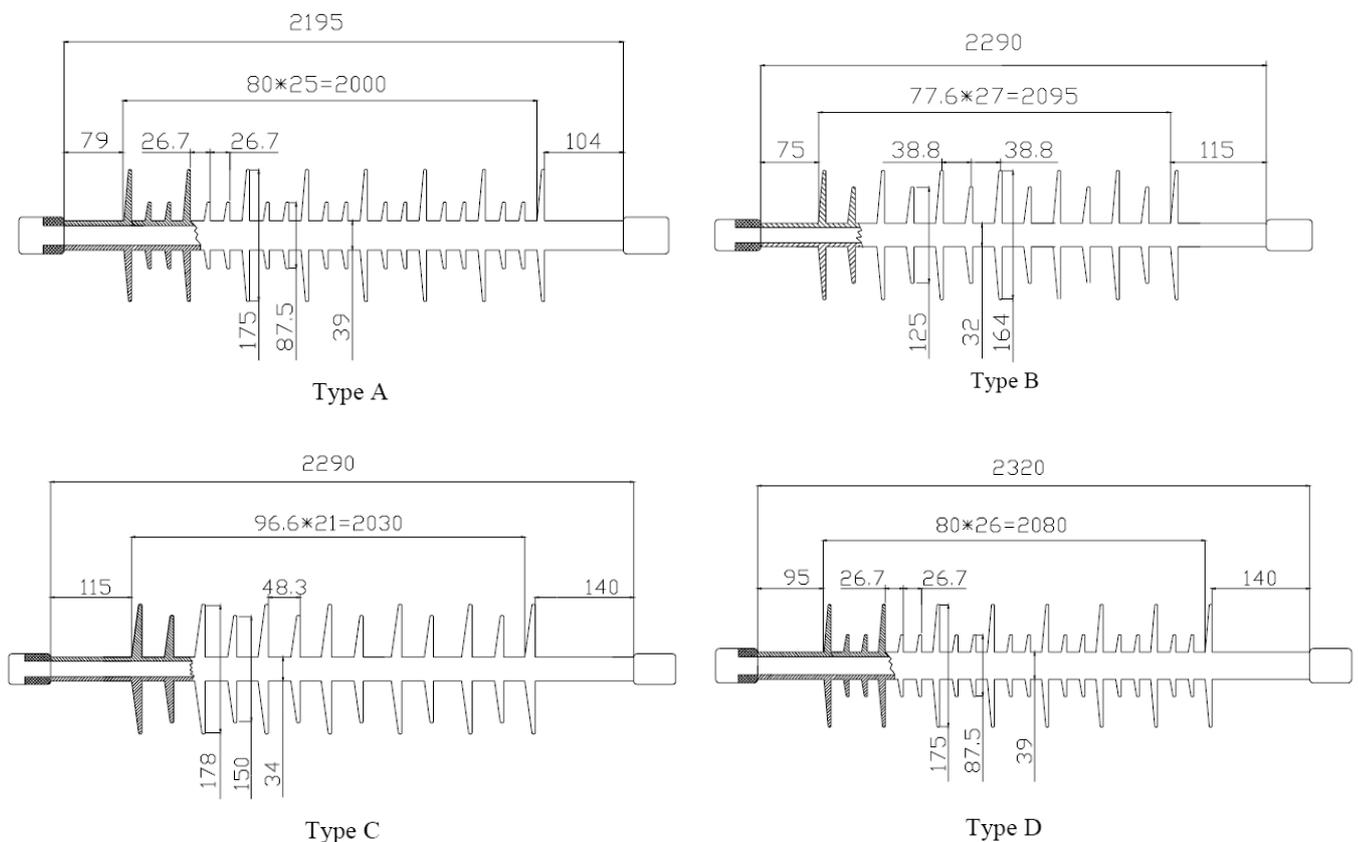
*Travaux antérieurs sur l'étude de
la pollution des isolateurs.*

I-1-Introduction :

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

I-2-Décharges électriques sous pollution d'un isolateur composite à ± 800 kV (UHVDC):

Les recherches réalisées par X.Jiang et al [6] en tension continue (polarité négative et positive) se sont intéressés à la pollution artificielle de quatre types d'isolateurs FXBW 500/160 DC SIR (Silicon Rubber) nommée A, B, C et D et d'un isolateur FXBW 800/400 DC SIR appelé E (figure I.1).



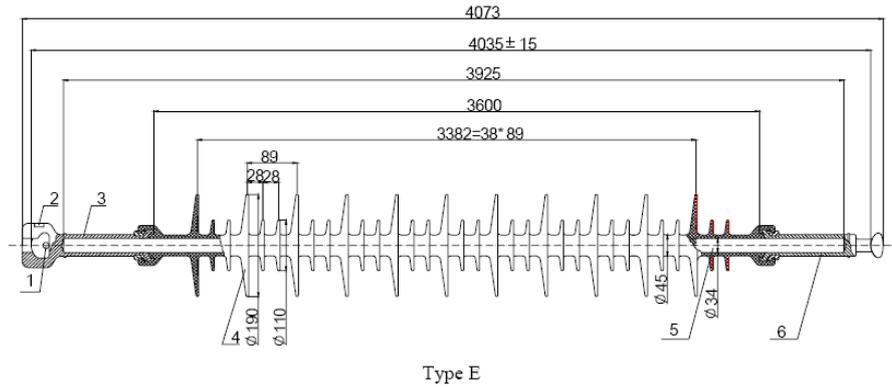


Figure I.1: Différents profils d'isolateurs.

La SLM (Solid Layer Method) est appliquée pour la pollution de ces isolateurs qui sont placés dans une chambre où la température ne dépasse pas 35 °C. Cette chambre est pressurisée à $P_1=98.7$ kPa et $P_2=76.4$ kPa afin de simuler les altitudes : 232m et 2500m. Le mouillage des isolateurs est réalisé avec la vapeur d'eau à un niveau d'ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) de 0.05 ± 0.01 kg/h.m³ entre 7 et 15 minutes et la tension appliquée varie entre ± 600 kV et ± 800 kV. L'augmentation de la tension est faite selon les recommandations de la CEI [7].

Ainsi ils ont mis en évidence que le profil, le matériau de l'isolateur et la pression de l'air ont une influence directe sur l'exposant "a" qui caractérise l'ESDD. Ce dernier a manifestement un effet remarquable sur la tension de décharge disruptive, avec une valeur variant entre 0.24 et 0.3. La relation donnant la tension de décharge en fonction de " a " est donnée par :

$$U_f = A * (ESDD)^{-a} \quad (I.1)$$

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

Un deuxième paramètre qui est également un autre exposant nommé "n" qui caractérise la pression de l'air est aussi influencé par le profil et le matériau de l'isolateur. D'après les résultats obtenus, la valeur de "n" varie entre 0.5 et 0.8 ; l'expression donnant la tension de décharge disruptive en fonction de la pression " P " et du nombre "n" est donnée par :

$$U_f = U_0 * \left(\frac{P}{P_0}\right)^n \quad (I.2)$$

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

Ces chercheurs ont déduit que pour les faibles niveaux de pollution et sous une tension continue ± 800 kV, la distance parcourue par l'arc électrique ne doit

pas être supérieure à 8.16 m et la distance de fuite ne doit pas être inférieure à 30.2 m afin d'éviter le contournement en basses altitudes. Pour les hautes altitudes (1000 et 2000 m) et sous le même niveau de tension, ces deux derniers paramètres ne doivent pas être inférieur à 30.6 m (distance de fuite) et supérieur à 8.40 m (distance parcourue par l'arc) pour l'isolateur E.

Un rapport entre la distance de fuite et la distance parcourue par l'arc dans l'air a permis d'obtenir une valeur optimale de 3.35 pour laquelle l'intensité du champ électrique est la plus élevée, réduisant ainsi la probabilité d'occurrence du contournement sous pollution.

I-3-Comparaison des performances sous pollution d'un isolateur à long fût et d'un isolateur à disque utilisés en HVDC:

J.M.Seifert et al [8] ont pu déterminer à travers leur étude menée au laboratoire selon la norme IEC 61245 [9], que pour des conditions de pollution identiques, les deux isolateurs (à long fût et de type disque) possèdent les mêmes caractéristiques sous tension continue. Ils constatent que l'intensité du champ électrique calculée pour la distance de contournement sous pollution est inversement proportionnelle à la densité d'impuretés présente sur la surface des deux isolateurs (figure I.2). La pollution artificielle est effectuée par la méthode SLM en utilisant les méthodes de mesures basées sur l'ESDD. La solution polluante contient :

- 40 g de Bentonite.
- 0.33 ml d'agent solvant (Photo Flow 600).
- 1 l d'eau du robinet qui contient une certaine concentration de NaCl.

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

- E 160 PZ/170 HVAC (figure I.3.a)
- F16 P13/160 DR HVDC (figure I.3.b)

La troisième est de type long fût, composée de quatre unités en porcelaine de type 75/16 + 15/1395 (figure I.3.c). Les seuils de pollution varient entre 0.02 et 0.07 mg/cm² et l'humidification des isolateurs est faite en position horizontale pour plusieurs angles. La plage de variation de la tension continue est entre 300 et 600 kV.

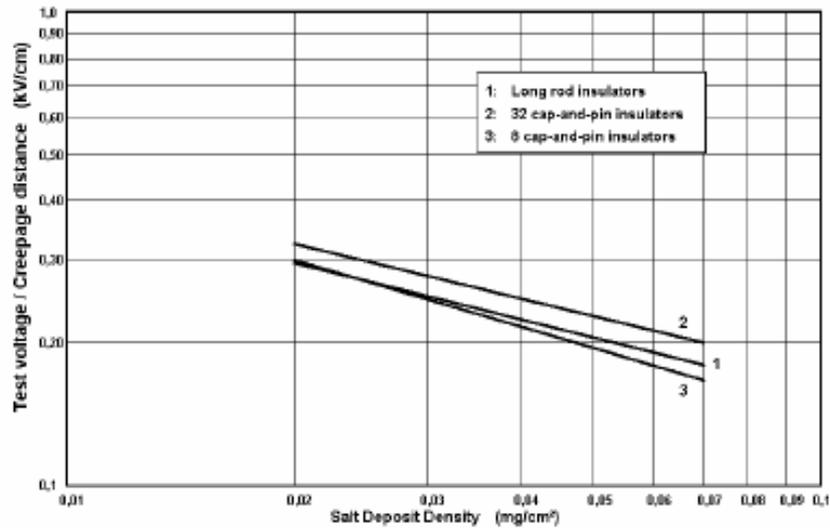


Figure I.2 : Variation de l'intensité du champ électrique en fonction de l'ESDD pour les trois chaînes d'isolateurs.

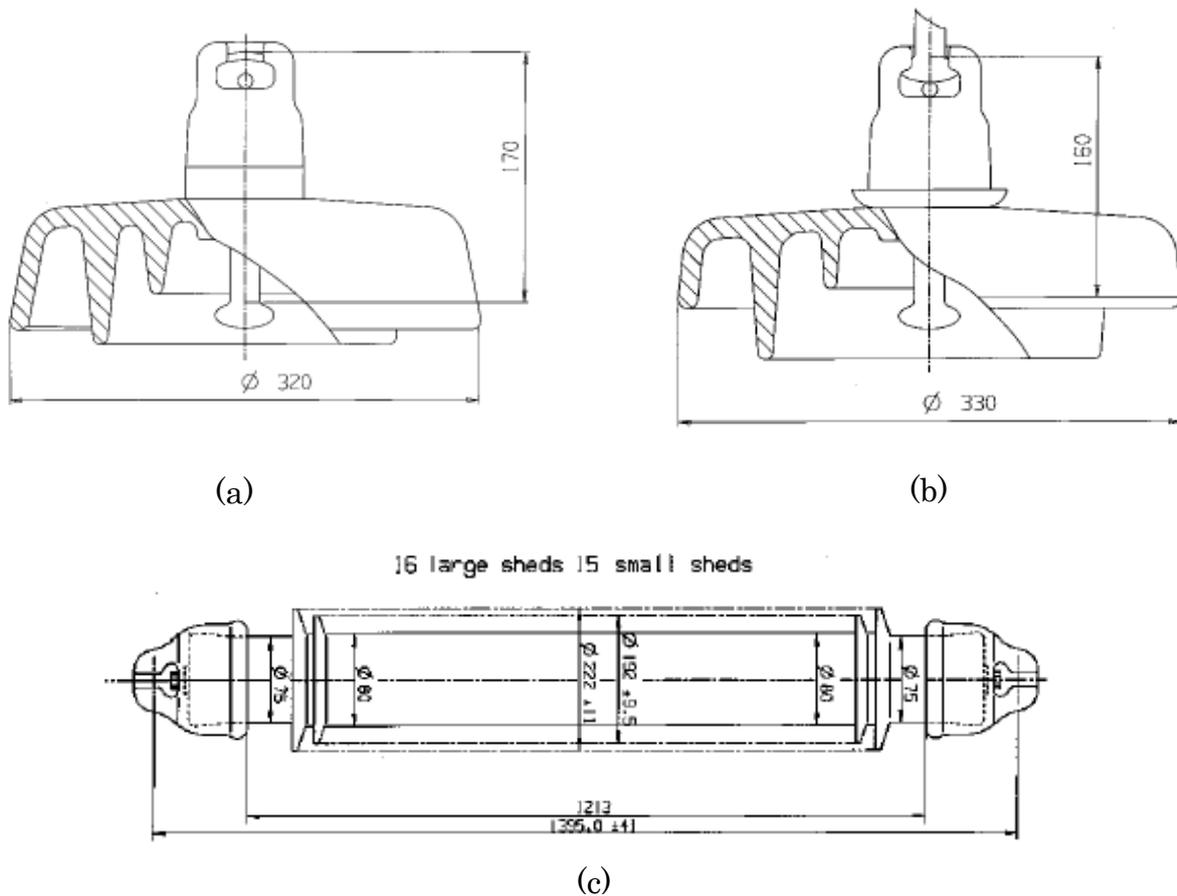


Figure I.3 : Différents types d'isolateurs testés : (a) E 160 PZ/170 HVAC, (b) F16 P13/160 DR HVDC, (c) type long fût 75/16 + 15/1395.

I-4-Influence de la forme de l'isolateur sur les décharges superficielles et la tension de contournement sous pollution:

En dépit des nombreuses recherches sur le comportement des isolateurs par temps de pollution, plusieurs caractéristiques liées à l'influence de leur profil sur le phénomène de contournement restent inconnues. R.Boudissa et al[10] ont réalisé un travail qui lie différents paramètres géométriques à la tension de contournement.

L'expérience est réalisée avec cinq isolateurs en porcelaine et un isolateur parfaitement cylindrique (figure I.4).

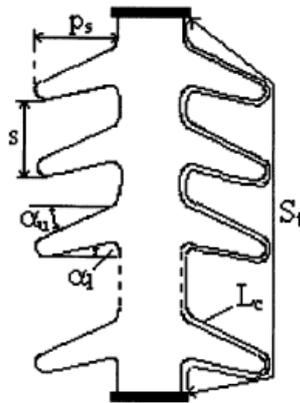


Figure I.4 : Profil des isolateurs testés.

La solution polluante contient dans un litre d'eau de robinet, 20g d'acide salicylique et 1 ml d'agent solvant récupéré d'un laboratoire de développement photographique ; du NaCl est rajouté par la suite. Ceci permet d'obtenir lors de la pollution de la surface des isolateurs, une couche de pollution plus ou moins uniforme. La procédure adoptée veut que l'isolateur soit plongé dans cette solution puis suspendu verticalement pendant 3 mn ; la tension lui est appliquée par la suite dans cette position.

Vingt cinq essais sont effectués pour la détermination de la tension $U_{50\%}$ à l'aide de la méthode up and down [11-13]. La conductivité de la couche de pollution est calculée pour chaque essai en fonction du courant de pré-décharge et de la tension [14,15] qui sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope. Le cas de la pollution non-uniforme a été traité selon deux scénarios :

- Le centre et la surface extérieurs de l'isolateur sont fortement pollués par rapport à la surface interne.
- Le centre est légèrement pollué par rapport au reste de la surface.

Les résultats de ces investigations démontrent que sous pollution non-uniforme, la tension de contournement est à son plus faible niveau ; ceci est la conséquence directe de la diminution de la distance parcourue par la décharge

électrique durant le contournement. Ces conclusions sont en accord avec d'autres recherches [16,17].

Le calcul du nombre d'arcs est estimé grâce aux dimensions de l'isolateur ; il est exprimé par :

$$N_p = \text{trunc}(Q) \quad (\text{I.3})$$

$$Q = \frac{w_r/L_c}{w_{eff}/L_c} \quad (\text{I.4})$$

Pour les isolateurs ayant un diamètre du tube central inférieur à celui des ailettes, le contournement se fait par un seul arc. La comparaison entre l'isolateur cylindrique et les isolateurs à profil irrégulier a pu identifier le chemin parcouru par la décharge lors du contournement.

I-5-Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère pollués artificiellement:

Yong Zhou et al [18] ont exploité les informations procurées par le signal du courant de fuite pour caractériser l'état de surface d'un isolateur SIR de type EVA et pour comparer les résultats obtenus avec ceux d'un modèle proposé. Le diagnostic à partir du courant de fuite a été pris en considération suite à l'intérêt porté par l'équipe sur les propriétés hydrophobes du matériau et l'évaluation des dégradations occasionnées sur les propriétés d'isolations[19].

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

- Les arcs locaux qui surviennent dans les bandes sèches.
- Les décharges partielles qui sont provoquées par la triple jonction entre les gouttelettes d'eau, le polymère et l'air à cause de la différence de la permittivité de chacun d'entre eux [20].

Le mode expérimental a pris en considération la pollution par humidification vu qu'elle est largement utilisée dans les recherches pour l'étude des performances électriques des polymères sous haute tension [21-22].

La pollution des isolateurs réel et modèle (figure I.5) est faite avec une solution de 3 l d'eau distillée qui contient 40 g/l de Tonoko et 12 g/l de NaCl ; les mesures effectuées avec l'ESDD indiquent 0.03 mg/cm² pour cette solution. La

pollution des surfaces est effectuée par pulvérisation et la tension appliquée est de 4.8 kV et 13.3 kV respectivement pour le modèle et l'isolateur réel.

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

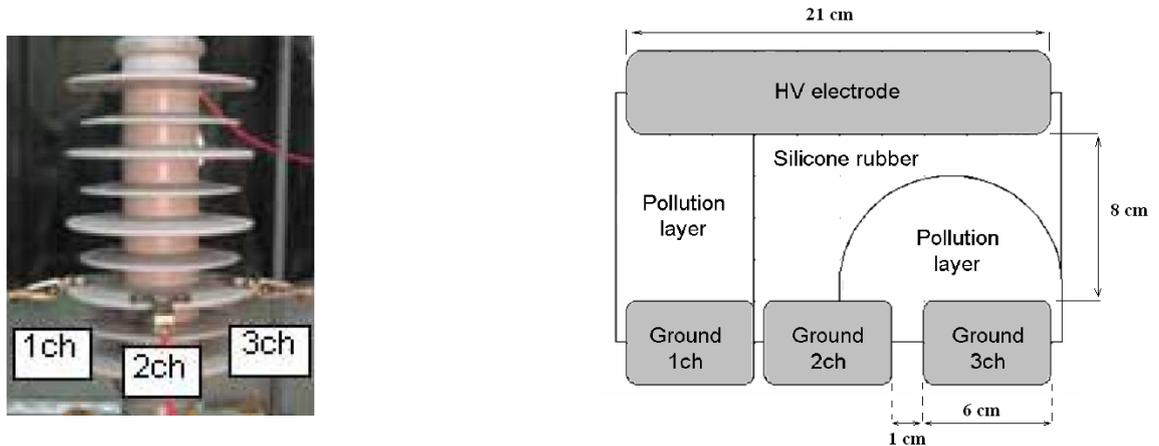


Figure I.5: *Isolateur réel (à gauche) et son modèle (à droite).*

Les résultats obtenus lors de l'analyse des courants (modèle plan) 1ch, 2ch et 3ch montrent que 1ch a une forme parfaitement sinusoïdale due à l'uniformité de la couche de pollution (caractère parfaitement résistif) ; 2ch et 3ch ont une forme distordue due d'une part à l'activité intense des décharges et d'autre part à la non-uniformité de la couche de pollution (figure I.6). Ces décharges sont le résultat d'une valeur du champ électrique qui dépasse celle de la rigidité diélectrique du système ainsi formé.

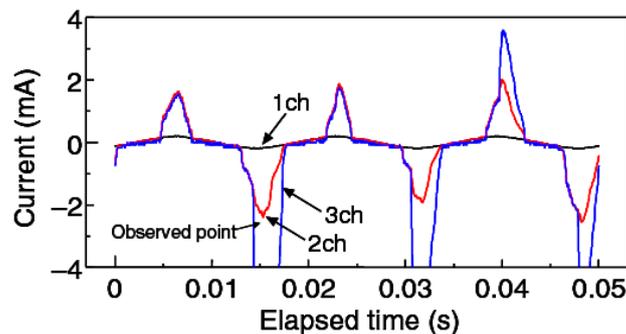


Figure I.6 : *Formes d'ondes des courants de fuite du modèle.*

Pour l'isolateur de type EVA, les trois signaux du courant de fuite ont une densité non-uniforme (figure I.7); ce phénomène est le résultat de l'irrégularité du profil de l'isolateur. L'apparition d'arcs locaux est causée par l'assèchement de certaines zones, dû à cette densité de courant non-uniforme.

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

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

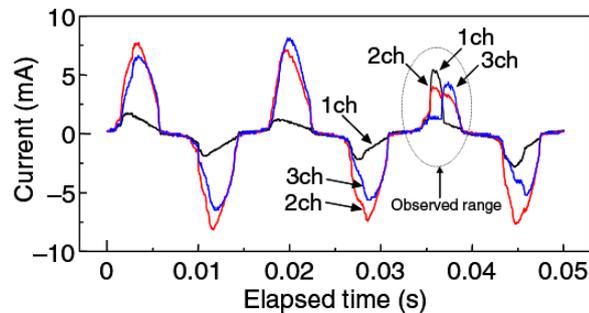


Figure I.7 : formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel.

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

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

En Indonésie, Aulia et al [23] ont consacré toute une recherche sur les isolateurs en porcelaine pour déterminer la sévérité de la pollution. Ils se sont principalement basés sur les informations fournies par le courant de fuite pour calculer le THD du signal. Ces isolateurs sont pour la plupart exposés aux dépôts de sel en milieu marin et aux dépôts de poussières et de suies évacuées des cheminées dans les zones industrielles ; ces deux types de pollutions contribuent à la diminution des propriétés diélectriques et à l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite à la surface des isolateurs [24,25].

Leur expérience consiste à placer l'isolateur en porcelaine dans une chambre fabriquée en amiante afin de garantir une bonne isolation thermique. En premier lieu, la contamination de la surface de l'isolateur est réalisée avec une solution qui contient selon la norme IEC 507 [26] :

- 40 g de NaCl.
- 40 g de Kaolin.
- 1000 g d'eau distillée.

La pulvérisation a lieu 8 fois à l'aide d'une pompe avec des durées de 4 s et 20 s pour faire varier les niveaux d'ESDD. En deuxième lieu, la contamination de l'isolateur est accomplie manuellement avec de la poussière de ciment suivant les techniques de mesure basées sur la NSDD. Les essais sont effectués avec la méthode KTM. La tension pendant les essais est maintenue constante à 6 kV ; elle correspond à la valeur entre la phase et le neutre en temps réel. Le courant de fuite et la tension sont enregistrés 30 s après la fin des pulvérisations, à l'aide d'une résistance $R = 375 \Omega$ et d'un oscilloscope relié à un PC. La détermination du THD s'est faite par le calcul de la FFT [27].

Les résultats obtenus pour les différents niveaux de contaminations sont montrés au tableau I.1.

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

Tableau I.1 : Résultats pour les différents niveaux de contamination.

Les résultats montrent que pour la solution saline et pour un temps de pulvérisation de 4s (Figure I.8), l'amplitude du courant de fuite augmente et le THD diminue comparativement au cas propre et humide, à cause de la faible valeur de la résistance de la couche polluée.

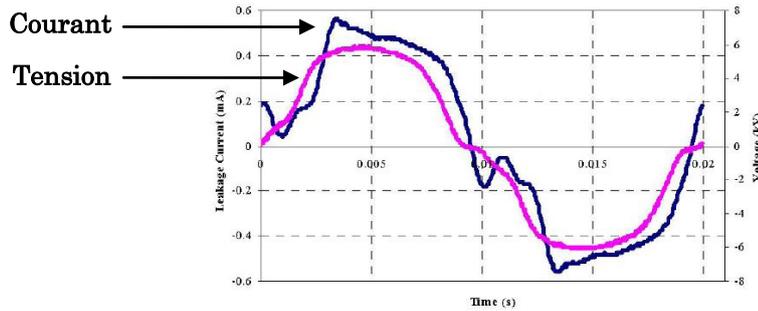


Figure I.8 : *Forme d'ondes du courant de fuite et de la tension pour 4 s de pulvérisation avec la solution saline.*

Pour un temps de pulvérisation de 20 s, le courant de fuite et le THD augmentent à cause de l'occurrence d'arcs locaux initiés par l'assèchement de certaines zones [28].

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

Pour le cas humide, l'augmentation du THD et de l'amplitude ainsi que les pics enregistrés sur le signal du courant montrent, d'une part que la résistance de la couche de pollution humidifiée est la plus faible à cause des propriétés hydrophiles du ciment, et d'autre part que des arcs locaux sont bel et bien présents sur la surface de l'isolateur (figure I.9).

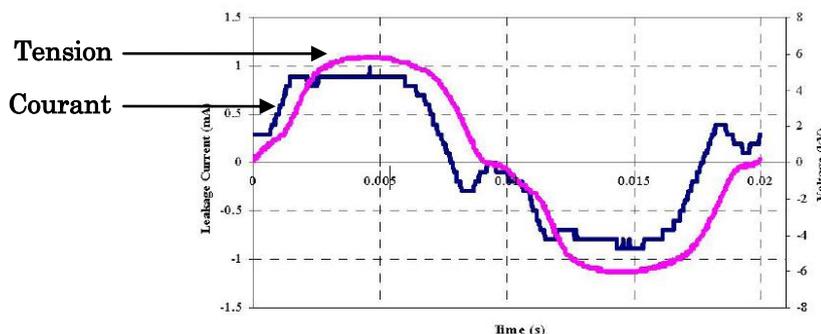


Figure I.9 : *Forme d'ondes du courant et de la tension pour la pollution avec de la poussière de ciment.*

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

I-7 -Etude du phénomène d'érosion d'un isolateur SIR exposé aux décharges partielles:

Vu le grand intérêt porté par l'Amérique du nord aux isolateurs de type SIR [29], et sachant que plusieurs études montrent que ceux-ci sont le plus exposés au phénomène d'érosion pour de faibles conductivités [30,31], il est devenu nécessaire de mener des recherches pour mettre en évidence que les décharges partielles qui apparaissent à la surface des isolateurs pollués avec de faibles conductivités, sont responsables de la dégradation des propriétés de ces matériaux à savoir : une rigidité mécanique élevée malgré leur légèreté et une résistance relativement élevée pour des conditions de pollution extrêmes.

Au Japon, K. Haji et al [32] ont consacré toute une étude pour voir l'effet des décharges partielles sous différentes conductivités, sur l'érosion ainsi que la perte de poids (Molar Weight Loss) sur des isolateurs SIR. Comme le montre la figure I.10, le modèle d'isolateur est équipé de deux électrodes en cuivre ; une connectée à la source haute tension (60 Hz) à travers une résistance $R_s = 1.4 \text{ M}\Omega$ et une autre connectée à la terre.

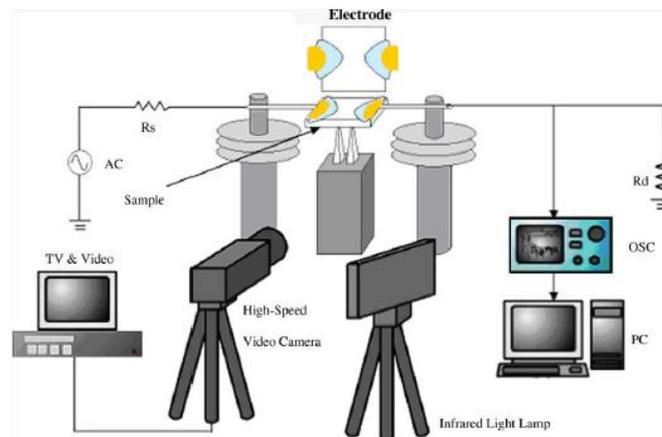


Figure I.10 : *Dispositif expérimental.*

La pollution de la surface est simulée avec quatre solutions contenant du NaCl de conductivité : 0,8, 4,8 et 16 mS/cm. La distance inter-électrode est de 10 mm. Un dispositif constitué d'une caméra et d'un oscilloscope reliés à un PC, a permis de suivre le comportement des décharges et d'enregistrer les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. Un thermographe a enregistré l'évolution de la température et une balance électronique mesure le poids du modèle après chaque essai de décharge. Une simulation du champ électrique avec la méthode des éléments finis a permis d'évaluer sa distribution durant la propagation des décharges partielles. Le calcul de la résistance de la couche de pollution est fait grâce à la relation de Mayr [33,34]. Le courant de fuite est

maintenu à 10 mA et le calcul du champ électrique a tenu compte des investigations de Nishimura [35].

Les résultats obtenus montrent qu'après 140 s d'exposition aux décharges partielles, les pertes de poids molaires sont plus importantes pour les basses conductivités (0.8 et 4 mS/cm). Les relevés du courant de fuite et de la tension appliquée ont permis de suivre l'évolution des décharges et d'indiquer que plusieurs ont eu lieu simultanément. Cela est confirmé par la présence de pics au sein de l'onde de tension et celle du courant de fuite (figure I.11).

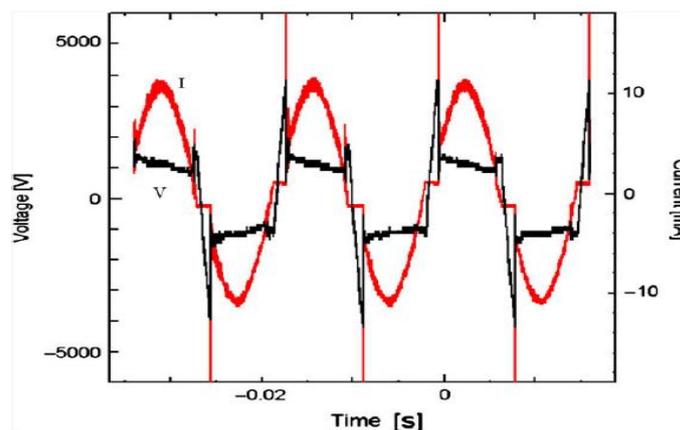


Figure I.11 : Formes d'ondes du courant de fuite et de la tension pour 0.8 mS/cm.

Les auteurs constatent également que pour les faibles conductivités, les décharges se propagent à la surface de l'isolateur avec l'apparition de particules de silice ; ceci signifie que l'érosion est très sévère [36]. Pour les conductivités élevées (8 et 16 mS/cm), l'arc électrique a tendance à se former dans l'air ce qui peut expliquer l'absence quasi-totale de trace d'érosion. Ces résultats concordent parfaitement avec d'autres investigations. [37]

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

Les simulations du champ électrique affichent une diminution de son intensité avec l'augmentation de la conductivité. Cette diminution survient à cause des ions Cl^- (pollution marine) qui ont tendance à réagir avec l'électrode en cuivre menant à une chute de tension au voisinage de la cathode [38,40] ; elle est estimée à 500 V pour 16 mS/cm. Le nombre de ces ions dépend de la concentration de la solution polluante et son augmentation conduit à un affaiblissement de l'intensité du champ électrique au voisinage de la cathode.

I-8- Caractérisation du procédé d'érosion par les méthodes d'analyses temps-fréquence :

Une autre vision concernant le phénomène d'érosion est établie par S.W.Jee et al [41] en utilisant les méthodes d'analyses temps-fréquence ainsi que le calcul de la distribution d'énergie du signal de la tension appliquée.

L'étude du phénomène nécessite l'utilisation d'une plaque en PVC (figure I.12), (60x60x3 mm³) et l'application d'une tension sinusoïdale de fréquence 60 Hz et d'amplitude 380 V ; l'acquisition des signaux de la tension et du courant de fuite (figure I.13) est faite grâce à un oscilloscope digital *Lecroy DSO*. Les tests sont réalisés suivant la norme IEC 60112. L'électrolyte constitué de NH₄Cl de concentration 0.1 % dans un volume d'eau de 20mm³ est pulvérisé sur la plaque toutes les 30 s car son utilisation favorise l'apparition des décharges électriques.

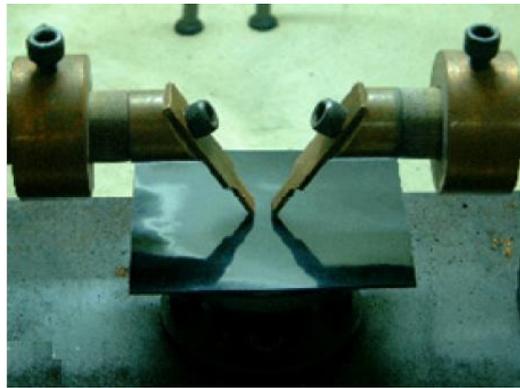


Figure I.12 : *Disposition des électrodes sur la plaque.*

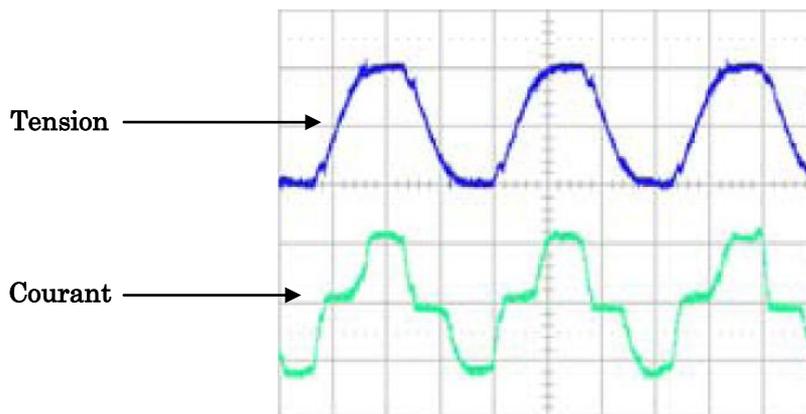


Figure 1.13 : *Forme d'ondes du courant de fuite et de la tension pendant la progression de la décharge.*

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

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

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

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

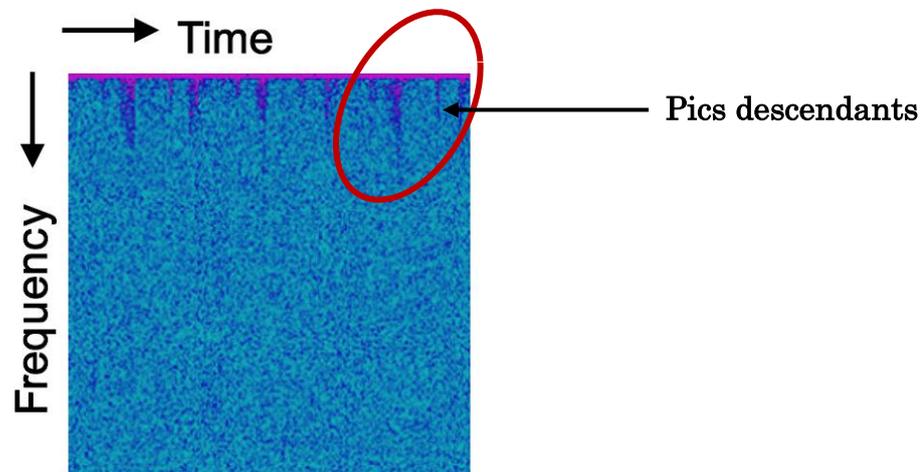


Figure I.14: Représentation temps-fréquence juste avant la décharge disruptive.

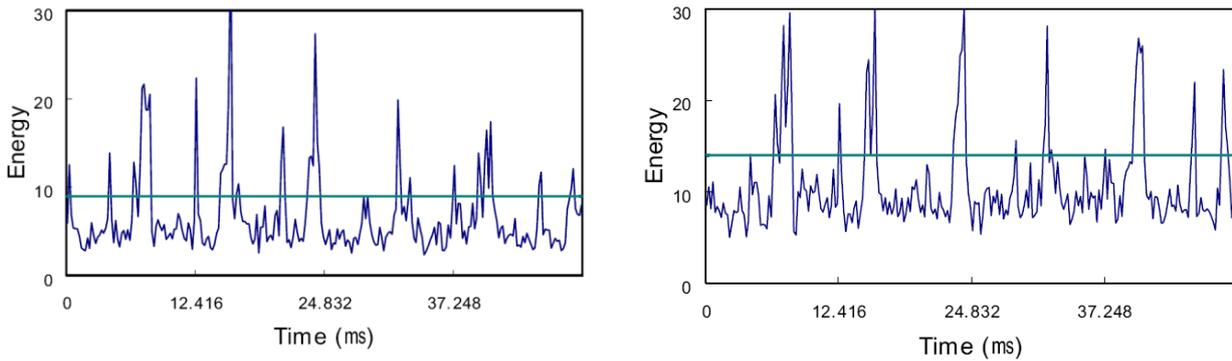


Figure I.15 : *Distribution de l'énergie de la tension pour la gamme des harmoniques 4 jusqu'à 10 (à gauche) et pour la gamme 11 jusqu'à 25 (à droite) juste avant le contournement.*

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

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

Actuellement, les matériaux isolants utilisés dans les réseaux électriques subissent des dommages et des dégradations progressives dus à l'activité des décharges partielles ce qui rend leur détection et leur caractérisation d'une importance capitale dans le diagnostic et la surveillance "On-line". [42]

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

X.Song et al [43] utilisent la SGWT pour le filtrage des données concernant les décharges partielles. Pour cela, ils effectuent une comparaison entre la DWT et la SGWT ; ils déduisent qu'à cause de son extrême sensibilité, la SGWT procure de meilleures performances par rapport à la DWT bien que celle-ci suscite un grand intérêt ces dernières années [44,45] mais se révèle quand même apte à reproduire la forme des décharges partielles. La différence entre les deux méthodes réside dans l'algorithme de décomposition et de reconstruction du signal d'entrée.

Leurs travaux de simulation par ordinateur consistent à reproduire 10 impulsions de décharges selon la norme IEC 60270 ; la fréquence d'échantillonnage est de 100 MHz et le signal de décharge est pollué à l'aide d'un bruit blanc Gaussien de rapport **Signal/bruit = -15 dB** (figure I.16).

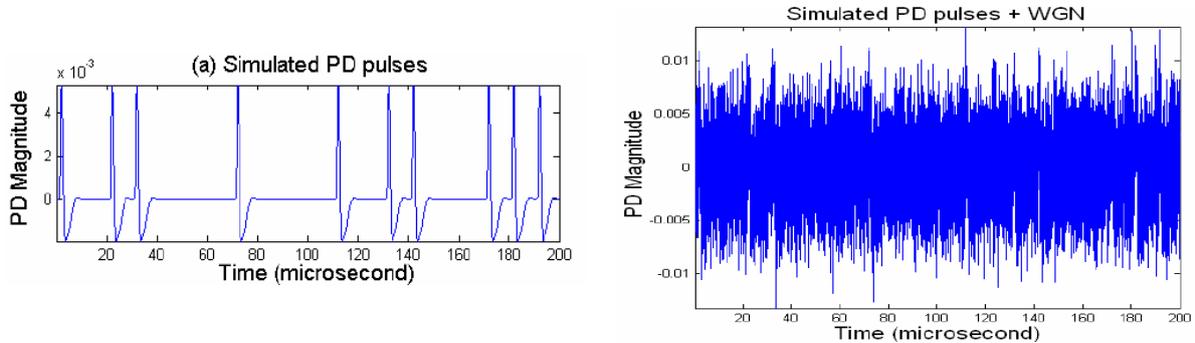


Figure I.16 : *Forme d'onde du signal des décharges partielles sans bruit (à gauche) et avec bruit (à droite).*

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

Les travaux expérimentaux concernent l'application de la SGWT et de la DWT sur un signal de décharge réel récupéré du réseau EDF 11 kV. L'équipe conclut encore une fois que la SGWT est meilleure que la DWT pour déterminer l'amplitude et le nombre de décharges partielles et ce pour un temps de calcul très appréciable [46].

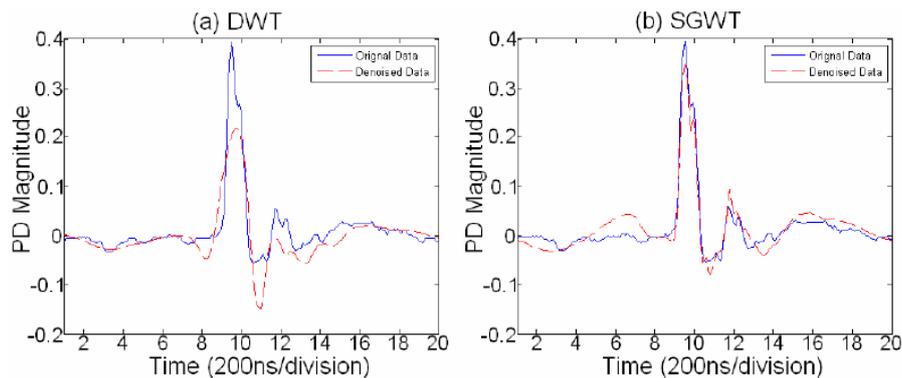


Figure I.17 : *Impulsion de décharge partielle reconstruite avec la DWT et la SGWT (l'impulsion réelle est en bleu et l'impulsion reconstruite est en rouge).*

I-10-Analyse du courant de fuite sur des isolateurs pollués par la technique RP :

B.X Du et al [47] ont introduit une nouvelle méthode d'analyse du courant de fuite pour caractériser l'évolution des décharges partielles avant le phénomène de contournement des isolateurs. Contrairement aux autres techniques d'analyses comme la DWT, la FFT et l'analyse spectrale utilisées pour le diagnostic des isolateurs sous pollution [48,49], la RP étudie les caractéristiques non-linéaires du courant de fuite (Répartition non-uniforme des points, apparition de bandes blanches de différentes surfaces) et donne une meilleure perception visuelle pour la surveillance des isolateurs, en se basant sur les informations extraites à partir de la transformée en ondelette du courant de fuite ; celui-ci est décomposé à l'aide d'un développement en séries de fonctions temporelles[50]. La RP a pour expression mathématique:

$$R_{i,j} = H(\varepsilon - \|X(i) - X(j)\|_2) \quad X(i), X(j) \in \mathbb{R}^m \text{ et } i, j \in (1, M) \quad (I.5)$$

ε est une valeur limite qui peut être selon certains auteurs [50,51] prise égale à $0.25 \cdot \sigma$.

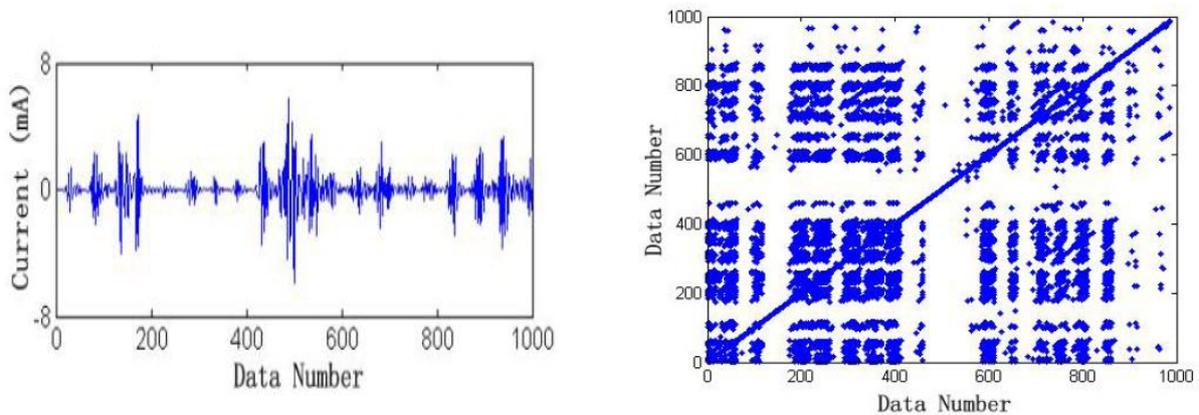


Figure I.18: Représentation visuelle d'une composante du signal de décharge avec la WT (à gauche) et la technique RP (à droite).

La représentation visuelle de la RP est caractérisée par :

- la présence de points regroupés ayant des densités différentes qui indiquent que l'isolateur pollué a un comportement résistif et capacitif déduit du fait de l'existence d'arc locaux dans des bandes sèches.

- Des cases blanches de dimensions variables qui indiquent un changement rapide de l'amplitude du courant de fuite (signe de décharges électriques intenses).
- Des points formant une diagonale qui est présente quelle que soit l'évolution des décharges et indiquent une symétrie de la représentation selon celle-ci.

L'application de cette technique a porté sur des isolateurs en céramique XWP2-70 pollués artificiellement avec une couche de diatomite de $1\text{mg}/\text{cm}^2$ selon les mesures de la NSDD. Un brouillard est créé dans une chambre où sont introduits ces isolateurs avec une concentration mesurée à l'aide de l'ESDD de $0.4\text{ mg}/\text{cm}^2$ d'agent conducteur. Une tension alternative de $66\text{ kV}_{\text{eff}}$ et de fréquence 60 Hz est appliquée pour un taux d'humidité de 100% et le courant de fuite est enregistré avec un convertisseur analogique.

L'application de la RP sur les composantes de basses fréquences du signal de décharges (de 50 jusqu'à 250 Hz) ne présente aucun avantage car elle ne reflète pas l'évolution des décharges partielles puisqu'elle garde un caractère visuel stationnaire. La même conclusion est faite pour les moyennes fréquences (350 jusqu'à 1250 Hz) car elles ne permettent pas de confirmer la non linéarité du signal (Variation de l'amplitude du courant de fuite). En revanche, les hautes fréquences (1250 jusqu'à 2500 Hz) permettent de suivre instantanément les états transitoires du courant de fuite (composante sinusoïdale, composante d'arc local et la composante transitoire) et rendent possible le "Monitoring" de l'état de surface des isolateurs et donc la prédiction du contournement.

I-11-Analyse micro-structurale d'isolateurs sains et d'isolateurs en porcelaine soumis à un vieillissement dû au champ électrique:

Dans l'intention d'apporter un nouvel aspect d'analyse hormis le traitement du signal pour caractériser l'état de surface des isolateurs ayant subi une longue période d'utilisation, A.Rawat et R.S.Gorur [52] utilisent l'analyse micro-structurale pour des isolateurs vieillis par le champ électrique et d'autres neufs (figure I.19).

Les deux techniques basées sur la XRD et la SEM sont les principaux outils utilisés pour avoir des renseignements précis sur la répartition des matières premières qui forment la porcelaine comme le quartz, la mullite et le corindon ; le calcul du taux de porosité a été bénéfique pour établir l'influence du champ électrique intense sur les isolateurs en porcelaine. Le but de cette étude

concerne l'évaluation des performances des isolateurs en termes de rigidité mécanique et de rigidité électrique.

200 échantillons utilisés dans le réseau 115/500 kV sont ramenés des différentes régions d'Amérique du nord et sont testés au laboratoire sous tension alternative (60 Hz) selon la norme ANSI C29.1 [53]. Ces isolateurs avaient subi des perforations et des microfissures causées, soit par le phénomène de contournement, soit par une activité intense des décharges partielles sur leurs surfaces. La variation de couleur observée sur ces matériaux va du blanc au jaune verdoyant ; ceci peut être interprété par la présence d'impuretés introduites au sein de l'argile durant le processus de fabrication [54].



Figure I.19 : *Différents types d'isolateurs testés.*

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

L'analyse par la XRD du matériau isolant montre que les isolateurs ayant un fort taux d'alumine et pour lesquels la décharge électrique avait suivi le chemin de perforation, ont un faible résidu de quartz ; par contre les isolateurs pour lesquels la décharge n'avait pas suivi le chemin de perforation ont un résidu de quartz élevé. Pour le ciment, la XRD révèle qu'une expansion de celui-ci autour de la cavité où se trouve l'électrode haute tension produirait une forte intensité du champ électrique, qui va engendrer des fissures au niveau de la porcelaine [55] ; cette expansion est causée par la formation d'oxyde de magnésium à partir d'un procédé d'humidification qui fait apparaître de l'ettringite, produite par une réaction chimique entre le ciment et les ions sulfatés [56].

Les observations relatives à l'analyse par SEM sont synthétisées dans le tableau I.2.

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

Tableau I.2 : Principales observations par la SEM.

Il s'avère que la présence du corindon réduit la probabilité d'occurrence des fissures puisqu'il diminue l'intensité du champ électrique, mais il ne peut garantir une protection à long terme. La présence de pores sous forme d'agglomération indique une exposition à un champ électrique intense. Le quartz est en grande partie responsable des fissures occasionnées par le champ électrique, donc il serait préférable de fabriquer la porcelaine avec un faible taux de quartz dont les particules possèdent de petites dimension ($D < 25\mu\text{m}$). Aussi, la présence des particules de sable dans le ciment permet de limiter l'expansion de celui-ci dans la cavité de l'isolateur mais elle n'a aucune influence sur la formation des microfissures. La figure I.20 montre des pores dispersés pour le cas des isolateurs sains.

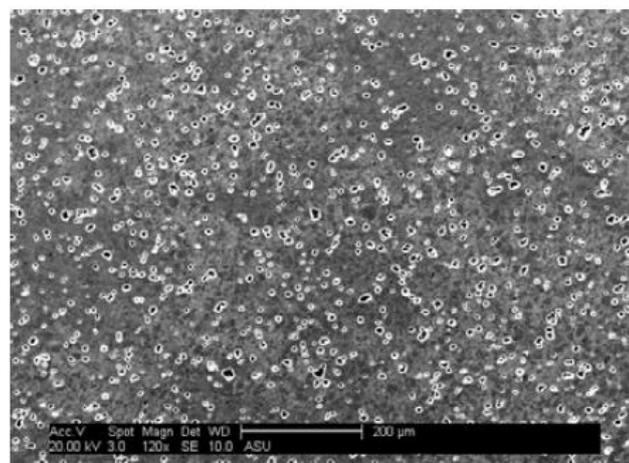


Figure I.20 : Image microscopique montrant des pores dispersés.

I-12- Etude de la pollution des isolateurs en céramique par la détection des décharges partielles :

En Italie, A. Cavallini et al [57] analysent la corrélation qui peut exister entre les décharges partielles et le niveau de pollution des isolateurs en céramique. Pour cela, ils préfèrent une expertise des données du courant de fuite pour la détection des décharges partielles aux méthodes classiques basées sur l'ESDD, compte tenu de la simplicité d'étude de l'onde du courant [58,59].

L'expérience est faite sur des isolateurs en céramique « capot et tige » en commençant par tester un seul (longueur axiale : 50mm, distance de fuite : 350mm) puis sur une chaîne de trois isolateurs (longueur axiale : 380 mm, distance de fuite : 350 mm). Les essais sont faits pour différentes concentrations de la solution polluante (de 20 g/l jusqu'à 100 g/l de NaCl) avec une humidification par pulvérisation. La détection des décharges partielles est faite avec un HFCT. Des caméras infra-rouge et ultra-violet suivent l'évolution des décharges et de la température sur la surface des isolateurs.

Pour l'isolateur seul, la tension d'apparition des décharges partielles diminue avec l'augmentation de la concentration de la solution polluante ; ces décharges se propagent entre l'électrode haute tension et la surface intérieure de l'isolateur, puis sur le côté extérieur de l'isolateur à cause de la forte densité du courant de fuite qui augmente la température sur la surface intérieure, menant à l'assèchement local de plusieurs zones [60]. L'amplitude des DP augmente proportionnellement avec la tension appliquée et le niveau de pollution (figure I.21) ; ceci est concrétisé par l'élongation progressive des DP en fonction des zones sèches.

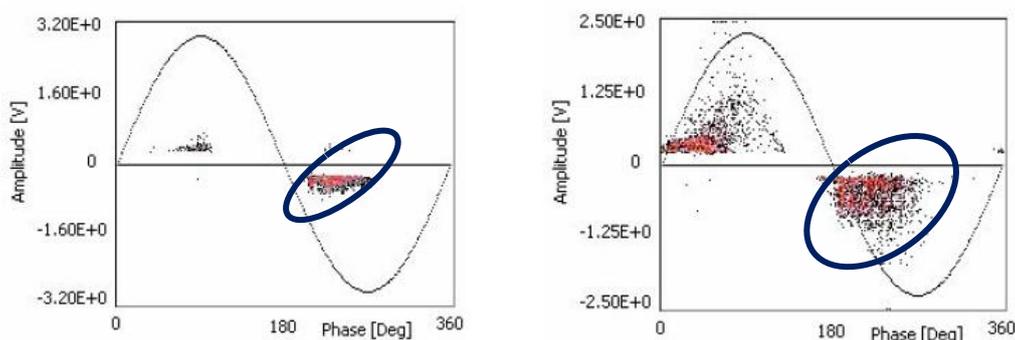


Figure I.21 : Evolution de l'amplitude des décharges partielles pour l'état sec et propre (à gauche) et pour l'état pollué (à droite).

Pour la chaîne d'isolateurs, les DP apparaissent uniquement sur la périphérie des isolateurs en forme de bandes ; le temps d'apparition des DP est pratiquement le même pour des niveaux de tension très élevés, ce qui signifie que

la charge d'espace cédée par la décharge précédente n'agit pas sur le comportement stochastique des DP.

Les auteurs présentent également un algorithme pour caractériser la sévérité de pollution à partir de l'analyse du déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite moyennant la fonction d'appartenance (*Membership function*).

```

IF ( $\Delta\Phi^+ < 100$ ) AND
  ( $\Phi_{mean}^+ > 45$ ) AND ( $\Phi_{mean}^- > 225$ ) AND
  ( $-0.975 < ND < 0.975$ ) AND
  ( $\beta^+ < 3$ ) AND ( $\beta^- < 3$ )
Then Conductive Pollution.

```

Figure I.22: Conditions pour établir l'existence d'une couche de pollution à la surface de l'isolateur.

L'algorithme permet de calculer le DOF après estimation de B et $\Delta\Phi$; il peut être proche de 0 pour un faible niveau de pollution ou proche de 1 pour un niveau de pollution critique.

Enfin, les auteurs soutiennent qu'il serait préférable de combiner les données du courant de fuite et celles du HFCT pour réduire les erreurs d'estimation des DP car certaines sont issues des détecteurs qui ont une bande passante de quelques kilohertz ; cette gamme affecte la résolution en temps lorsque les DP ont lieu, menant à une superposition de certains signaux [61].

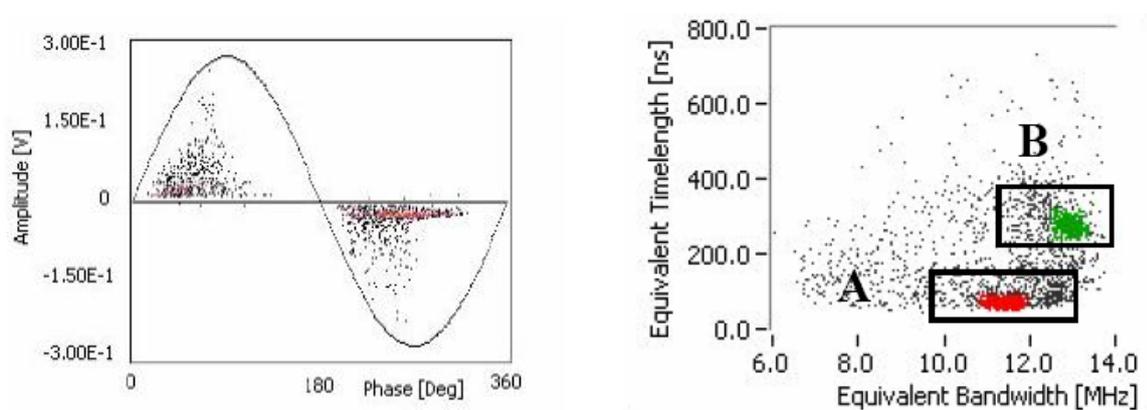


Figure I.23 : Séparation entre les DP parasites causées par l'effet de couronne et les DP utiles du signal HFCT.

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

De nos jours, les défauts électriques sur les réseaux de distribution moyenne tension sont très fréquents [62]. De nombreux algorithmes sont développés pour la protection et la détection des défauts sur les lignes de transmissions d'énergie électrique [63]. Dans ce cadre, N.I Elkalachy et al [64] ont présenté un travail basé sur la détection et la modélisation d'un arc électrique et la mesure de l'impédance de défaut par la simulation sur logiciel et l'expérimentation sur un circuit d'essai.

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



Figure I.24 : *Mode expérimental pour initier l'arc.*

Les mesures de l'impédance de défaut indiquent une valeur de 201 k Ω ; la variation de celle-ci dépend des conditions atmosphériques du lieu de mesure. Les données de la tension et du courant de fuite ont permis de modéliser le comportement thermique de l'arc grâce au modèle de Cassie [65] et Mayr [66] pour réduire le temps de calcul.

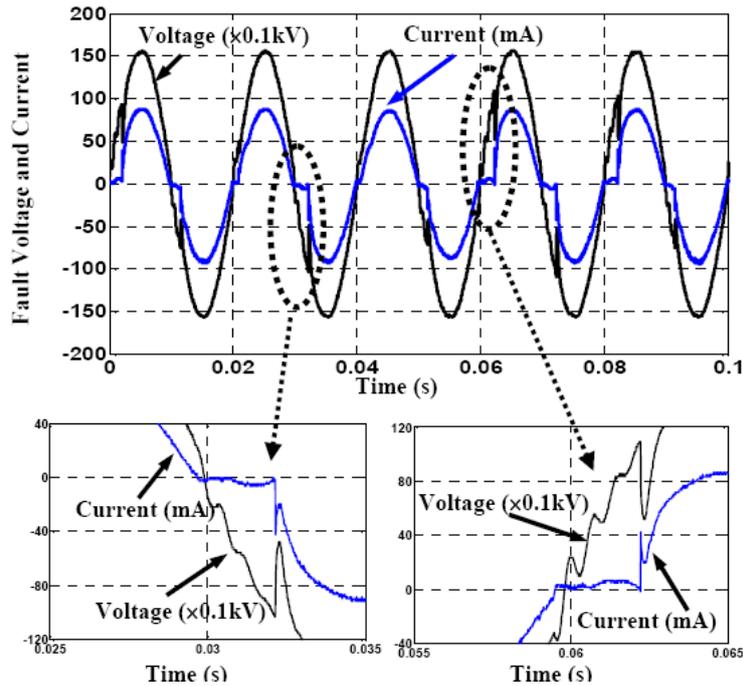


Figure I.25 : Courant de fuite et tension pour une propagation de l'arc sur le feuillage.

La modélisation par simulation est faite à l'aide d'un algorithme et d'un circuit réalisés avec le logiciel ATP/EMTP. Les résultats de calcul de l'impédance montrent une variation de sa valeur pour les deux alternances de la tension car, pendant l'alternance positive, la décharge se propage le long du feuillage, puis elle se dirige vers le tronc d'arbre pendant l'alternance négative.

La détection de la nature du défaut a été faite grâce à la DWT [67] en utilisant l'ondelette de Daubechies 14 sur le courant de fuite pour le calcul des composantes fréquentielles d_3 et d_4 , dont les bandes passantes sont respectivement :

- 6.125 à 12.5 kHz.
- 3.125 à 6.25 kHz.

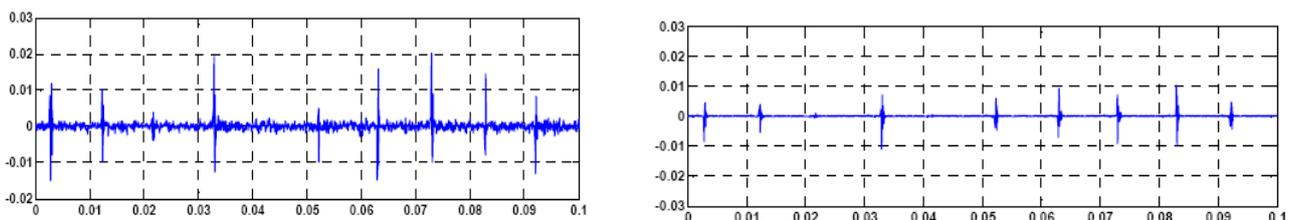


Figure I.26 : Composante fréquentielle d_3 du courant de fuite expérimentale (à droite) et du modèle simulé (à gauche).

Les résultats du mode expérimental et de la simulation présentent une certaine similitude qui a eu pour conséquence la validation du modèle d'arc proposé.

Toutefois, Il a été constaté que la détection du lieu de défaut par l'analyse de la tension et du courant de fuite d'une phase peut induire en erreur, lorsque plusieurs défauts de courant ont lieu simultanément, à cause de leur faible amplitude ; ceci rend leur détection difficile pour un signal de courant possédant un THD élevé. Etant donné que les réseaux nordiques présentent pour la plupart un neutre accessible (pas de mise à la terre) [68], l'analyse de la tension et du courant résiduels présente un avantage particulier pour la localisation du lieu et le diagnostic du défaut, par une simple observation du nombre de pics présents sur l'onde du courant résiduel.

En dernier lieu, les auteurs estiment qu'il serait intéressant de tester la capacité de détection des défauts par le traitement du courant résiduel en simulant plusieurs défauts à la fois.

Chapitre II :

Théories du traitement du signal.

II-1-Généralités sur le traitement du signal [69] :

Le mot signal signifie le résultat d'une mesure physique qui peut être soit continue si celle-ci est disponible à tout instant, soit discrète à condition qu'elle soit observable à des instants particuliers et régulièrement espacés. Le TNS est réservé exclusivement aux signaux à temps discret ; celui-ci a connu une émergence phénoménale avec le développement des composants électroniques. Pour se limiter à quelques exemples d'applications, on peut citer pêle-mêle :

- la suppression du bruit de fond lors d'une transmission téléphonique à partir de l'habitacle d'une voiture.
- la reconnaissance et la synthèse de la parole.
- la localisation par sonar des bancs de poissons.
- l'analyse des signaux électro-encéphalographiques pour l'aide au diagnostic médical.
- la réception d'informations délivrées par le système GPS de navigation par satellite.

Une opération de **numérisation** est nécessaire pour passer d'un signal analogique vers un signal numérique à condition que la grandeur observée soit une fonction du temps. Cette technique consiste à transformer cette grandeur en un signal électrique à l'aide d'un transducteur (microphone) ; ce signal sera par la suite appliqué à l'entrée d'un filtre passe-bas idéal généralement appelé filtre d'**anti-repliement**, dont l'utilité sera traitée dans la partie échantillonnage de ce chapitre. La troisième étape consiste à échantillonner le signal en prélevant toutes les T secondes les valeurs $x_e(n) = x(n \cdot T)$. En dernier lieu, les échantillons prélevés sont codés sur un nombre fini de bits (complément à deux) pour obtenir une suite de valeurs $X(n)$ qui peuvent être traitées sur des calculateurs.

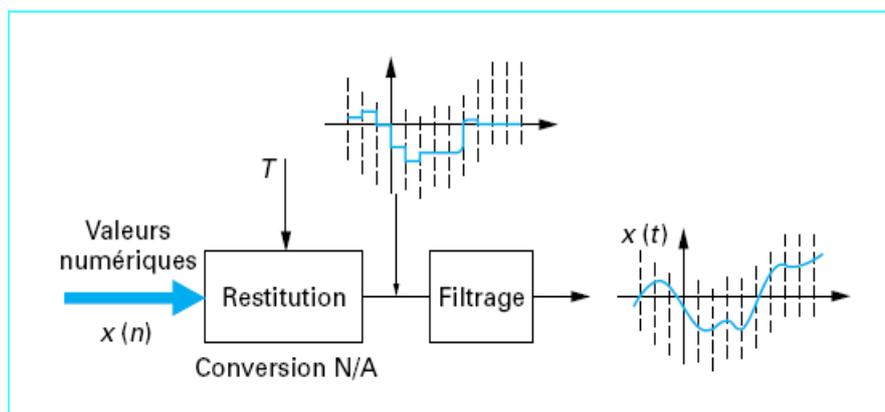


Figure II.1 : *Schéma de la Conversion numérique analogique.*

II-2-Catégories de signaux :

Il est nécessaire de connaître la nature du signal avant d'entamer un traitement quelconque grâce à une étude de ses propriétés qui permettrait de choisir la méthode analysante adéquate. L'organigramme de la figure ci-dessous nous montre les différents types de signaux qui peuvent être rencontrés [70].

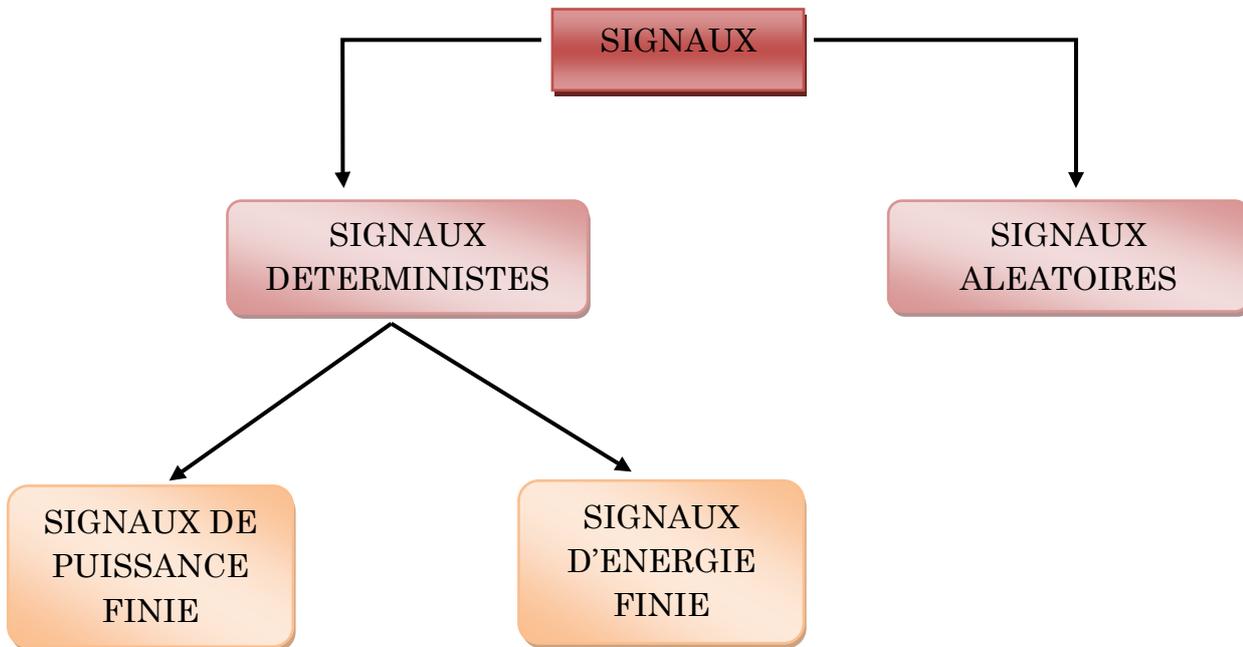


Figure II.2 : *Différents types de signaux.*

II-2-1-Signaux déterministes :

Les signaux déterministes sont représentés par des fonctions mathématiques qui décrivent leurs comportements dans le temps. Ils peuvent être classés en deux groupes selon qu'ils soient d'énergie finie ou de puissance finie.

Dans le cas d'un signal continu d'énergie finie, la condition suivante est satisfaite :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (\text{II.1})$$

Pour un signal à temps discret, nous avons la condition suivante :

$$E = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} |x(k)|^2 < \infty \quad (\text{II.2})$$

Ces signaux ont un caractère impulsionnel dans la plupart des cas et vérifient :

$$|x(t)| \rightarrow 0 \text{ Pour } |t| \rightarrow \infty \quad (\text{II.3})$$

Pour un signal de puissance finie, la condition à satisfaire est :

Signal continu :
$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (\text{II.4})$$

Signal à temps discret :
$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |x(k)|^2 < \infty \quad (\text{II.5})$$

Les évolutions temporelles du signal explicitées par une expression telle que $\mathbf{x}(n) = \mathbf{a} \cdot \cos(2\pi \mathbf{f}_0 \cdot n)$ sont complètement définies à partir du moment où l'amplitude \mathbf{a} et la fréquence \mathbf{f}_0 sont connues. On dit que ce signal est déterministe.

II-2-2-Signaux aléatoires :

Dans la plupart des cas, il est difficile de donner une description précise de l'évolution de la grandeur physique observée, citons comme exemple le bruit de fond qui apparaît dans tous les équipements d'électroniques, ou encore le signal produit par la parole à la sortie d'un microphone. De tels signaux sont dits aléatoires et l'étude de leurs comportements temporels fait appel à la théorie des probabilités, ce qui nous amène à classer le signal numérique comme une suite de variables aléatoires.

II-3-Transformée de Fourier :

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

II-3-1-Propriétés de la transformée de Fourier d'un signal continu:

La transformée de Fourier d'un signal continu s'écrit sous la forme :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.6})$$

Le signal est dit stable ou à module intégrable si :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x_a(t)| dt < \infty \quad (\text{II.7})$$

Les opérations de multiplication ou de convolution s'échangent par transformation de Fourier. Le produit de convolution qui s'exprime par :

$$(x_a * y_a)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_a(u)y_a(t-u) du \quad (\text{II.8})$$

$$\text{devient par la transformée de Fourier : } X(F) \times Y(F) \quad (\text{II.9})$$

Pour les signaux à énergie finie, la formule de Parseval s'exprime par :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(f)|^2 df \quad (\text{II.10})$$

La fonction $|X_a(F)|^2$ est appelée spectre ou densité spectrale d'énergie (DSE). Elle représente la répartition de l'énergie du signal le long de l'axe des fréquences. De manière globale, on peut dire qu'un signal qui présente des variations brutales d'amplitude possède une énergie qui s'étale vers les hautes fréquences.

II-3-2-Propriétés de la transformée de Fourier à temps discret :

II-3-2-1-Définition :

La transformée de Fourier à temps discret effectue un produit scalaire entre un signal discret et l'exponentielle complexe pour chaque fréquence f . Le but de cette transformée est de rechercher les périodicités dans un signal de durée finie, pour mesurer leurs contributions via une représentation fréquentielle. L'observation d'un signal pendant une durée limitée revient à le multiplier par une fenêtre rectangulaire (Figure II.3) qui vaut 1 sur un intervalle et 0 sinon.

La TFTD a pour expression mathématique :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-j2\pi mk/N} \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{II.11})$$

Le rapport m/N s'appelle fréquence normalisée discrète par rapport à la fréquence d'échantillonnage. Ainsi la fréquence f est calculée via l'expression :

$$f = \frac{m}{N} f_e \quad (\text{II.12})$$

La TFTD est une fonction périodique de période 1 qui est généralement représentée sur l'intervalle $[-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}]$.

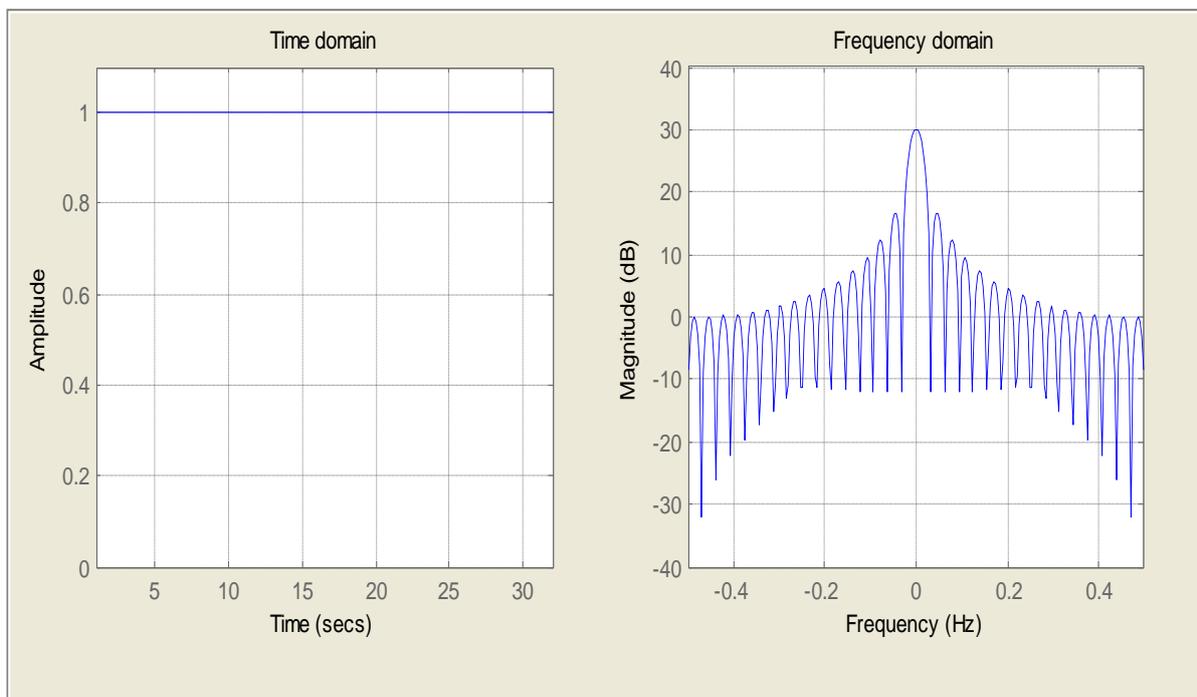


Figure II.3 : Représentation de la fenêtre rectangulaire dans le domaine temporel (à gauche) et dans le domaine fréquentiel (à droite).

La fonction $|X(f)|^2$ est le spectre associé à $|X(f)|$ lorsqu'on utilise l'échelle des décibels, en posant :

$$S_{dB}(f) = 20 \lg_{10}|X(f)| \quad (\text{II.13})$$

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

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) e^{j2\pi mk/N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{II.14})$$

II-3-2-2-Propriétés :

Les propriétés de la TFTD sont similaires à celles de la TFTC ; elles concernent beaucoup plus le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel.

*/ La linéarité :

$$\alpha x(n) + \beta y(n) \rightarrow \alpha X(f) + \beta Y(f) \quad (\text{II.15})$$

*/ Décalage en temps :

$$x(n - n_0) \rightarrow X(f) \exp(-2\pi j f n_0)$$

Cette propriété nous indique qu'un décalage en temps correspond à un déphasage linéaire dans le domaine fréquentiel.

*/ Décalage en fréquence :

$$x(n) \exp(2\pi j f_0 n) \rightarrow X(f - f_0) \quad (\text{II.16})$$

Inversement, un déphasage dans le domaine temporel correspond à un décalage dans le domaine fréquentiel.

*/ Conjugaison :

$$x^*(n) \rightarrow X^*(-f) \quad (\text{II.17})$$

Le conjugué d'un signal dans le domaine temporel correspond au conjugué de celui-ci dans le domaine des fréquences négatives.

*/Produit de convolution :

$$x(n) * y(n) \rightarrow X(f) \times Y(f) \quad (\text{II.18})$$

Le produit de convolution de deux signaux x et y dans le domaine temporel est un produit scalaire des signaux X et Y dans le domaine fréquentiel.

II-3-2-3-Cas particulier :

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

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

II-3-3-Théorème d'échantillonnage :

Lorsqu'une opération de numérisation précède tout traitement numérique des signaux, l'étude des conséquences de celle-ci est obligatoire pour connaître la nature du signal de sortie du point de vue reconstruction idéal.

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

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

La figure II.5 montre l'échantillonnage d'une sinusoïde de fréquence **50 Hz** et d'amplitude **A=4** avec les deux fréquences 80 Hz et 1 kHz. Nous constatons que le signal échantillonné avec la fréquence 1 kHz est mieux reconstruit que celui échantillonné avec la fréquence 80 Hz.

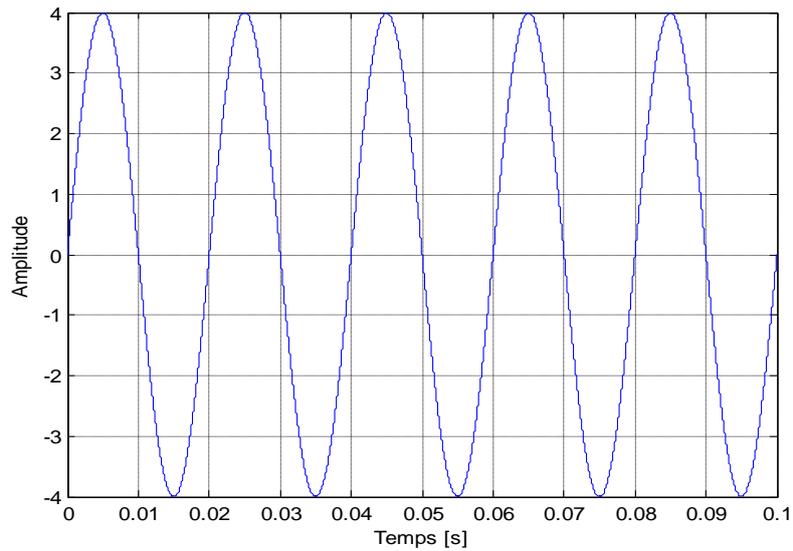


Figure II.4 : Allure d'une sinusoïde parfaite de fréquence 50 Hz et d'amplitude $A=4$.

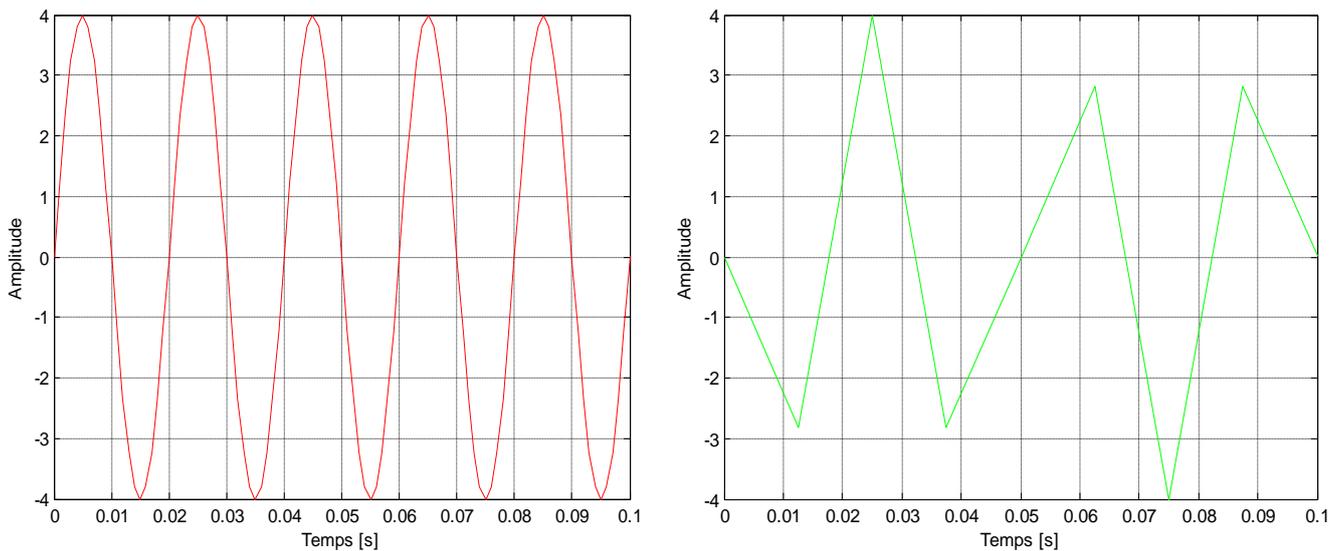


Figure II.5 : Allure de la sinusoïde échantillonnée pour $F_e=80\text{ Hz}$ (à droite en vert) et pour $F_e=1\text{ kHz}$ (à gauche en rouge).

II-3-4-Estimation de spectre :

De façon générale, l'estimation de spectre se propose d'évaluer différentes quantités ; dans notre cas cette quantité est la valeur de la densité $\mathbf{S}_{dB}(\mathbf{f})$ à partir de la réalisation d'une séquence de longueur N du signal considéré.

La représentation spectrale nous renseigne sur la répartition de l'énergie de chaque composante fréquentielle du signal, qu'il soit discret ou continu. Cependant, il est obligatoire de séparer l'analyse spectrale des signaux déterministes de celle effectuée pour les signaux aléatoires, car les techniques utilisées pour ces deux types de signaux sont totalement différentes.

II-3-4-1-Périodogramme :

L'estimation du spectre est faite grâce à une fonction aléatoire appelée périodogramme qui est défini par l'expression mathématique :

$$I_N(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \exp(-2\pi jfn) \right| \quad (\text{II.19})$$

A première vue le périodogramme semble être un bon estimateur de la densité spectrale $\mathbf{S}_{dB}(\mathbf{f})$ car il l'est asymptotiquement ; ceci signifie que pour N suffisamment grand le périodogramme fluctue autour de la vraie valeur du spectre et l'amplitude des fluctuations ne tend pas vers une valeur proche de 0. La solution serait d'en moyennner plusieurs sur un temps assez long puisqu'ils fluctuent autour de la vraie densité spectrale de puissance, et que l'amplitude des fluctuations ne diminue pas pour un grand nombre d'échantillons N.

II-3-4-2-Périodogramme moyenné :

L'avantage principal de cet estimateur est de réduire la variance à un facteur égal au nombre de périodogrammes calculés. Le processus de calcul débute par la segmentation du nombre d'échantillons N en L sous intervalles disjoints de longueur M afin de calculer les L périodogrammes, puis on effectue la moyenne des L périodogrammes. Cette façon de procéder aboutit à l'expression suivante :

$$I_m(f) = \frac{1}{L} \sum_{s=0}^{L-1} \left(\frac{1}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} X(sM+m) \exp(-2\pi jfm) \right|^2 \right) \quad (\text{II.20})$$

En pratique le nombre d'échantillons $N = L \cdot M$, ce qui signifie que l'augmentation de L s'accompagne d'une diminution de M et donc de la résolution spectrale ; toutefois cette opération réduit considérablement l'amplitude des fluctuations.

II-3-4-3-Periodogramme de Welch :

La méthode de Welch présente un intérêt particulier dans la représentation spectrale puisque son périodogramme est caractérisé par une variance très réduite pour n'importe quel nombre d'échantillons N . La méthode consiste à calculer plusieurs périodogrammes pour un unique signal en utilisant une fenêtre de taille plus ou moins inférieure à celle du signal. Elle permet d'avoir un taux de recouvrement qui peut aller de 50 % à 75 %.

II-3-5-Utilisation des fenêtres :

Dans le but d'améliorer l'estimation spectrale du signal échantillonné, on a souvent recours aux fenêtres de lissage qui permettent de réduire d'avantage l'amplitude des ondulations. Cette réduction est effectuée en pré-multipliant les données du signal échantillonné $\mathbf{x}(\mathbf{n})$ par une fonction de fenêtrage $\mathbf{w}(\mathbf{n})$. La résolution fréquentielle est inversement proportionnelle au nombre d'échantillons et dépend de la fenêtre utilisée.

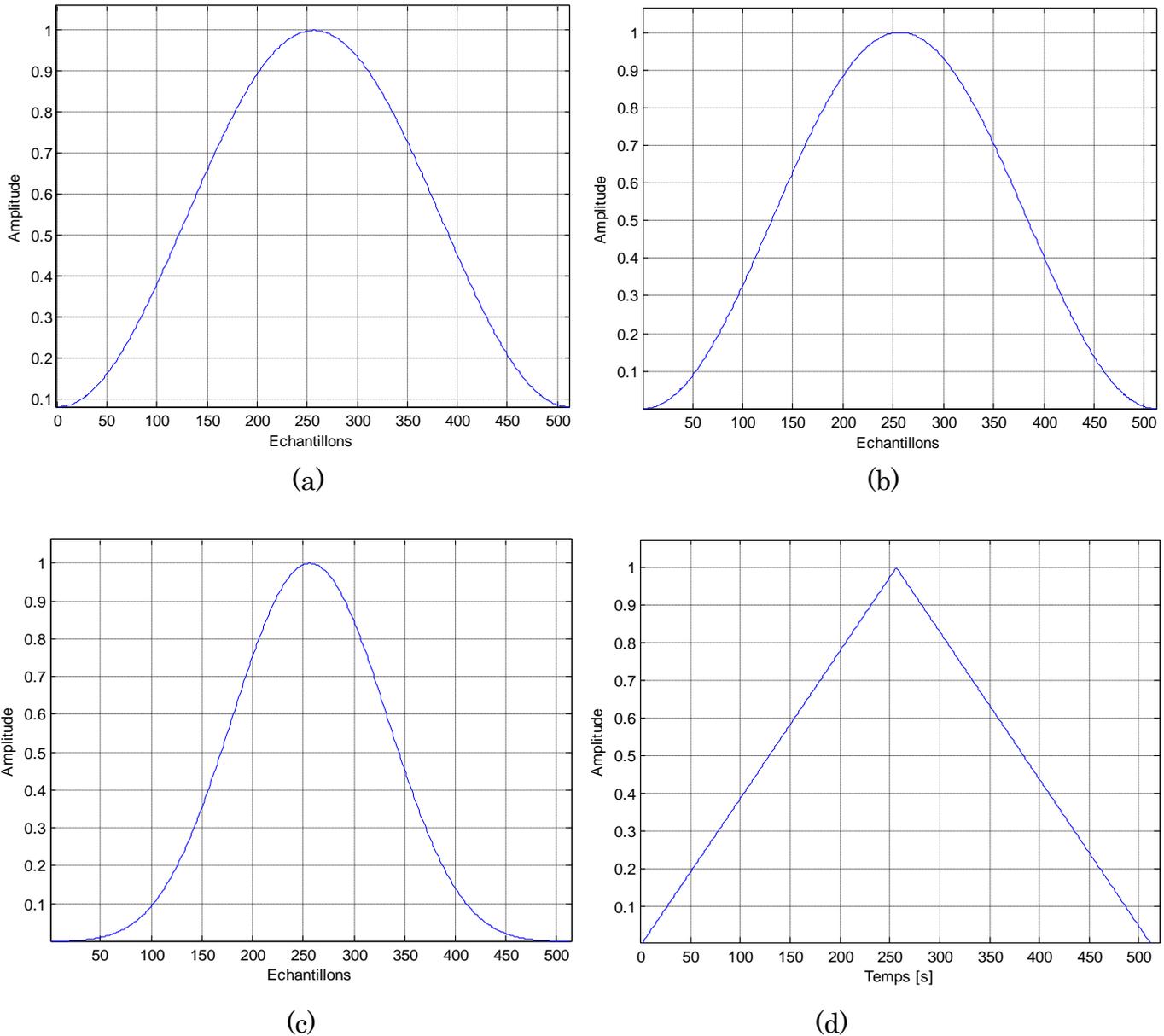


Figure II.6 : Différents types de fenêtres ; (a) Fenêtre de Hamming, (b) Fenêtre de Hanning, (c) Fenêtre de Blackman, (d) Fenêtre de Bartlett.

Les effets du fenêtrage sont pris en compte dans l'estimation comme suit :

$$I_N(f) = \frac{1}{NU} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) e^{-j2\pi fn} \right|^2 \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Tel que : } \tilde{x}(n) = w(n)x(n) \text{ et } U = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \quad (\text{II.22})$$

U représente la correction du gain cohérente pour la fenêtre $w(n)$.

II-3-6-Conclusion :

Dans cette première partie, nous avons essayé de présenter de manière brève l'environnement du traitement du signal en traitant les principales idées sur la transformée de Fourier à temps continu et à temps discret.

Il paraît évident qu'il faut tout d'abord connaître la nature du signal acquis ainsi que ses propriétés pour entamer une bonne analyse ; pour cela le théorème d'échantillonnage constitue la base de toute parfaite reconstruction du signal réel.

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

L'amplitude des fluctuations observées sur le spectre est atténuée avec l'utilisation des fenêtres de lissage qui fournissent une meilleure résolution en fréquence. Toutefois, le choix de ces fenêtres dépend du type d'analyse effectuée sur le signal pour en extraire les principales composantes fréquentielles qui caractérisent le phénomène étudié.

II-4- Transformée en ondelette :

II-4-1-Historique [71]:

En 1807, Joseph Fourier a développé une méthode pour la décomposition et la représentation d'un signal dans le domaine fréquentiel qui est basée sur les fonctions trigonométriques ; il était à l'origine du développement de la théorie des ondelettes grâce à ses travaux accomplis en mathématique.

Le mot **ondelette** a été employé pour la première fois par Alfred Haar en 1909 dans sa thèse pour l'obtention du PhD. En 1930, Paul Levy a performé l'étude des ondelettes en introduisant le concept de variation d'échelle en utilisant la fonction de Haar qui a démontré sa supériorité face l'analyse de Fourier.

Les méthodes de décomposition et de reconstruction d'un signal par les transformées en ondelettes ont été introduites par *Jean Morlet* et *Alex Grossman* en 1981. Stéphane Mallat et Yves Meyer ont développé l'analyse multi-résolution en 1986 qui a permis à plusieurs scientifiques et chercheurs de construire leur propres familles d'ondelettes.

En 1998, Ingrid Daubechies a utilisé l'analyse multi-résolution pour la construction de sa propre famille d'ondelettes qui, actuellement connaît de nombreuses applications dans le domaine du traitement du signal.

II-4-2-Intérêt du diagnostic par les ondelettes [72] :

Pour des signaux de nature non-stationnaire, la transformée de Fourier semble inapte à fournir une représentation fréquentielle locale satisfaisante à cause du compromis temps-fréquence (Figure II.7) imposé par le principe d'incertitude de Heisenberg. L'analyse par la technique des ondelettes fournit de meilleurs résultats pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points de discontinuités ou les zones déformées du signal, qui sont souvent de hautes fréquences.

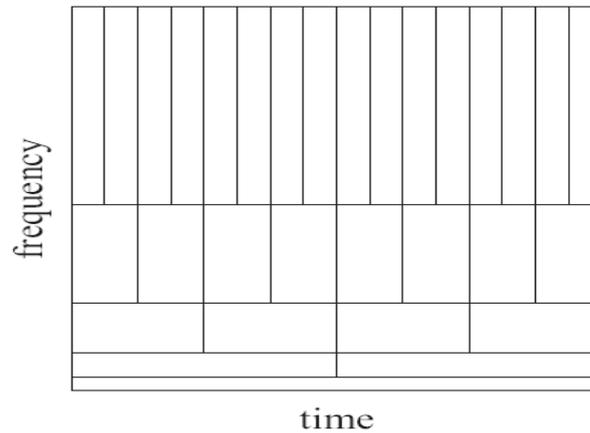


Figure II.7: *Représentation de la multi-résolution temps-fréquence pour la transformée de Fourier Rapide.*

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

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

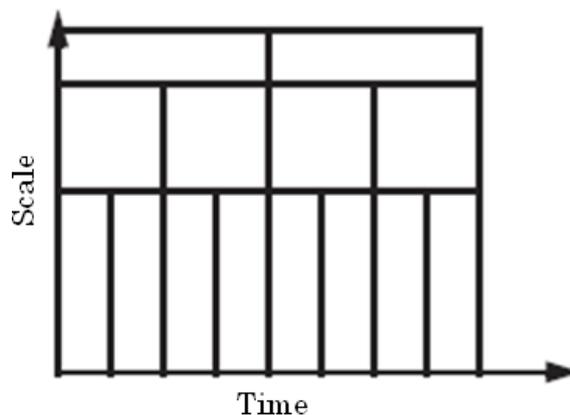


Figure II.8: *Représentation de la multi-résolution temps-échelle pour l'analyse par les ondelettes.*

II-4-3-Transformée en ondelette continue (CWT):

La transformée en ondelette continue (CWT) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle en gardant le même nombre d'oscillations. Fondamentalement, la transformée en ondelette se calcule de la même manière que la transformée de Fourier fenêtrée, autrement dit on regarde la corrélation au sens du produit scalaire sur $L^2(\mathbb{R})$ entre le signal à analyser et la famille de fonction $[\Psi_{a,b}(t), a \in \mathbb{R}_+, b \in \mathbb{R}]$.

II-4-3-1-Définitions [73,74] :

II-4-3-1-1-Concepts mathématiques pour les ondelettes :

Une ondelette est une onde qui oscille à fréquence constante et qui s'annule au bout d'un instant donné. En comparant avec la transformée de Fourier, la fonction analysante pour la transformée en ondelette peut être choisie en toute liberté contrairement à la TF qui se restreint uniquement aux fonctions sinusoïdales.

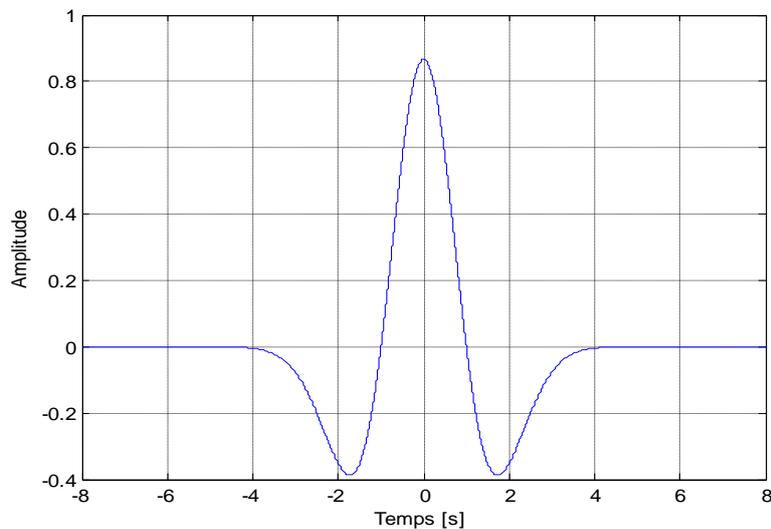


Figure II.9 : Exemple de l'ondelette chapeau mexicain.

Les ondelettes ont une expression de la forme :

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (\text{II.23})$$

Ψ représente l'ondelette mère et les paramètres \mathbf{u} et \mathbf{s} désignent respectivement l'échelle et la translation de l'ondelette. La normalisation par le facteur $\frac{1}{\sqrt{s}}$ engendre la conservation d'énergie de l'ondelette mère durant son oscillation temporelle.

Les ondelettes sont des fonctions qui remplissent les conditions suivantes :

- Une ondelette doit être à énergie finie :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty. \quad (\text{II.24})$$

- Dans le cas où $\hat{\Psi}(f)$ est la transformée de Fourier de l'ondelette $\psi(t)$ on obtient :

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty \quad (\text{II.25})$$

Cette condition signifie que la moyenne de l'ondelette $\psi(t)$ doit être égale à zéro et que le spectre fréquentiel doit s'annuler pour garantir une convergence de l'intégrale en zéro, en d'autres termes :

$$\hat{\psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{II.26})$$

La transformée en ondelette continue de la fonction \mathbf{f} pour l'échelle \mathbf{s} et la position \mathbf{u} , est calculée en associant la fréquence \mathbf{f}_0 à une ondelette telle que :

$$W f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (\text{II.27})$$

La formule de **Fourier-Parseval** appliquée à l'équation (II.27) nous donne :

$$W f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{u,s}^*(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{\psi}_{u,s}(\omega) d\omega \quad (\text{II.28})$$

Les coefficients d'ondelette $W f(\mathbf{u}, \mathbf{s})$ dépendent ainsi des valeurs de $\mathbf{f}(t)$ et $\hat{f}(\omega)$ dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de $\Psi_{\mathbf{u},\mathbf{s}}(t)$ et $\hat{\Psi}_{\mathbf{u},\mathbf{s}}(\omega)$ est

concentrée. Ainsi, des signaux variables dans le temps sont détectés à partir des coefficients et de l'échelle des coefficients.

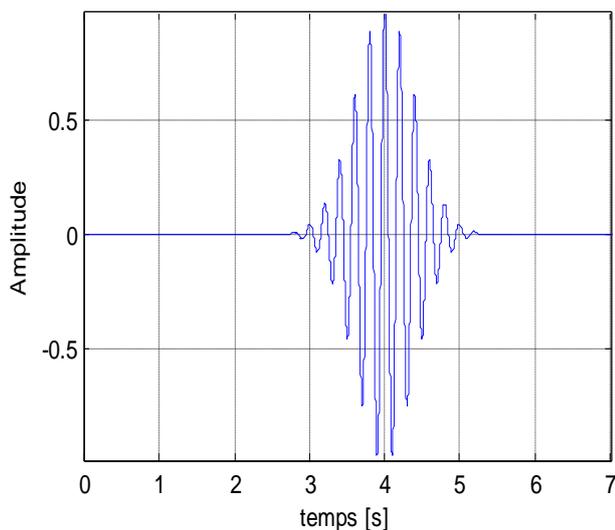
La formule de Fourier-Parseval nous donne une interprétation plus physique des coefficients de $Wf(u, s)$ qui peuvent être perçus comme la série temporelle d'un banc de filtres qui se déduit d'un filtre unique par le changement d'échelle. Cela confère à la CWT la propriété de travailler à une échelle logarithmique vu que la largeur de bande relative $\Delta f/f$ est invariante dans le temps. Cette propriété coïncide avec ce que perçoivent l'oreille et l'œil humains qui eux aussi travaillent à la même échelle.

II-4-3-1-2-Ondelette de Morlet :

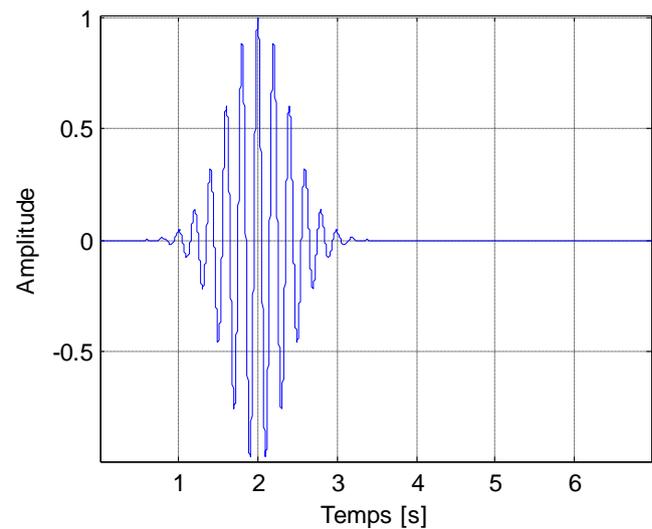
Pour notre analyse temps-échelle, nous utilisons l'ondelette de Morlet qui avec son enveloppe de forme gaussienne, minimise le produit des résolutions temporelle et fréquentielle, et permet par conséquent d'optimiser les résultats [75]. L'échelle s est déterminée par la fréquence centrale f_c qui correspond à la fréquence d'oscillation de l'ondelette.

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

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-\pi \left(\frac{t-u}{s}\right)^2} * e^{-10*j*\pi*\left(\frac{t-u}{s}\right)} \quad (\text{II.29})$$



(a)



(b)

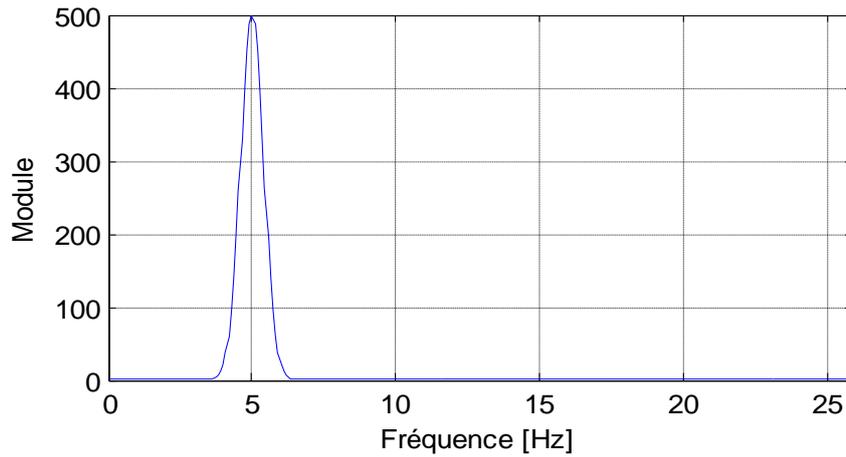


Figure II.10 : Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la translation pour $s=1$: (a) $u=4$, (b) $u=2$.

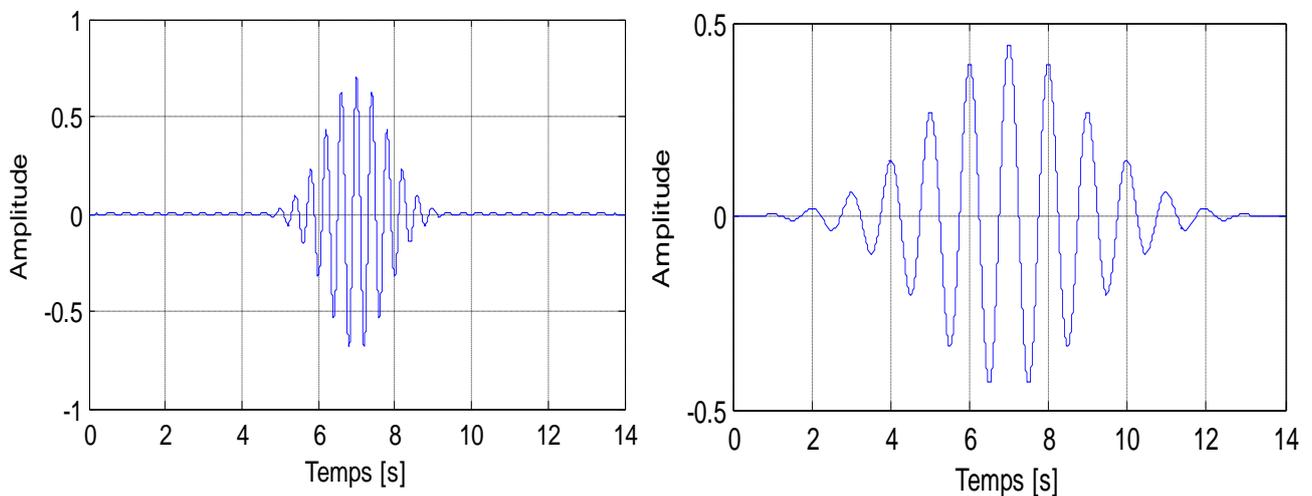


Figure II.11 : Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).

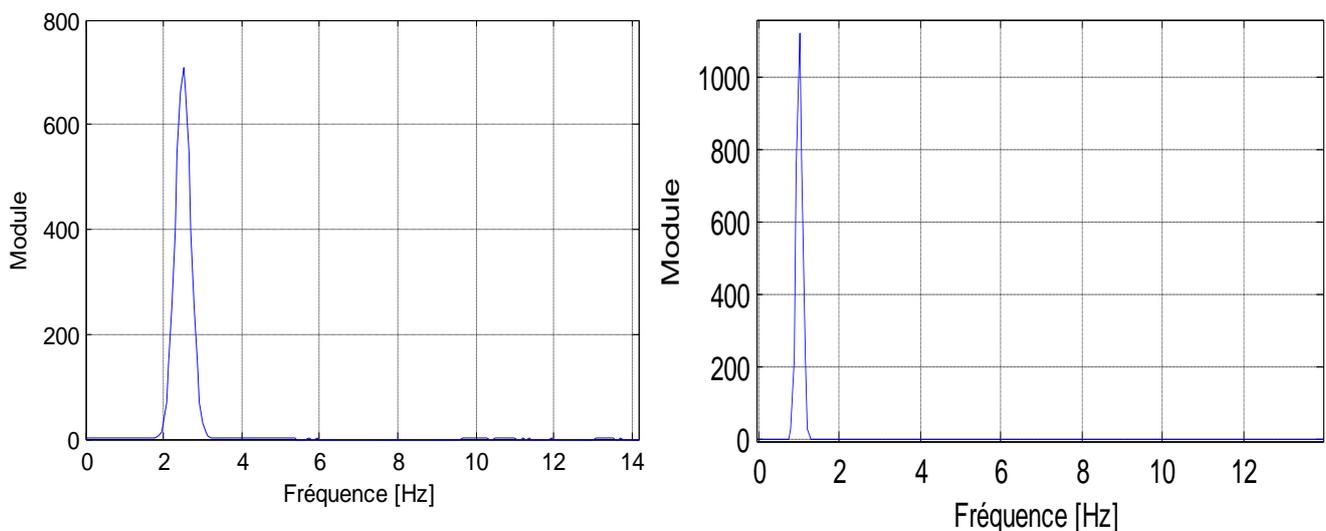


Figure II.12 : Représentation fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).

II-4-3-2-Scalogramme :

Le scalogramme d'un signal est défini par :

$$P_{Wf}(u, \xi) = |Wf(u, s)|^2 = \left| Wf\left(u, \frac{\eta}{\xi}\right) \right|^2 \quad (\text{II.30})$$

La normalisation de celui-ci revient à multiplier l'expression par un facteur égal à ϵ/η . η est le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire qui a une énergie concentrée dans un intervalle positif centré en η/s dont la taille est donnée par $1/s$. Dans le domaine temps-fréquence de l'analyse par les ondelettes, un atome d'ondelette est représenté par le rectangle de Heisenberg de largeur temporelle $\mathbf{s} \cdot \sigma_t$ et de largeur fréquentielle $1/s \cdot \sigma_w$; σ_t et σ_w correspondent aux dimensions du rectangle de Heisenberg pour l'ondelette mère; ces dernières restent constantes pour toute la transformée car $\mathbf{S}_{\text{rect}} = \sigma_w \cdot \sigma_t$ [76].

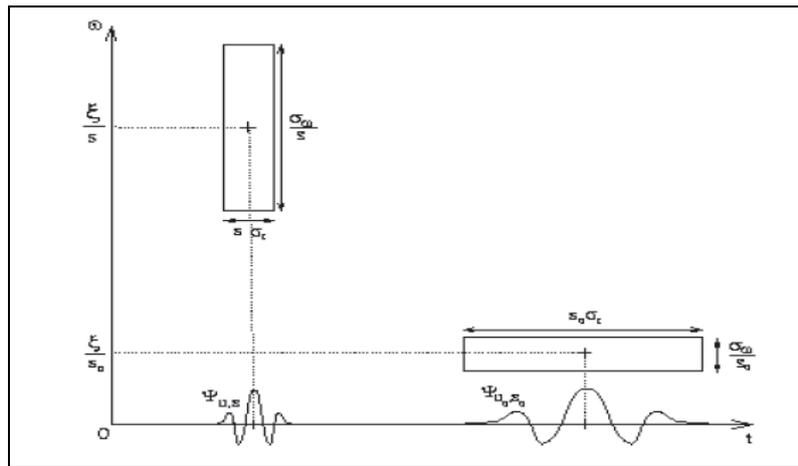


Figure II.13 : *Atome de la Wavelet Transform.*

II-4-3-3-Calcul des coefficients de la CWT [77]:

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

- Dès le départ, on compare l'ondelette à une portion du signal.
- On calcul le coefficient \mathbf{W} qui étudie le degré de similitude entre la portion du signal et l'ondelette analysante; celles-ci sont similaires lorsque la valeur numérique du coefficient \mathbf{W} est élevée. Plus précisément, lorsque l'énergie du

signal et celle de l'ondelette sont relativement proches, le coefficient W peut être interprété comme un facteur de corrélation.

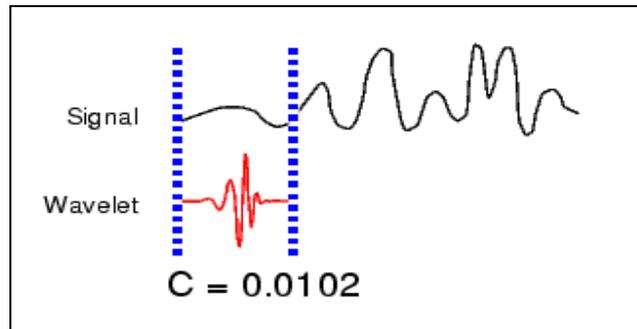


Figure II.14 : Comparaison de l'ondelette à une portion du signal.

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

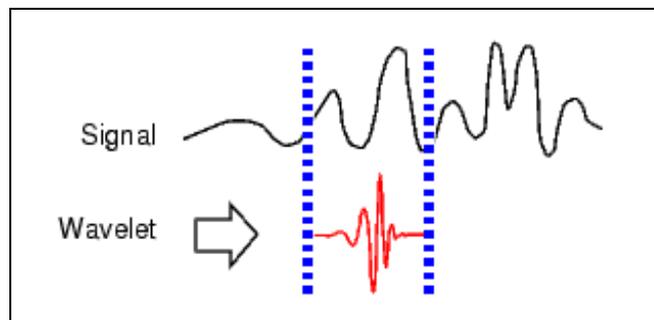


Figure II.15 : Balayage du signal par l'ondelette.

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

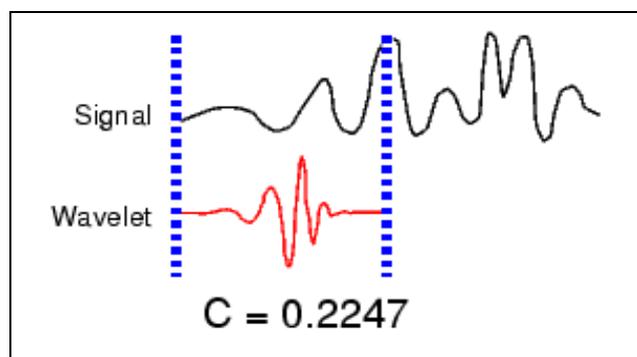


Figure II.16 : Dilatation de l'ondelette et balayage du signal.

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

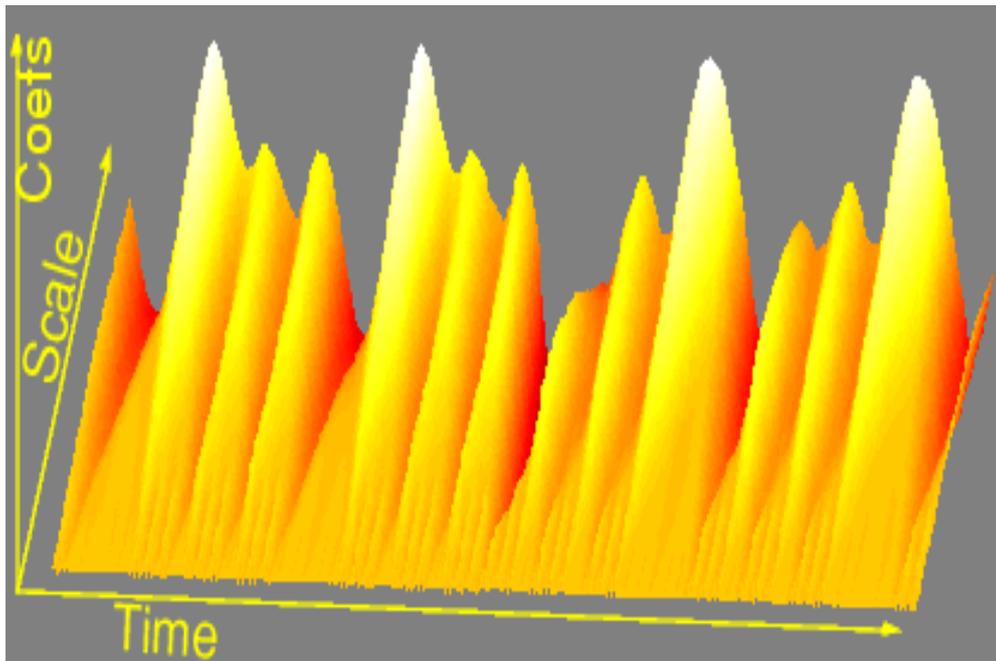


Figure II.17 : Représentation des coefficients obtenus après calcul régressif.

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

$$f = \frac{f_c}{s * \Delta t} \quad (\text{II.31})$$

Δt : est la période d'échantillonnage du signal.

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

s : est l'échelle.

f : est la fréquence instantanée.

II-4-4-Transformée en ondelette discrète (DWT) [44]:

II-4-4-1-Introduction :

La transformée en ondelette discrète est basée sur la décomposition d'un signal en sous-bandes de fréquences ; elle permet un gain de calcul et une facilité d'implémentation grâce à l'analyse multi-résolution[78].

II-4-4-2-Expression mathématique [79]:

La transformée en ondelette discrète a pour expression mathématique :

$$DWT_{\psi} f(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_o^m}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{k - nb_o a_o^m}{a_o^m}\right) \quad (\text{II.32})$$

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

II-4-4-3-Algorithmes de décomposition pyramidale :

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

Comme montré dans la figure II.18, le résultat de la DWT est constitué de plusieurs détails et d'une approximation pour un niveau de décomposition donné. Ils sont représentés par C_{aN}, C_{dN}, C_{dN-1} jusqu'à C_{d1} .

N est le niveau de décomposition final.

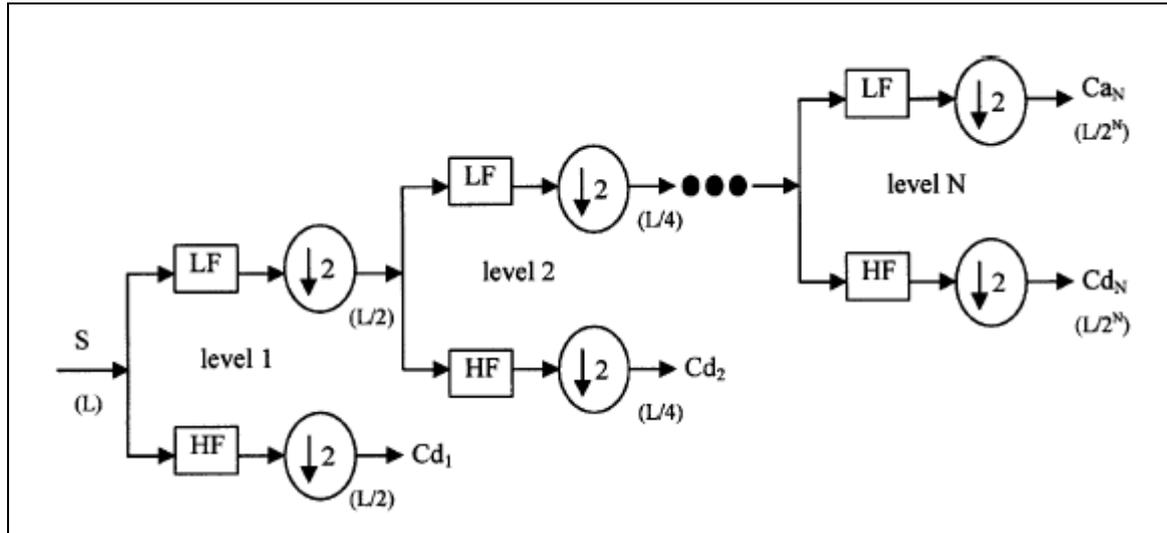


Figure II.18 : Chaîne de décomposition de la DWT incluant le filtrage et le sous-échantillonnage.

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

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

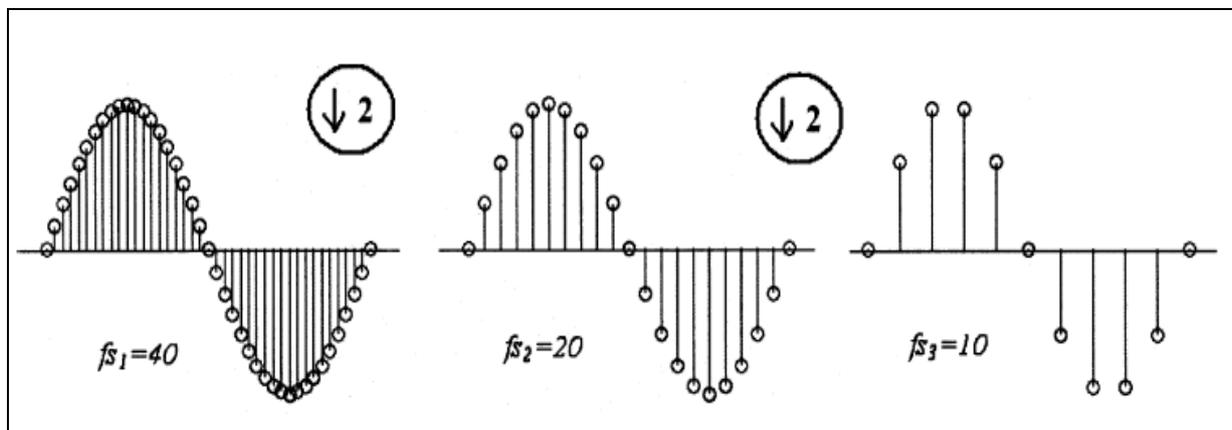


Figure II.19 : Effet du sous-échantillonnage.

II-4-4-4-Décomposition en bandes de fréquences :

Comme il a été décrit précédemment, effectuer une DWT sur un signal est équivalent à un filtrage par une paire de filtres : un passe-bas $H(Z)$ et l'autre passe-haut $G(Z)$. Les filtres $H(Z)$ et $G(Z)$ sont appelés filtres miroirs en quadrature (QMF) à cause de leurs réponses en fréquence qui présente un point d'intersection de $\pi/2$ tel qu'illustré sur la figure II.20.

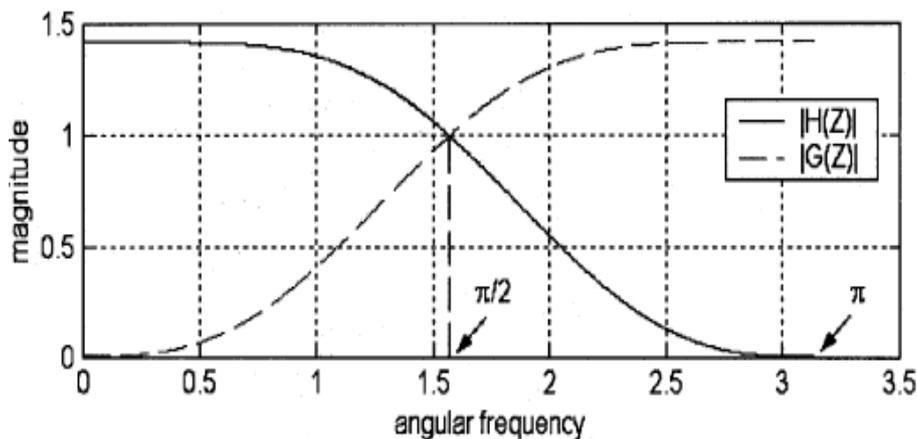


Figure II.20 : Réponse en fréquence des filtres miroirs en quadrature.

L'allure des FMQ est déterminée d'après l'ondelette mère qui leur est associée. Prenons par exemple le cas des deux ondelettes de Daubechies 3 et 12, on constate que l'allure du filtre passe-bas de l'ondelette **db12** est régulière à partir de $\omega = 0$ puis devient tombante pour $\omega = \pi/2$ comparativement à l'ondelette **db3** qui se comporte différemment. Le filtre passe-haut est régulier pour $\omega = \pi$ et montant à partir de $\omega = \pi/2$ pour les deux ondelettes.

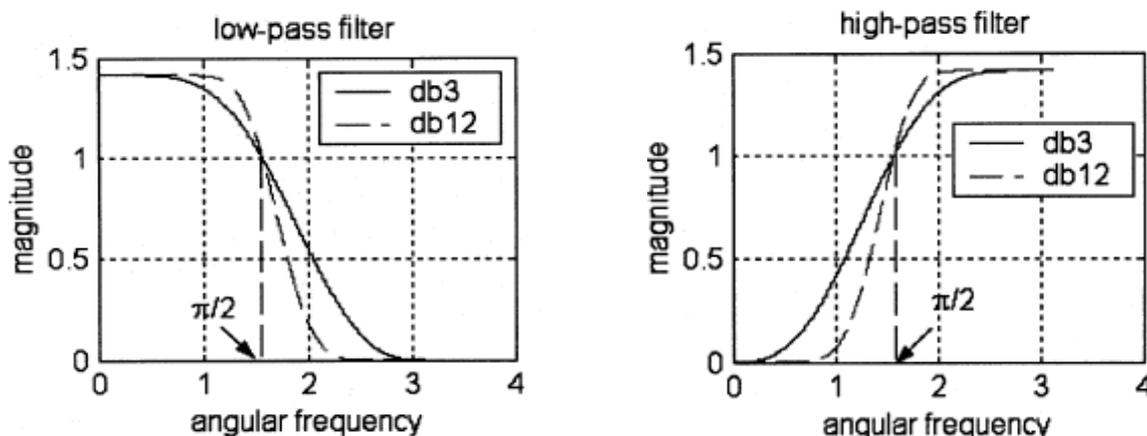


Figure II.21 : Réponse fréquentielle des filtres passe-bas (à gauche) et passe-haut (à droite) pour les ondelettes db12 et db3.

D'après la figure ci-dessus, la fréquence angulaire maximale qui correspond à la moitié de la fréquence d'échantillonnage est Π . Pour une fréquence d'échantillonnage donnée, la fréquence angulaire peut être convertie en Hertz. Par exemple, si la fréquence d'échantillonnage est $F_s=10$ kHz, la plus grande fréquence dans la figure 1 correspondant à Π est $F_s/2 = 5$ kHz et la fréquence de coupure correspond à $F_s/4= 2.5$ kHz. Pour le second niveau de décomposition, la fréquence de coupure devient égale à $F_s/8 = 1250$ Hz. Pour les niveaux de décomposition suivants, la fréquence de coupure est divisée par deux à chaque fois.

Si maintenant on considère que le recouvrement n'a pas lieu, la décomposition en ondelettes d'un signal peut être interprétée comme une décomposition par bandes de fréquences séparées l'une de l'autre. Ceci signifie que la bande des fréquences du filtre passe-haut (*détails*) pour un niveau M est comprise entre $(1/2^{M+1}) * F_s$ et $(1/2^M) * F_s$ alors que pour un filtre passe-bas (*approximations*), la bande des fréquences est comprise entre 0 et $(1/2^{N+1}) * F_s$ avec $1 < M < N$, N étant le niveau de décomposition maximal.

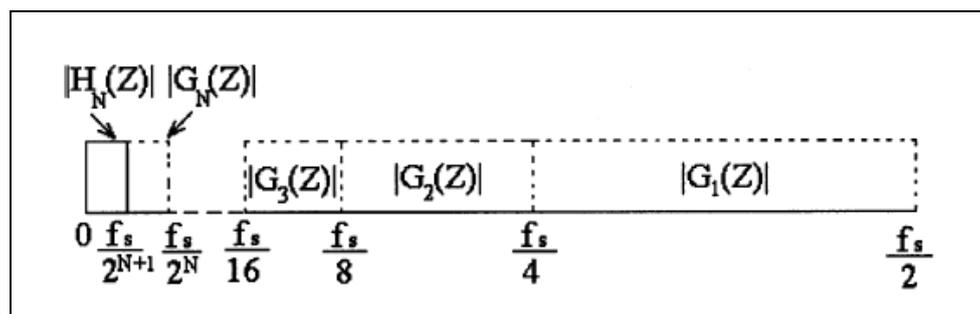


Figure II.22 : Bandes des fréquences pour les filtres FMQ à plusieurs niveaux.

II-4-4-5- Niveau maximal de décomposition:

Avant de décomposer un signal en approximations et détails, il y a lieu de considérer un niveau maximal pour lequel on récupérera toutes les informations fréquentielles et temporelles contenues dans celui-ci.

Pour la DWT, le nombre maximal pour lequel un signal est décomposé est obtenu par la relation :

$$J_{\text{ful}} = \text{fix}(\log_2(N)) \quad (\text{II.33})$$

N est la longueur du signal échantillonné et la fonction **fix** donne le nombre entier le plus proche de la valeur obtenue après calcul du logarithme à base 2 de N.

Cependant, lorsque la Wavelet Toolbox est employée sous MATLAB® pour le traitement du signal, la taille de celui-ci notée N ne doit pas être inférieure à celle du filtre de l'ondelette considérée notée N_ω . A ce moment, le nombre de décomposition maximal du signal considéré est donné par :

$$\mathbf{J}_{\max} = \mathbf{fix} (\log_2(N/N_\omega - 1)) \quad (\text{II.34})$$

La décomposition d'un signal au delà de \mathbf{J}_{\max} est sans intérêt et constitue une perte de temps.

II-4-4-6-Choix de l'ondelette analysante :

Le choix de l'ondelette analysante joue un rôle primordial pour la compréhension des phénomènes transitoires comme les impulsions de décharges électriques observées sur le courant de fuite pour un état de pollution d'isolateurs sous des conditions humides. Il est cependant connu que les ondelettes **db4** et **db6** sont plus appropriées pour la détection des perturbations de courtes durées alors que les ondelettes **db8** et **db10** sont adéquates pour l'étude des perturbations de relatives longues durées [80].

Dans notre travail, nous choisissons d'utiliser l'ondelette de Daubechies 4 pour décomposer le signal du courant de fuite afin d'en identifier les transitions pour la pollution non-uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [81,82].

L'ondelette mère complexe de Daubechies a comme expression mathématique :

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} * (e^{j\omega t} - e^{-\frac{\omega^2}{2}}) \quad (\text{II.35})$$

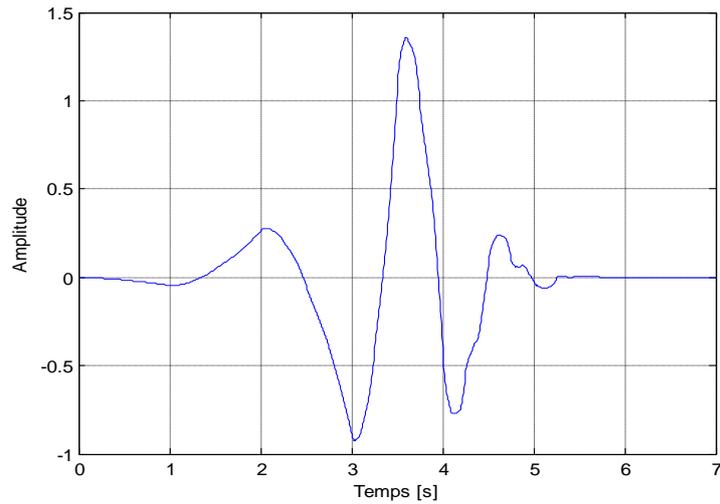


Figure II.23 : Représentation de l'ondelette de Daubechies 4.

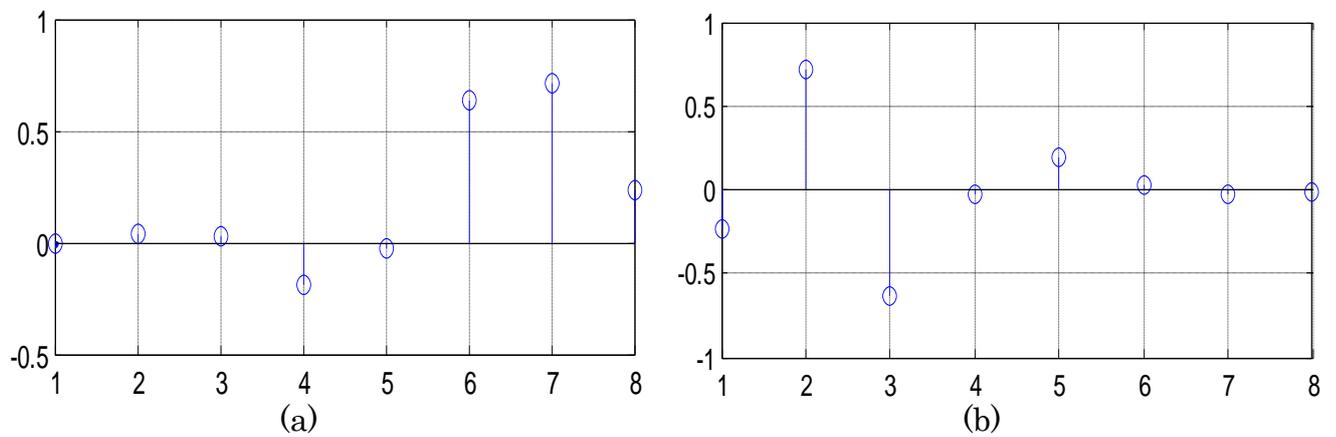


Figure II.24 : Représentation des filtres de décomposition de l'ondelette de Daubechies 4 : (a) filtre passe-bas, (b) filtre passe-haut.

II-4-5-Conclusion :

Dans cette partie concernant les ondelettes, nous avons présenté de manière succincte la transformée en ondelette continue (CWT) et la transformée en ondelette discrète (DWT) à cause des propriétés dont chacune d'elle dispose pour le traitement local des signaux ; celui-ci a pour objectif la détection des points de discontinuité en utilisant la CWT ainsi que les différentes perturbations de hautes fréquences par la DWT.

L'ondelette de Morlet est intéressante 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.

L'ondelette de Daubechies 4 est choisie pour appliquer la DWT sur le signal du courant de fuite qui affiche des pics de hautes fréquences à partir d'un certain niveau de tension. Cette ondelette semble adéquate pour la détermination des bandes fréquentielles qui caractérisent les perturbations de hautes fréquences via l'analyse multi-résolution. A cet effet, la détermination du niveau de décomposition est importante pour récupérer de bonnes informations sans trop de calculs.

Chapitre III :

Techniques expérimentales.

III-1-Introduction :

Dans notre travail, nous étudions le comportement du modèle plan de l'isolateur 1512 L dans le cas de la pollution uniforme et de la pollution non-uniforme. Les expériences concernant les deux configurations se sont déroulées au laboratoire de Haute Tension de l'ENSP.

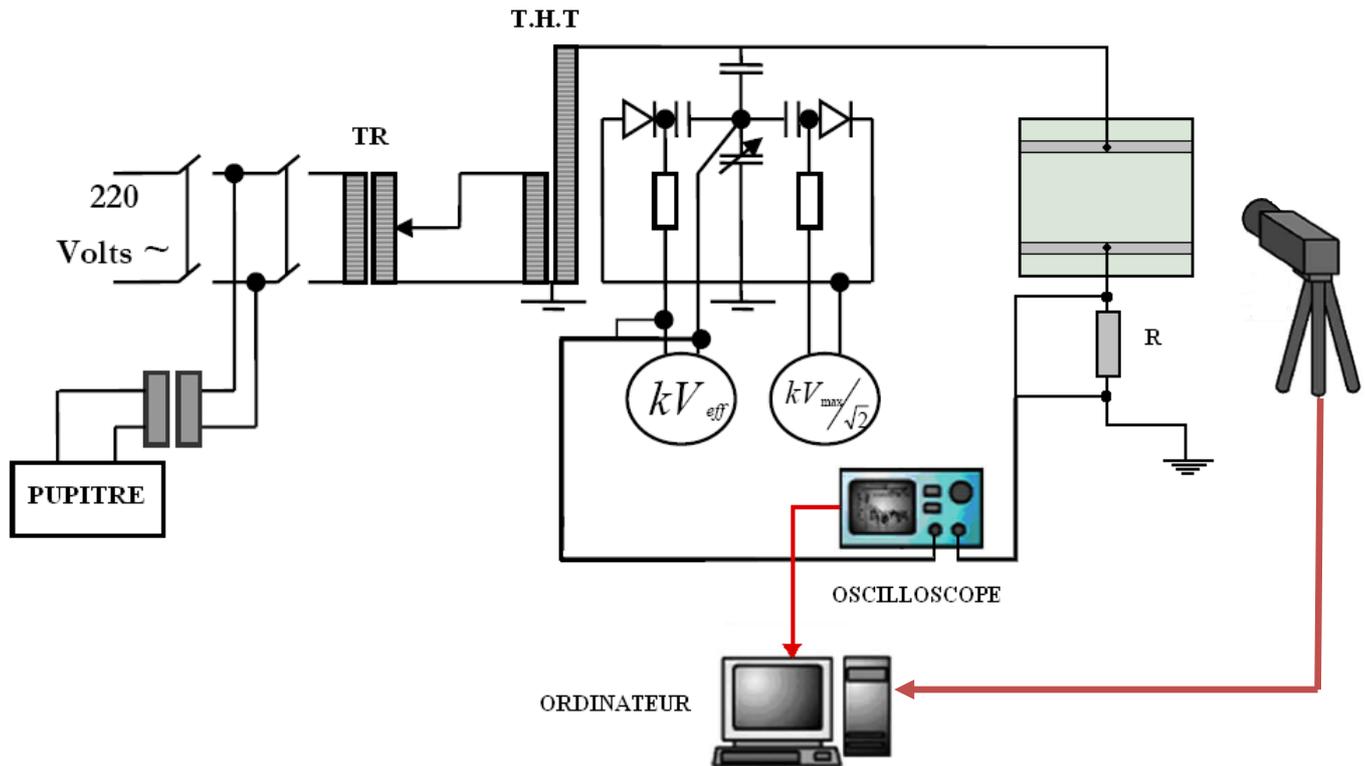
Les essais effectués pour la pollution uniforme nous ont permis de décrire l'évolution de la tension de contournement, du courant de fuite et des décharges parallèles à la surface du modèle plan pour différentes conductivités et différents niveaux de tension appliqués.

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

III-2-Dispositif expérimental :

Le laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique est muni d'une station d'essai à fréquence industrielle de marque **HEAFELY** composé par les équipements suivants :

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

Figure III.1 : *Dispositif expérimental.*

III-3-Préparation et caractéristiques de l'objet d'essai :

III-3-1-Description du modèle étudié :

Les essais sont effectués sur un modèle plan simulant l'isolateur 1512 L. Deux électrodes sont posées sur deux bandes conductrices en aluminium qui sont découpées ($500 \times 30 \text{ mm}^2$) de manière à ne pas avoir de pointes à leurs extrémités. A l'aide du gazoil, celles-ci sont parfaitement collées contre la paroi du modèle plan pour éviter les couches d'air qui ont tendance à se former sous ces bandes, pouvant engendrer l'apparition de micro-décharges qui risquent de nuire à la qualité des mesures de la tension de contournement et du courant de fuite pendant les expériences. Le modèle est élevé à une hauteur de 175 cm afin de limiter l'effet des capacités parasites qui peuvent altérer la mesure de la tension appliquée et du courant de fuite.

Le nettoyage du plan est tout d'abord fait avec de l'eau du robinet ; puis il est séché avec des serviettes en papier pour éliminer le maximum d'impuretés déposées. Un deuxième nettoyage est effectué à l'aide d'un bout de coton imbibé d'alcool chirurgical à 70° afin d'assurer une propreté quasi-totale du modèle

plan. Cette méthode de nettoyage est adoptée pour le cas de la pollution uniforme et la pollution non-uniforme.

III-3-2-Objet d'essai :

L'isolateur réel 1512 L ainsi que son modèle étudié au laboratoire de haute tension sont montrés aux figures III.3 et III.2.

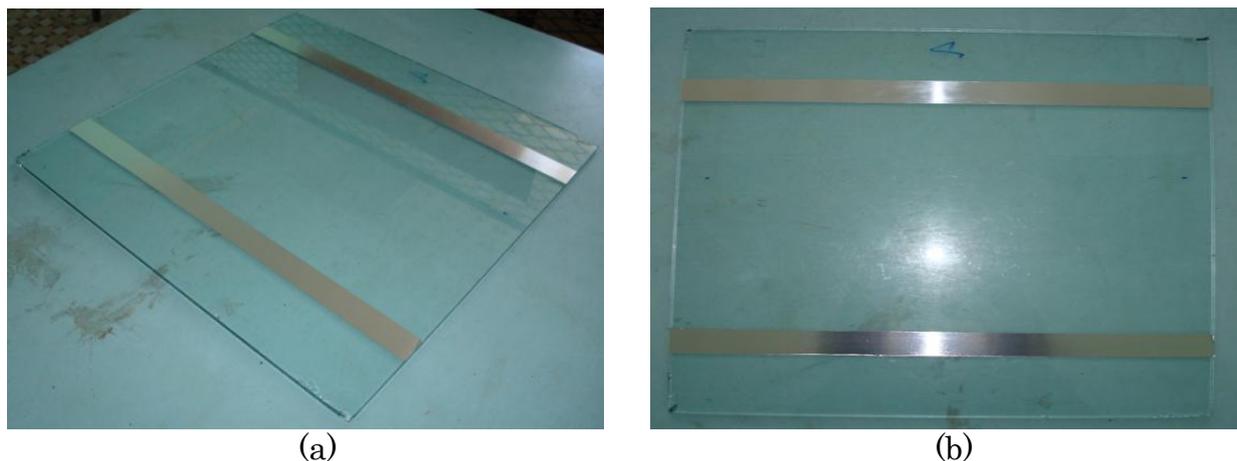


Figure III.2 : Modèle plan étudié : (a) vue latérale, (b) vue de haut.

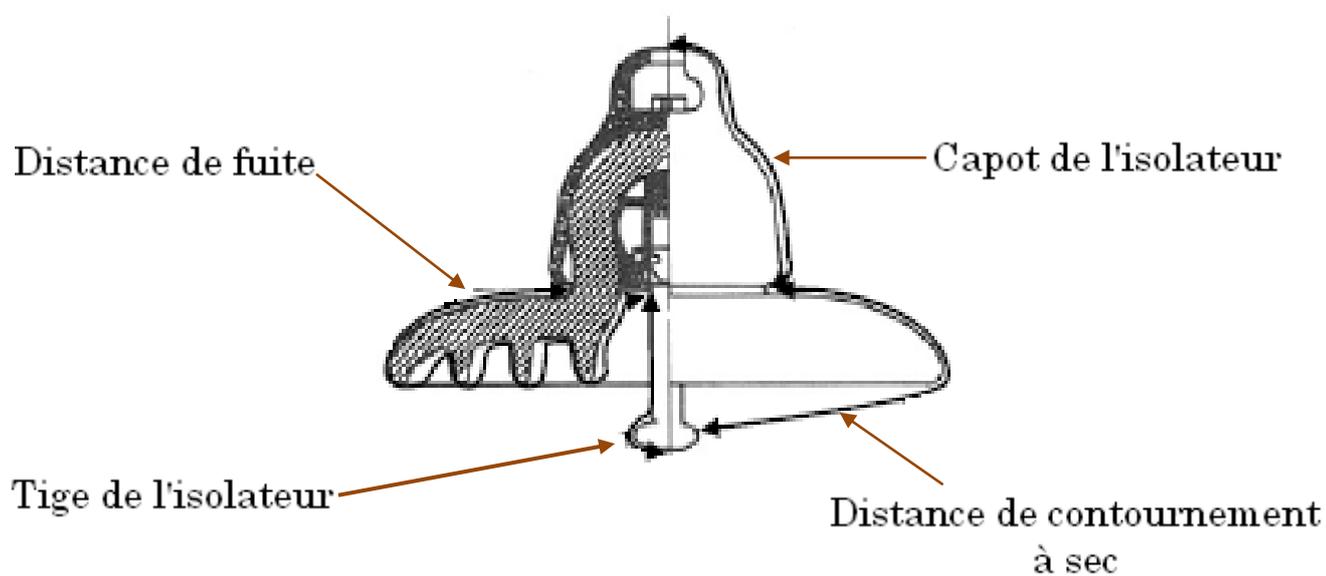


Figure III.3 : Profil de l'isolateur réel (1512 L).

Les principales dimensions du modèle plan étudié et de l'isolateur réel 1512 L sont données dans les tableaux III.1 et III.2 après avoir mesuré les différentes grandeurs à l'aide d'un mètre ruban.

Grandeur	Longueur (mm)
Longueur de la plaque	500
Largeur de la plaque	500
Epaisseur de la plaque	5
Distance inter-électrode	292

Tableau III.1 : *Dimensions du modèle plan étudié.*

Grandeur	Longueur (mm)
Capot de l'isolateur	295
Distance de contournement à sec	220
Ligne de fuite	292
Profil de la tige	128

Tableau III.2 : *Dimensions de l'isolateur réel 1512 L.*

III-4-Préparation des solutions polluantes :

Les solutions polluantes ont été préparées tantôt au laboratoire du Génie de l'Environnement tantôt au laboratoire du Génie Chimique. Celles-ci sont composées de différentes quantités de NaCl mélangées à de l'eau distillée, afin d'obtenir les conductivités volumiques suivantes : 0.01 mS/cm, 0.19 mS/cm, 0.71 mS/cm, 1.2 mS/cm et 10.1 mS/cm. Le choix de ces conductivités est fait pour avoir une bonne visibilité concernant l'élongation des décharges parallèles et aussi pour une bonne étude de la tension de contournement et du courant de fuite pour le cas de la pollution uniforme.

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

III-5-Méthode de pulvérisation :

La méthode de pulvérisation a été choisie pour la pollution artificielle de la surface du modèle plan pour le cas uniforme et le cas non-uniforme. La longueur de fuite $L_f = 29.2$ cm du modèle est gardée constante pour la pollution uniforme et non uniforme.

III-5-1-Pollution uniforme :

Pour cette configuration, le plan est humidifié avec une conductivité donnée en gardant une ouverture constante du pulvérisateur. L'humidification de la surface est obtenue après cinq pulvérisations de chaque côté de l'isolateur (figure III.4) à une distance de 0.5 m qui est gardée constante durant toute l'opération.

III-5-2-Pollution non-uniforme :

Dans l'intention de déterminer l'influence de la pollution non-uniforme sur le comportement du modèle plan du laboratoire, de nombreux essais sont effectués en variant la longueur de la couche de pollution de façon régulière ainsi que sa position par rapport aux électrodes en adoptant deux cas de figures.

III-5-2-1-Pollution du côté HT et terre:

Pour ce cas de figure, l'humidification de la surface est faite sur une partie du plan en cachant l'autre extrémité avec du papier carton (figure III.5). La méthode de pulvérisation adoptée est la même que pour la pollution uniforme. La solution polluante utilisée pour cette configuration a une conductivité volumique de 1.2 mS/cm. La pulvérisation de la couche est effectuée du côté de l'électrode mise sous tension puis du côté de l'électrode mise à la terre. Les couches polluées ont des largeurs Y égales à 5, 10, 15, 20 et 25 cm pour chaque côté (Figure III.5).

III-5-2-2-Pollution de la couche centrale:

Pour cette configuration, nous avons choisi de polluer uniquement la partie centrale de la plaque avec la même conductivité volumique de 1.2 mS/cm. La pulvérisation est effectuée de la même façon que pour le cas précédent. Les couches polluées de la plaque ont des largeurs X égales à 5, 10, 15, 20 et 25 cm centrées au milieu du plan en verre (Fig. III.6).

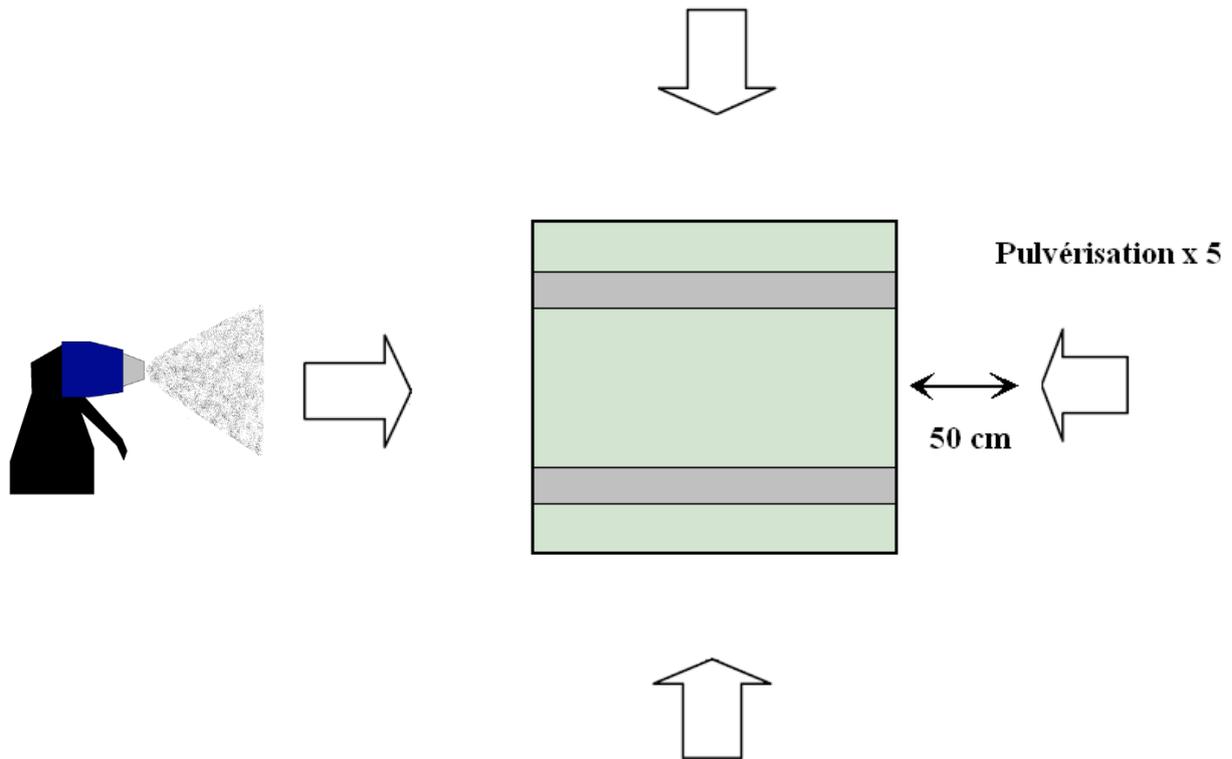


Figure III.4 : *Méthode de pulvérisation pour la configuration uniforme.*

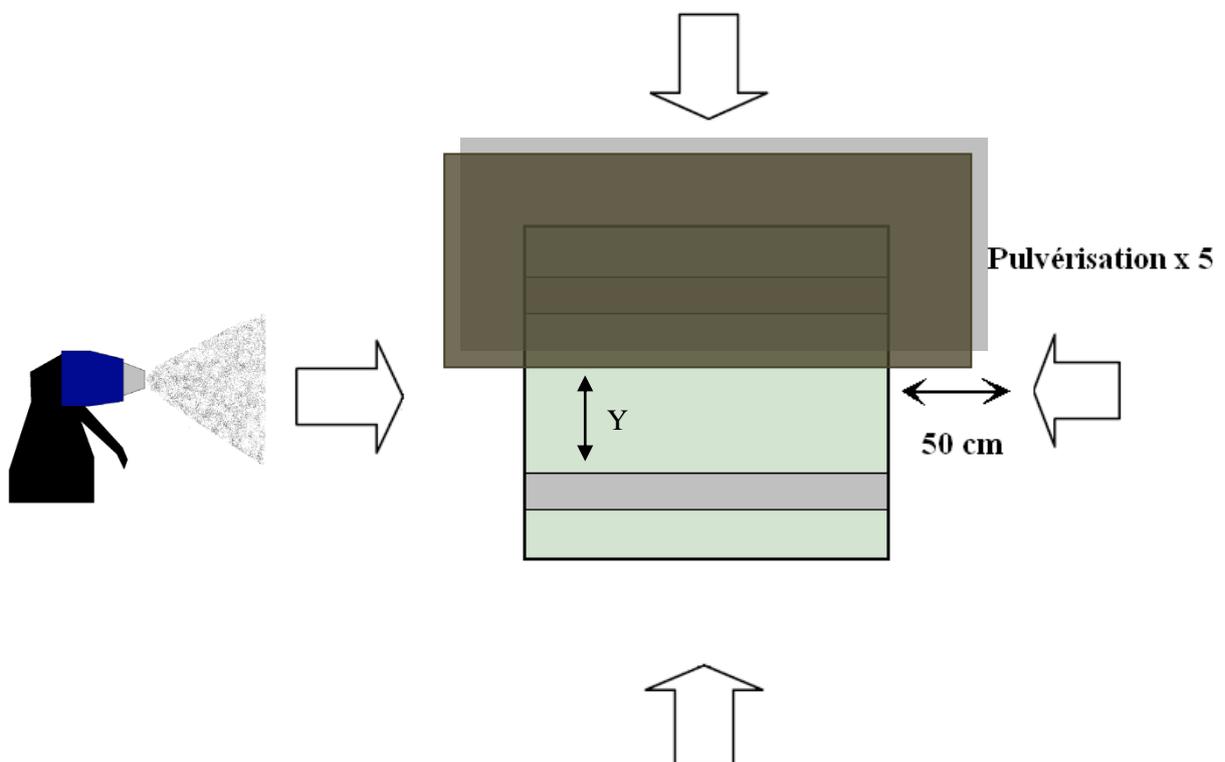


Figure III.5 : *Méthode de pulvérisation pour la configuration non-uniforme (cas n°1, Y est la largeur de la couche polluée).*

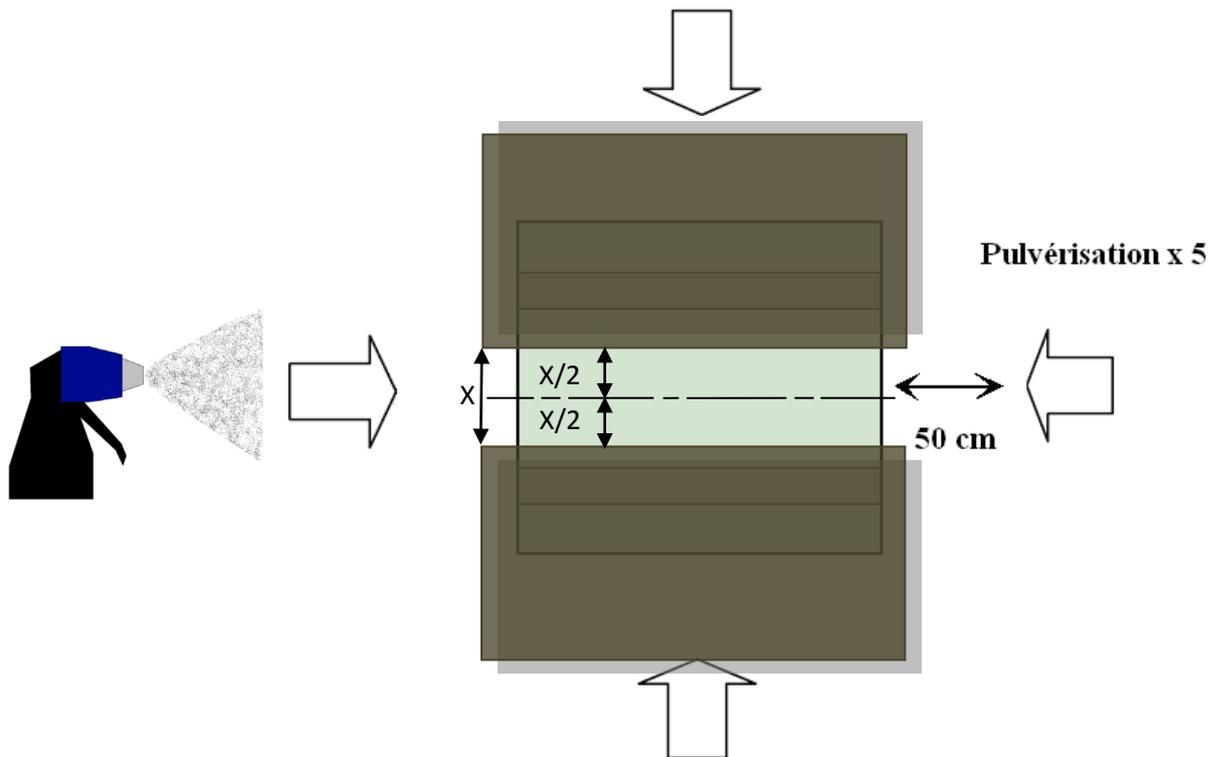


Figure III.6 : Méthode de pulvérisation pour la configuration non-uniforme (cas n°2, X est la largeur de la couche polluée).

III-6- Mesure du courant de fuite :

Pour la pollution uniforme de la surface du modèle, la mesure du courant de fuite a été faite grâce à l'oscilloscope TEKTRONIX par l'intermédiaire du signal de la tension avec une résistance $R = 1\text{k}\Omega$, afin de limiter l'effet des parasites qui altèrent la qualité du signal du courant de fuite.

Pour la pollution non-uniforme et pour les deux cas présentés précédemment, la mesure du courant de fuite a été effectuée avec une résistance $R' = 2\text{k}\Omega$.

La résistance pour les deux cas (uniforme et non-uniforme) est insérée en série avec l'objet d'essai et le retour de terre. Un câble coaxial est utilisé pour récupérer les données du courant de fuite et de la tension appliquée envoyés vers l'oscilloscope. La fréquence d'échantillonnage est de 100 kHz pour le cas uniforme et de 250 kHz pour le cas non-uniforme. Ce choix permet d'avoir une vision plus large des ondes de tension et du courant de fuite pour les deux cas de pollution.

III-7-Mesure de la longueur et du nombre de décharges parallèles :

Pour le cas uniforme, la mesure de la longueur des décharges parallèles qui se développent sur la surface du modèle plan pollué est réalisée à l'aide du caméscope numérique qui permet de les visualiser en fonction de la tension appliquée. Le calcul du nombre des décharges parallèles a été effectué pour le côté de l'électrode mise à la terre et pour le côté de l'électrode mise sous tension. La mesure de la longueur critique de la décharge est faite pour chaque conductivité. Le traitement des séquences filmées est assuré par le logiciel de traitement d'image *KM Player* qui nous permet de suivre l'évolution des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée sur le plan pollué.

III-8-Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée :

La mesure du déphasage courant de fuite-tension appliquée est déterminée à l'aide de la transformée de Fourier discrète basée sur la FFT, grâce à un programme MATLAB® qui permet de calculer le déphasage entre le fondamental du courant de fuite et celui de la tension appliquée.

Cette mesure est effectuée pour le cas de la pollution uniforme et pour les différentes configurations concernant la pollution non-uniforme. Le calcul a pour objectif de déterminer l'état de surface de l'isolateur et de comprendre l'effet des phénomènes physiques (assèchement et évaporation) qui sont engendrés par l'occurrence des décharges parallèles à la surface du modèle plan. Cette mesure peut être considérée comme un outil de diagnostic des changements apportés à l'état de surface en variant les conductivités ainsi que les niveaux de tension sur le modèle plan de l'isolateur 1512 L .

III-9-Conclusion :

Afin de bien réussir l'étude concernant la pollution du modèle et le développement des décharges parallèles sur sa surface isolante pour différentes conductivités, plusieurs choix sont pris en considération :

- L'utilisation d'une plaque isolante nous permet de bien visualiser l'activité des décharges parallèles à sa surface.
- L'application de la couche de pollution uniforme et non-uniforme est facile et le nettoyage de la plaque est simple.
- La méthode de pulvérisation artificielle permet un gain de temps et une maîtrise de la technique de pulvérisation.

Chapitre IV :

*Etude du comportement du
modèle plan.*

IV-1-Introduction :

Dans cette partie expérimentale concernant l'étude du comportement du modèle plan de l'isolateur 1512 L, nous nous proposons dans un premier temps de mesurer la tension de contournement pour une distance de fuite $d = 29,2$ cm, dans le cas de la pollution uniforme avec les différentes conductivités et dans le cas de la pollution non –uniforme pour les configurations suivantes :

- Couches polluées à partir du côté de l'électrode sous tension.
- Couches polluées à partir du côté de l'électrode mise à la terre.
- Couches polluées au centre du modèle plan.

En deuxième lieu, on s'intéresse à l'évolution du courant de fuite qui est un des paramètres essentiels pour la prédiction de l'état de surface de l'isolateur. Pour le cas de la pollution uniforme, nous étudions la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités, après 30 secondes d'application de la tension afin de voir l'influence des décharges électriques sur l'état de surface de l'isolateur plan. Pour les différentes configurations de la pollution non-uniforme, nous nous sommes intéressés à la variation du courant de fuite en fonction du rapport de la couche polluée sur la longueur de fuite totale, pour différents paliers de tension appliquée et pour une conductivité volumique de 1,2 mS/cm.

En troisième lieu, nous étudions le déphasage entre le fondamental du courant de fuite et celui de la tension appliquée pour la pollution uniforme et tous les cas de figures de la pollution non-uniforme. Pour la pollution uniforme, nous avons pris en considération l'influence de la conductivité du milieu sur le déphasage pour différents niveaux de tension appliquées. Dans le cas non-uniforme, nous avons observé l'influence du rapport entre la couche polluée et la longueur de fuite totale, sur le déphasage courant-tension. L'étude du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée peut être très intéressante pour la compréhension du comportement du circuit équivalent de l'isolateur et pour l'évaluation de l'hydrophobicité, afin de diagnostiquer la sévérité de la pollution [83].

En dernier lieu et pour la pollution uniforme et non-uniforme, nous avons pu observer grâce au caméscope l'influence de la tension appliquée et de la conductivité volumique sur le nombre et la longueur maximale des décharges parallèles. Quand à la longueur critique, celle-ci a été mesurée pour les différentes conductivités et juste avant le contournement.

IV-2-Etude de la tension de contournement :

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur car il permet d'identifier le système formé par les électrodes (pointe-pointe, plan-plan,.....) et donc de définir la rigidité diélectrique du système ainsi formé par les électrodes. Dans notre cas, la mesure de la tension de contournement a pour objectif la protection des appareillages de mesure, en particulier l'oscilloscope car la mesure du courant de fuite ne doit pas se faire à plus de 50% de la tension de contournement.

IV-2-1-Identification du système d'électrodes formé par le modèle plan :

Afin d'identifier le système d'électrodes formé par notre modèle plan de l'isolateur 1512 L, nous avons procédé à des essais de contournement pour les distances inter-électrodes $d_1=22$ cm qui correspond à la distance de contournement à sec et $d_2=29,2$ cm qui correspond à la distance de fuite sous des conditions de pollution par humidification.

Essai		1	2	3	4	Moyenne
Tension (kV_{eff})	d_1	94	93	92	93	93
	d_2	120	121	122	120	120.75

Tableau IV.1 : *Essais de contournement pour le cas sec du modèle plan.*

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

$$U_c = 3,16 d + 14 \quad [kV_{\text{eff}}] \quad (\text{IV.1})$$

d: distance inter-électrode

Nous trouvons d'après la formule (IV.1) que la tension de contournement est de **83.52 kV_{eff}** pour d_1 et de **106,27 kV_{eff}** pour d_2 . Ces valeurs sont relativement proches des résultats obtenus expérimentalement.

V-2-2-Tension de contournement pour le cas uniforme :

Dans cette partie nous analysons l'influence de la conductivité sur la tension de contournement du modèle plan. Les résultats d'essais pour les différentes conductivités sont montrés au tableau IV.2.

Essai		1	2	3	4	Moyenne
Tension (kV_{eff})	10 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	46	53	56	58	53.25
	190 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	45	35	37	40	39.25
	710 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	32	33	44	30	34.75
	1.2 (mS/cm)	34	33	35	37	34.75
	10.1 (mS/cm)	34	32	25	30	30.25

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

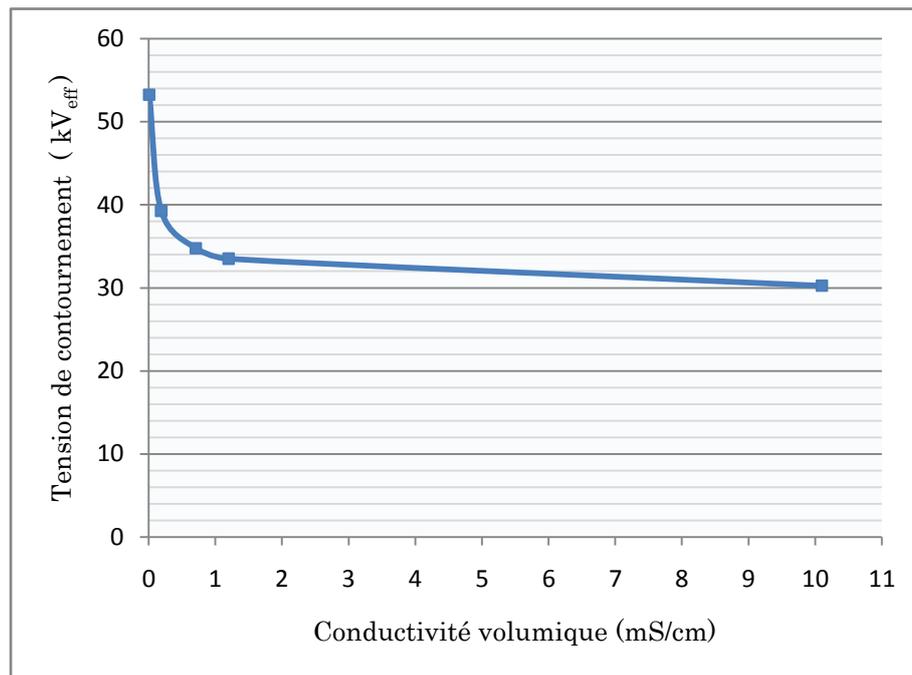


Figure IV.1 : Influence de la conductivité sur la tension de contournement pour le modèle plan.

D'après la figure (IV.1), nous remarquons que la tension de contournement diminue de manière non-linéaire en fonction de la conductivité ; elle est la plus grande pour la conductivité 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et a tendance à se stabiliser à partir de la conductivité 1.2 mS/cm.

Nous constatons également qu'à partir d'un certain niveau de tension, toute augmentation de celle est accompagnée par un bruit qui croît de manière conséquente jusqu'au contournement de l'isolateur. Ce bruit est généralement attribué à l'effet de couronne qui est une phase initiale du contournement. Nous avons aussi constaté une évaporation progressive de la couche de pollution, qui augmente proportionnellement avec la conductivité. Cette évaporation peut être expliquée par l'augmentation de la densité de courant à la surface du plan proportionnellement à la conductivité générant un dégagement de chaleur important par effet joule. Enfin, un des phénomènes remarquables sur la surface du modèle est l'apparition de décharges parallèles ainsi que d'arcs à cause de l'assèchement de certaines zones du plan. Ces décharges sont dues à l'augmentation du champ électrique qui atteint la valeur critique dans les contours secs et court-circuite les micro-capacités formées par ces zones sèches.

IV-2-3-Tension de contournement pour le cas non-uniforme :

Dans le cas de la pollution non-uniforme, nous étudions l'influence de la largeur ainsi que l'emplacement de la couche polluée sur la tension de contournement de la plaque en verre. Les résultats obtenus pour les essais concernant la pollution côté HT et terre ainsi que la couche centrale sont donnés aux tableaux IV.3 et IV.4.

IV-2-3-1-Pollution côté HT et terre :

Essai		1		2		3		4		Moyenne	
Côté pollué		HT	terre	HT	terre	HT	terre	HT	terre	HT	terre
Tension (kV _{eff})	5 cm	105	108	104	104	101	104	107	104	104.25	105
	10 cm	88	90	88	90	89	86	88	88	88.25	88.5
	15 cm	64	68	72	73	71	70	66	77	68.25	72
	20 cm	53	53	54	50	51	55	51	52	52.25	52.5
	25 cm	37	46	37	38	47	43	37	43	39.5	42.5

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

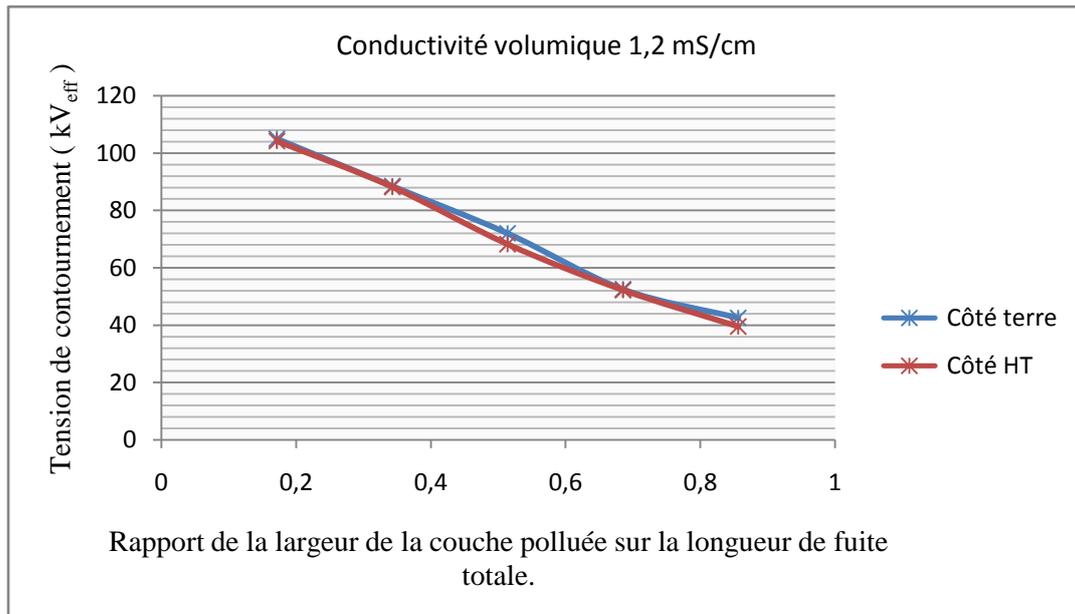


Figure IV.2 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour la pollution HT et terre.

Pour ce cas de figure de la pollution non-uniforme, nous remarquons que la tension de contournement varie de manière non-linéaire et inversement proportionnelle en fonction du rapport de la couche polluée sur la longueur de fuite totale, que se soit du côté HT ou du côté terre. Nous constatons également que les tensions de contournement pour le côté terre sont légèrement plus élevées que celles du côté HT et cela pour les rapports 0,51 et 0,85 qui correspondent aux couches 15 et 25 cm. Ceci signifie que le modèle plan étudié est un peu plus rigide dans le cas de la pollution côté terre pour les couches 15 et 25 cm. L'écart entre les tensions de contournement pour le côté haute tension et le côté terre est de 5,2% pour 15 cm et de 7% pour 25 cm par rapport à la tension de contournement du côté terre.

V-2-3-2-Pollution de la couche centrale :

Essai		1	2	3	4	Moyenne
Tension (kV _{eff})	5 cm	126	125	118	125	123.25
	10 cm	110	100	107	107	106
	15 cm	83	86	83	91	85.75
	20 cm	60	69	60	56	61.25
	25 cm	42	46	43	43	43.5

Tableau IV.4 : Essais de contournement pour la pollution de la couche centrale.

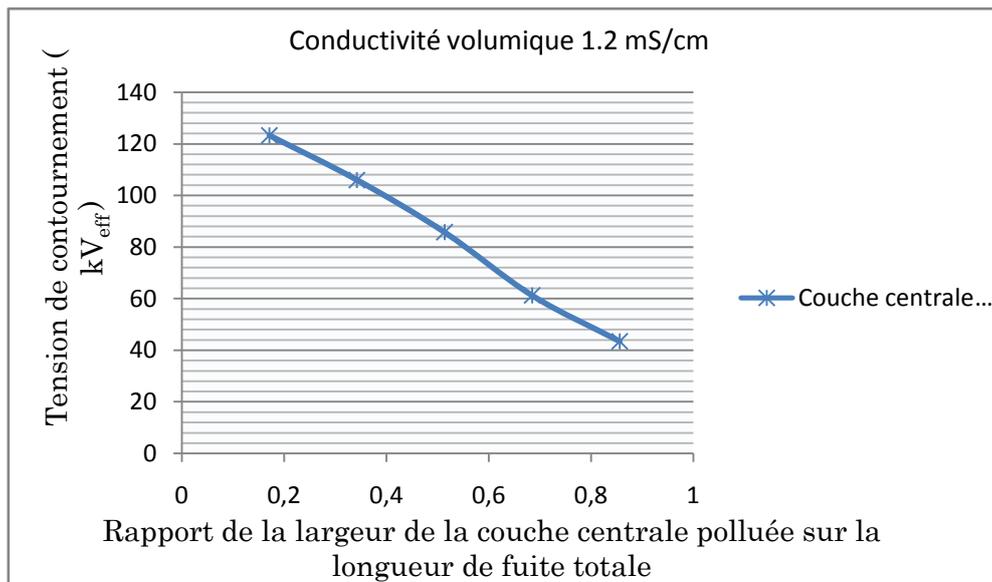


Figure IV.3 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la couche centrale polluée sur la longueur de fuite.

Pour ce cas de figure, nous remarquons que la tension de contournement varie de manière inversement proportionnelle avec la largeur de la couche centrale polluée qui peut être considérée comme non-linéaire. Cette configuration semble identique au cas sec avec une légère augmentation dans la tension de contournement pour la première valeur (126 kV_{eff}). Ceci peut être expliqué par la présence de quelques impuretés sur la surface sèche du plan durant les essais de contournement, qui ont eu pour effet la diminution de la tension de contournement.

IV-2-3-3-Discussion :

Nous concluons d'après l'étude en pollution uniforme et non uniforme que la tension de contournement diminue en fonction de deux paramètres principaux qui sont :

- La conductivité du milieu pour le cas de la pollution uniforme qui fait varier la tension de contournement de manière non-linéaire.
- L'augmentation de la largeur de la couche de pollution ainsi que son emplacement pour le cas de la conductivité non-uniforme qui fait varier la tension de contournement de manière presque linéaire.

Dans le cas de la pollution non-uniforme, nous concluons que le modèle plan est plus rigide dans le cas où la couche centrale est polluée avec une conductivité volumique de 1,2 mS/cm pour des rapports de la couche polluée sur la longueur de fuite totale, inférieurs ou égaux à 68%. La tension de contournement présente aussi un minimum lorsque 85,6 % de la distance inter-électrode est polluée pour les trois cas de la pollution non-uniforme (Figures IV.2 et IV.3) ; ce pourcentage correspond au cas le plus favorable à la formation des décharges parallèles et donc d'un contournement très probable. Ces observations sont en accord avec plusieurs travaux de recherches [84,85]

IV-3-Etude du courant de fuite :

Afin de mettre en évidence l'influence de la conductivité, de la largeur et de l'emplacement de la couche polluée, plusieurs essais ont été effectués pour plusieurs niveaux de tensions. Chaque point expérimental représente une moyenne de trois essais.

IV-3-1-Cas sec :

La mesure du courant de fuite est faite pour le cas sec en vue de la comparer avec les résultats obtenus pour les cas uniformément pollués et non-uniformément pollués.

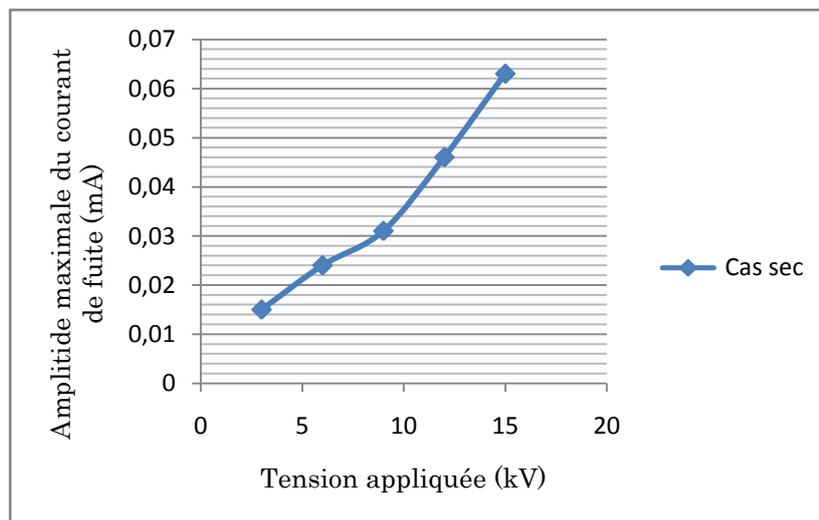


Figure IV.4 : *Variation de l'amplitude du courant de fuite pour différents niveaux de tension pour le cas sec.*

Les résultats obtenus pour le cas sec montrent que le courant de fuite augmente de façon presque linéaire proportionnellement à la tension appliquée.

Toutefois ces valeurs restent faibles à cause de l'impédance équivalente du milieu qui est la plus grande pour le cas sec.

IV-3-2-Pollution uniforme :

Pour cette pollution, l'oscilloscope a mesuré l'amplitude maximale du courant de fuite pour chaque conductivité et pour plusieurs paliers de tension.

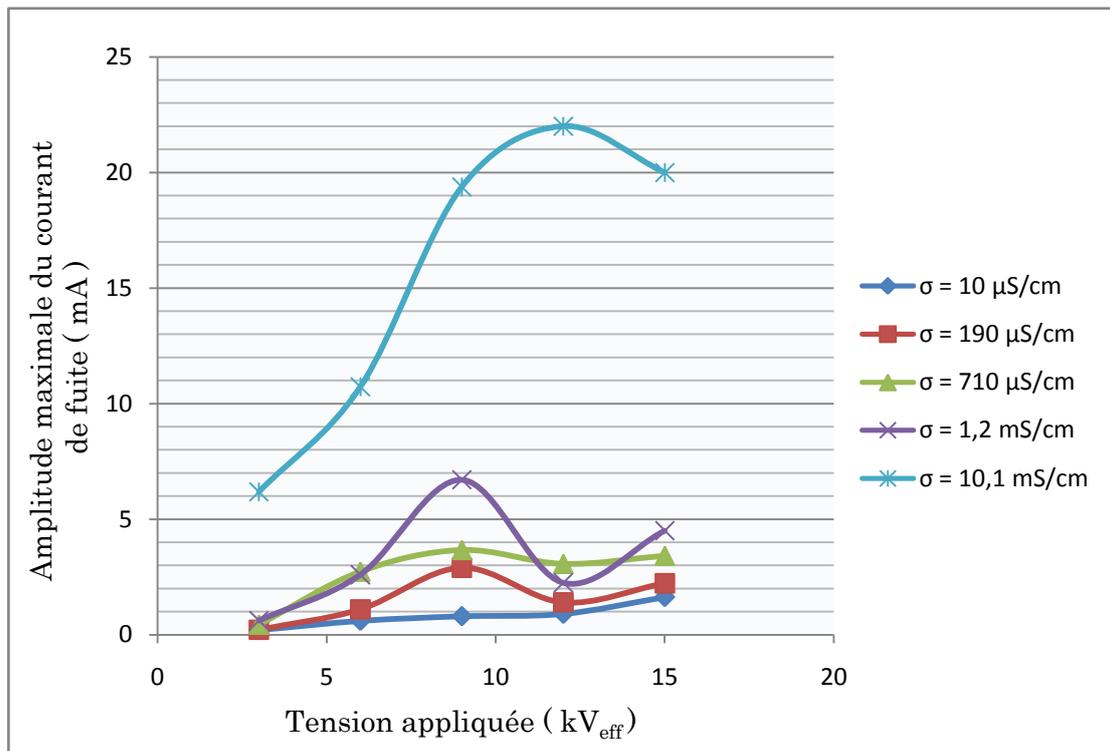


Figure IV.5 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités.

D'après la figure IV.5, nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée de manière non-linéaire pour toutes les conductivités. Pour la conductivité 10 μS/cm, le courant de fuite augmente de manière progressive car il n'y a pas eu d'assèchement important et cela malgré la présence de décharges non localisées à la surface de l'isolateur (à partir de 20 kV_{eff}).

Pour les conductivités volumiques 0,19, 0,71 et 1,2 mS/cm, nous remarquons une baisse de l'amplitude maximale du courant de fuite à partir de la tension 9 kV_{eff}. Cette baisse est très remarquable pour la conductivité 1,2 mS/cm à cause d'un assèchement beaucoup plus important de la surface isolante (signe d'activité de décharges très développée). Cette baisse peut être expliquée par le temps d'application de la tension (30 secondes) pendant lequel l'eau présente à la surface se vaporise petit à petit par effet joule menant à une

augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur ,ce qui participe à l'augmentation de la rigidité diélectrique du modèle. Ainsi la valeur du champ électrique dans ces zones sèches devient trop faible pour engendrer des décharges électriques, ce qui réduit de manière importante le courant de fuite.

Pour la conductivité 10.1 mS/cm, le comportement des décharges électriques diffère des conductivités précédentes. En réalité, l'amplitude maximale du courant de fuite est la plus élevée et commence à baisser à partir de 12 kV_{eff} puisque des décharges continuent d'avoir lieu à la surface de l'isolateur. Cette activité permanente des décharges électriques provient du champ électrique très élevé dans la triple jonction *air-isolant-électrolyte* qui favorise leur initiation pour de très faibles niveaux de tension (à partir de 3kV_{eff} pour notre cas) et par conséquent participe à l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite car l'impédance équivalente du milieu est la plus faible.

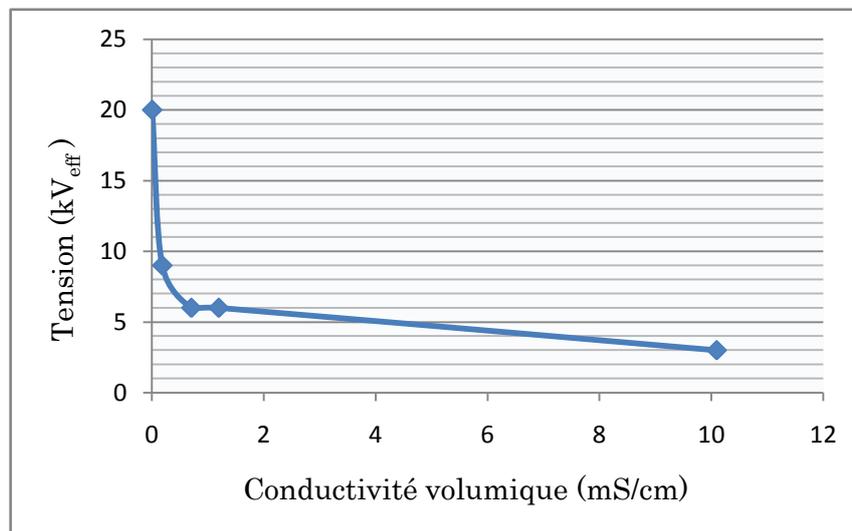


Figure IV.6 : Tension d'apparition des décharges parallèles pour les différentes conductivités.

IV-3-3-Pollution non-uniforme :

Le courant de fuite pour ce type de pollution est mesuré pour le cas où la couche polluée se situe du côté de l'électrode haute tension, de l'électrode mise à la terre et lorsque la couche polluée se trouve au centre de la plaque isolante.

IV-3-3-1-Couche polluée du côté HT :

La variation du courant de fuite en fonction du rapport de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour plusieurs paliers de tension, pour le cas de la pollution HT est montrée à la figure IV.7.

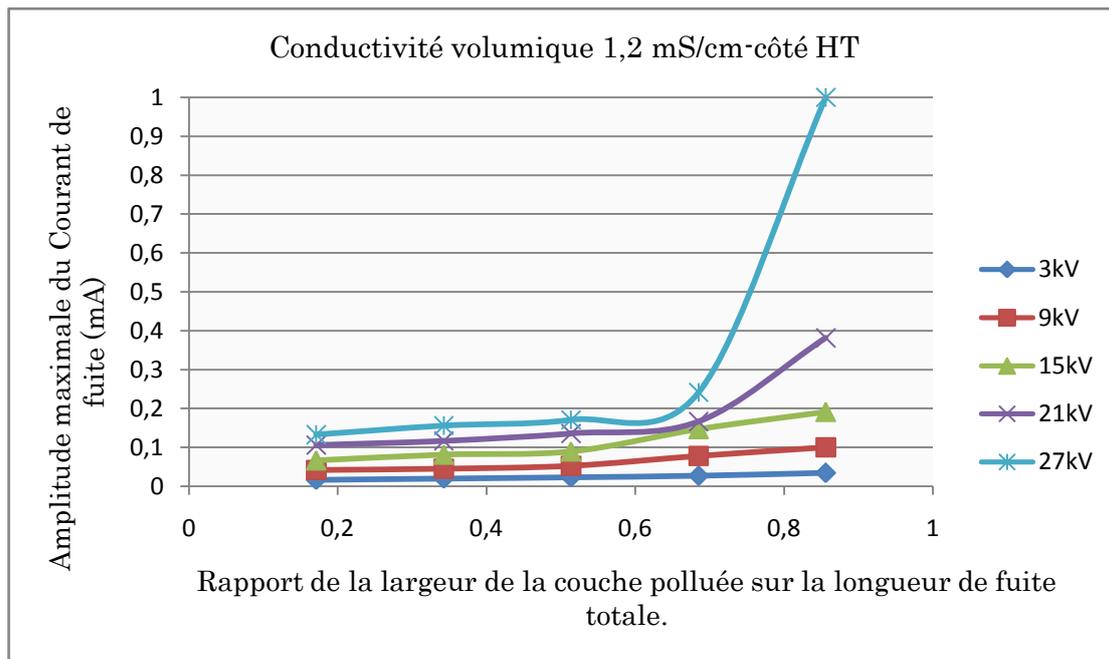


Figure IV.7 : Amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension appliqués, cas de pollution côté HT.

D'après les résultats obtenus, l'amplitude du courant de fuite augmente en fonction de la largeur de la couche polluée et du niveau de tension appliqué. Cette amplitude présente un maximum pour un niveau de tension égal à $27 \text{ kV}_{\text{eff}}$ et pour 85,6 % de la distance inter-électrode polluée, qui représente le cas le plus favorable à la formation de l'arc électrique (Figure IV.8). L'augmentation de l'amplitude du courant de fuite peut être expliquée par la réduction significative de l'impédance totale équivalente du milieu proportionnellement à l'élargissement de la couche polluée.

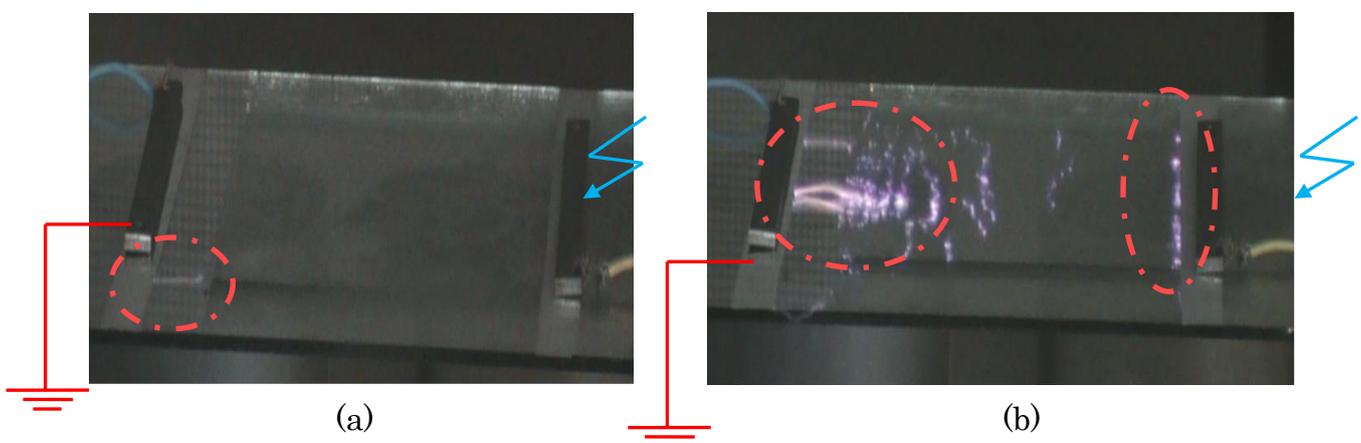


Figure IV.8 : Comportement de l'isolateur plan pour une largeur de 25 cm de la couche polluée du côté HT : (a) niveau $21 \text{ kV}_{\text{eff}}$, (b) niveau $27 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

V-3-3-2-Couche polluée du côté terre :

L'évolution du courant de fuite en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale et pour plusieurs paliers de tension, est montrée à la figure IV.9.

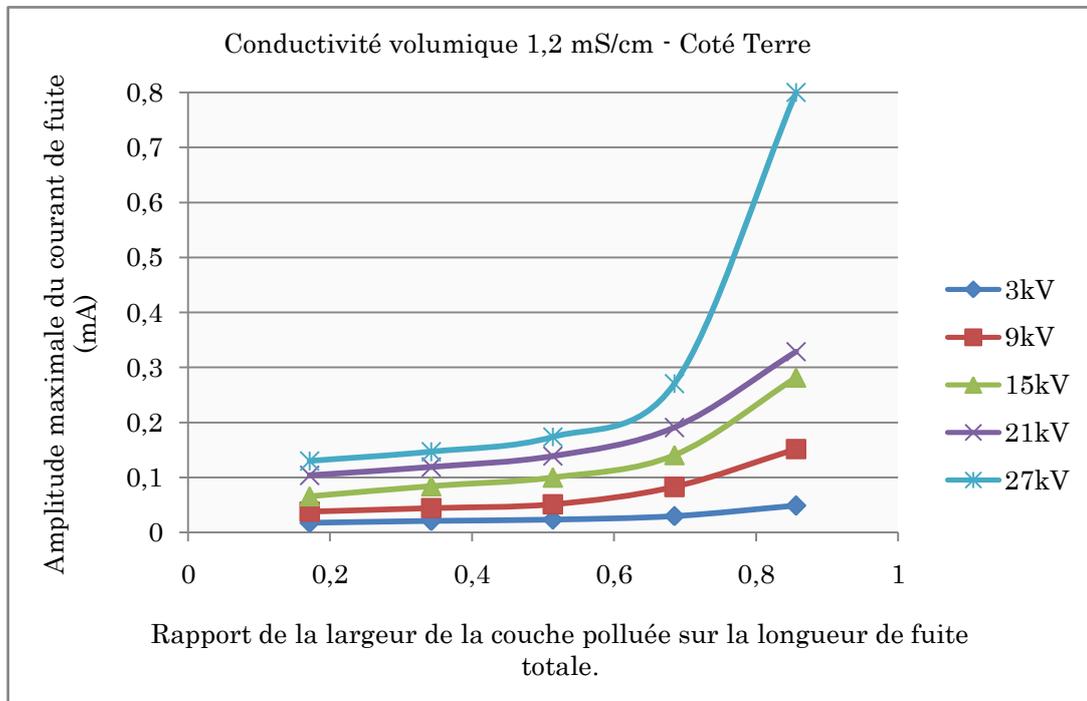


Figure IV.9 : Amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension appliqués, cas de pollution côté terre.

Les résultats expérimentaux montrent, comme dans le cas précédent, une augmentation du courant de fuite en fonction de l'élargissement de la couche polluée et de l'augmentation du niveau de tension appliqué. Toutefois, nous remarquons que pour la couche 20 cm et pour les niveaux de tension 21 et 27 kV_{eff}, l'amplitude du courant de fuite est un peu plus élevée par rapport à celle de la configuration HT. Cette différence est de l'ordre de 12,8 % pour 21 kV_{eff} et 11% pour 27 kV_{eff}.

Pour la couche polluée de largeur 25 cm et un niveau de tension de 21 kV_{eff}, nous constatons que le courant de fuite est un peu plus élevé pour le côté HT que pour le côté terre. Cette différence est peut être due à l'impédance du milieu qui serait un peu plus faible du côté terre que du côté HT pour une couche polluée de 20 cm et un peu plus élevée pour la couche 25 cm du côté terre par rapport au côté HT.

Certains chercheurs [86] ont montré que pour d'autres configurations de pollution non-uniforme, la valeur du ratio entre l'impédance de la couche polluée

et celle de la couche sèche du côté terre est effectivement plus petite que celle pour le côté HT. Elle indique aussi un comportement résistif de l'isolateur plan avec l'augmentation de la couche polluée. Nous constatons également que la valeur du courant de fuite est maximale pour 85,6 % de la distance inter-électrode polluée, pour une tension de 27 kV_{eff} et une conductivité volumique de 1,2 mS/cm.

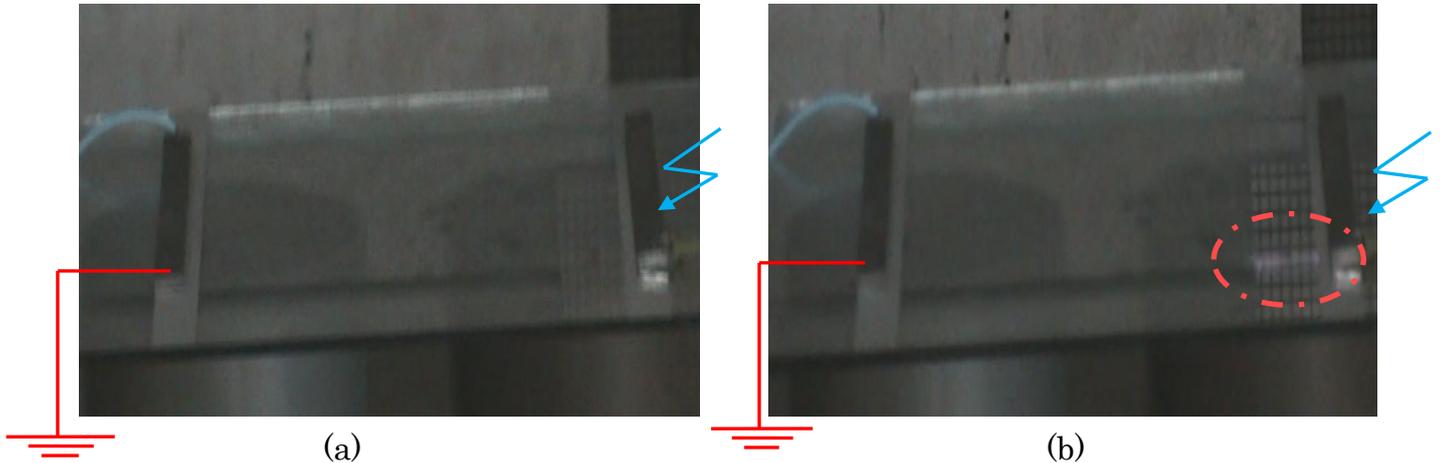


Figure IV.10 : *Comportement de l'isolateur plan pour une largeur de 25 cm de la couche polluée du côté terre : (a) niveau 21 kV_{eff}, (b) niveau 27 kV_{eff}.*

IV-3-3-3-Couche centrale polluée:

Les variations du courant de fuite en fonction du ratio entre la couche polluée et la distance de fuite totale pour différents niveaux de tension appliqués, sont montrées à la figure IV.11.

Les expériences effectuées pour cette configuration nous montrent que la valeur du courant de fuite augmente en fonction de l'augmentation de la largeur de la couche centrale polluée et de la tension appliquée. Néanmoins, ces valeurs restent assez faibles par rapport aux deux configurations précédentes nous indiquant que pour des largeurs de 15 ,20 et 25 cm et des niveaux de tension de 9, 15 et 21 kV_{eff}, le modèle pollué au centre est plus rigide avec quand même une valeur extrême pour la couche 25 cm, à partir du niveau de tension 30 kV_{eff} et pour une conductivité de 1.2 mS/cm. La diminution de la valeur du courant de fuite par rapport aux autres cas peut être expliquée par l'augmentation de l'impédance équivalente du modèle.

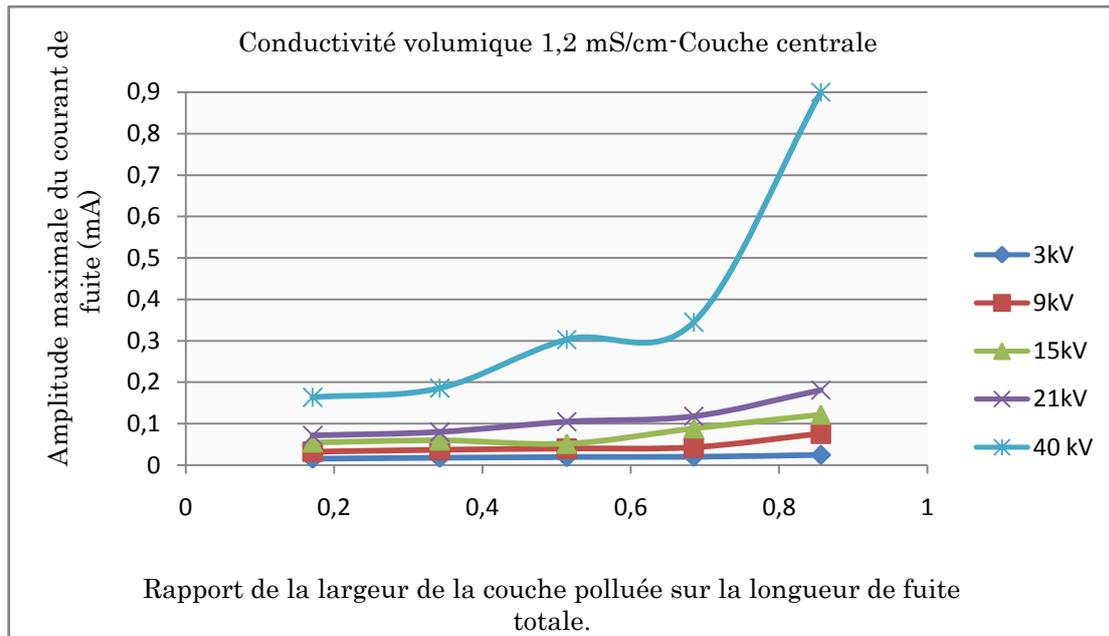


Figure IV.11 : Amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension appliqués, cas d'une pollution centrale.

L'augmentation subite du courant de fuite pour une largeur de 25 cm et à partir de la tension de 30 kV_{eff}, est causée par les décharges parallèles qui court-circuitent les intervalles d'air existant entre les extrémités de la couche polluée et chaque électrode et diminue visiblement l'impédance équivalente du modèle.

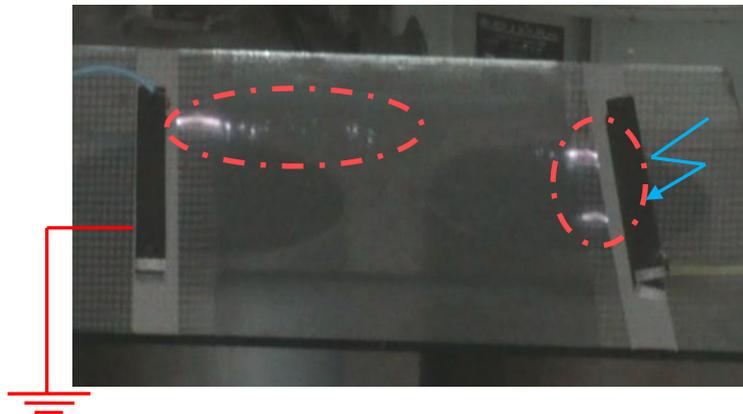


Figure IV.12 : Comportement de l'isolateur plan pour une largeur de 25 cm de la couche centrale polluée pour un niveau de tension de 30 kV_{eff}.

IV-3-4-Discussion :

L'analyse du courant de fuite nous permet de conclure que l'amplitude de celui-ci augmente en fonction de la tension appliquée et de la conductivité du milieu.

L'augmentation de la largeur de la couche polluée amplifie la valeur du courant de fuite que se soit pour le cas de la pollution du côté HT, terre ou pour le cas de la couche centrale.

Nous constatons pour le cas uniforme que l'apparition des décharges parallèles contribue à la diminution du courant de fuite pour les conductivités 0.19, 0.71 et 1.2 mS/cm, à cause de l'assèchement progressif de certaines zones du modèle plan. Cet assèchement est plus rapide pour la conductivité 10,1 mS/cm qui représente un cas de pollution extrême mais ne contribue pas pour autant à diminuer l'amplitude maximale du courant de fuite (Voir annexe A).

Pour la pollution non-uniforme, la formation des décharges parallèles dans les intervalles d'air entre la couche polluée et les électrodes se fait à partir de 85,6% de la distance de fuite totale polluée dans le cas où la pollution est du côté HT pour une tension de 21 kV_{eff}, et une tension de 27 kV_{eff} dans le cas où la pollution est du côté terre ou au centre de la plaque. Ces décharges augmentent la valeur du courant de fuite à la surface de l'isolateur conduisant à un contournement très probable.

IV-4-Analyse du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée :

Dans cette partie l'analyse du déphasage va nous permettre de comprendre l'attitude adoptée par le circuit équivalent de l'isolateur et cela pour différentes répartitions de la pollution à la surface du modèle plan.

IV-4-1-Cas sec :

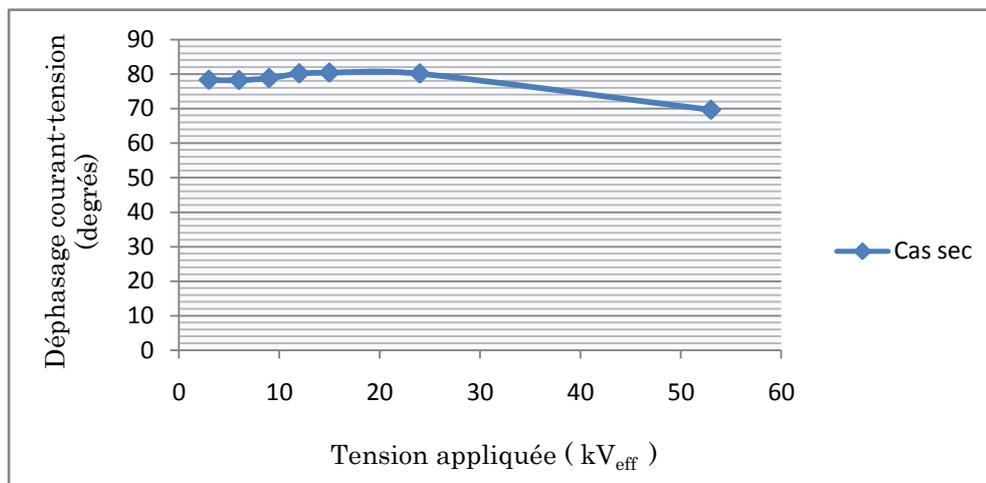


Figure IV.13 : Evolution du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour le cas sec.

Nous remarquons que le déphasage courant-tension augmente pour les faibles niveaux de tensions ($< 24 \text{ kV}_{\text{eff}}$) indiquant que le comportement de l'isolateur est pratiquement capacitif avec un léger effet résistif. Cependant, la valeur du déphasage diminue pour un niveau de tension de $53 \text{ kV}_{\text{eff}}$ qui nous montre que, pour les grands niveaux de tension, l'effet résistif a tendance à augmenter par rapport à l'effet capacitif. Cela est peut être du à l'augmentation de la température de la plaque qui favorise l'agitation thermique des électrons à la surface du plan et par suite fait augmenter l'effet résistif de l'isolateur plan en considérant l'effet des petites décharges de couronne.

IV-4-2-Pollution uniforme:

La variation du déphasage courant-tension en fonction des différentes conductivités est représentée dans la figure IV.14.

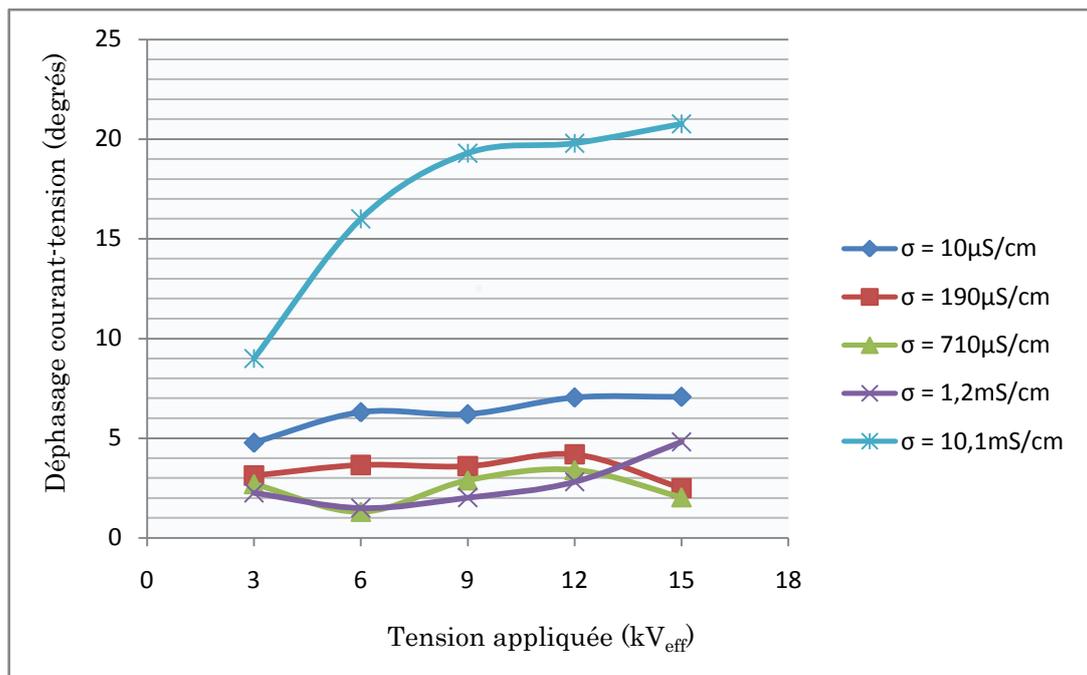


Figure IV.14 : Variation du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités.

D'après la figure IV.14, nous remarquons que le déphasage courant tension a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité du milieu et cela pour $10 \mu\text{S/cm}$, $190 \mu\text{S/cm}$ et $710 \mu\text{S/cm}$ quelle que soit la tension appliquée. Ceci nous indique que le comportement de l'isolateur est en grande partie résistif avec un très léger effet capacitif. Pour la conductivité $1,2 \text{ mS/cm}$, nous constatons qu'il y a une augmentation du déphasage courant-tension à partir de la tension

9 kV_{eff} mais qui reste inférieur à celui obtenu pour la conductivité $10 \mu\text{S}/\text{cm}$. Cette augmentation du déphasage est justifiée par l'assèchement de certaines zones du plan qui ont pour effet d'augmenter l'effet capacitif de l'isolateur.

Pour la conductivité $10,1 \text{ mS}/\text{cm}$, nous constatons que la valeur du déphasage courant-tension est plus importante par rapport aux autres conductivités. Ceci montre qu'à partir de la tension $3 \text{ kV}_{\text{eff}}$, l'activité des décharges est déjà importante, causant l'augmentation des zones sèches sous l'effet de l'augmentation de la température. Cette activité prend de l'ampleur avec l'augmentation de la tension appliquée créant d'avantage de zones sèches qui font augmenter l'effet capacitif et donc diminuer l'effet résistif de la couche polluée.

IV-4-3-Pollution non-uniforme :

IV-4-3-1-Couche polluée du côté HT :

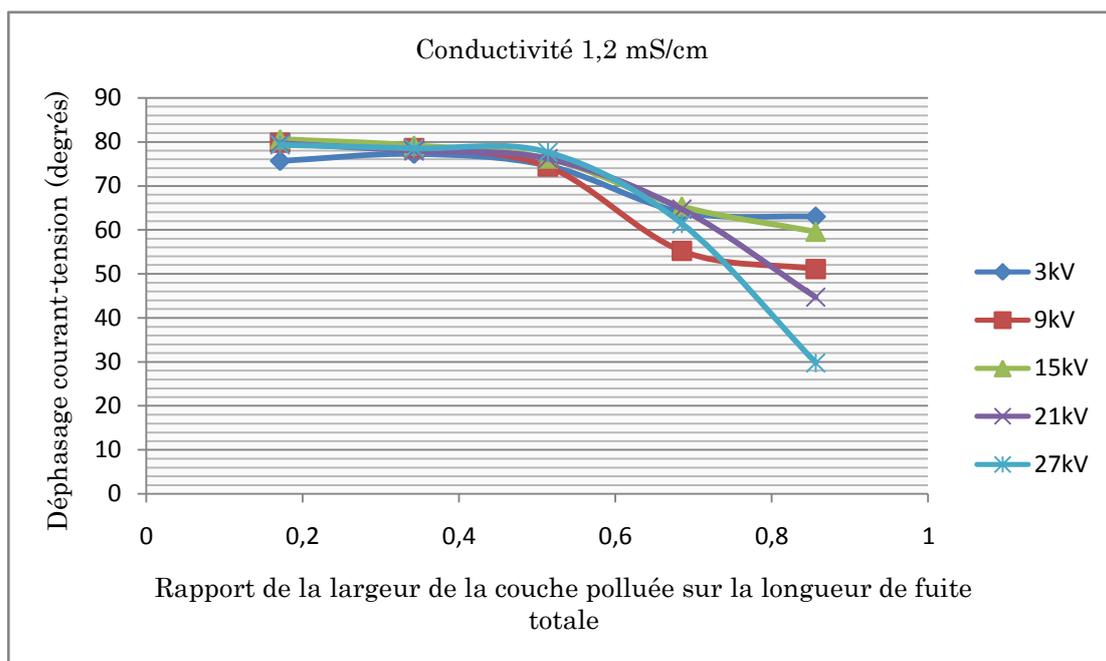


Figure IV.15 : Variation du déphasage courant-tension en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différentes tensions appliquées, cas d'une pollution HT.

Nous remarquons que pour tous les niveaux de tension appliqués, le déphasage diminue avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée ; ceci montre que le comportement de l'isolateur est d'avantage résistif que capacitif avec l'augmentation de cette largeur.

Pour les couches polluées 5, 10 et 15 cm, la tension appliquée n'a aucune influence sur le déphasage courant-tension qui a une valeur comprise entre 76° et 80° , ce qui indique que l'isolateur se comporte de façon hautement capacitive avec un léger effet résistif.

Pour une largeur de la couche polluée supérieure à 15 cm, le déphasage courant-tension a tendance à diminuer en fonction de l'augmentation de la tension appliquée ce qui donne un comportement plus résistif de l'isolateur.

Nous constatons aussi que le déphasage courant-tension est le plus faible pour les couches 20 et 25 cm et les tensions 21 et 27 kV_{eff}, ce qui indique un comportement hautement résistif justifié par l'apparition des décharges parallèles qui ont tendance à court-circuiter les intervalles d'air provoquant la diminution de l'effet capacitif de l'isolateur, ce qui n'est pas le cas pour la pollution uniforme.

V-4-3-2-Couche polluée du côté terre :

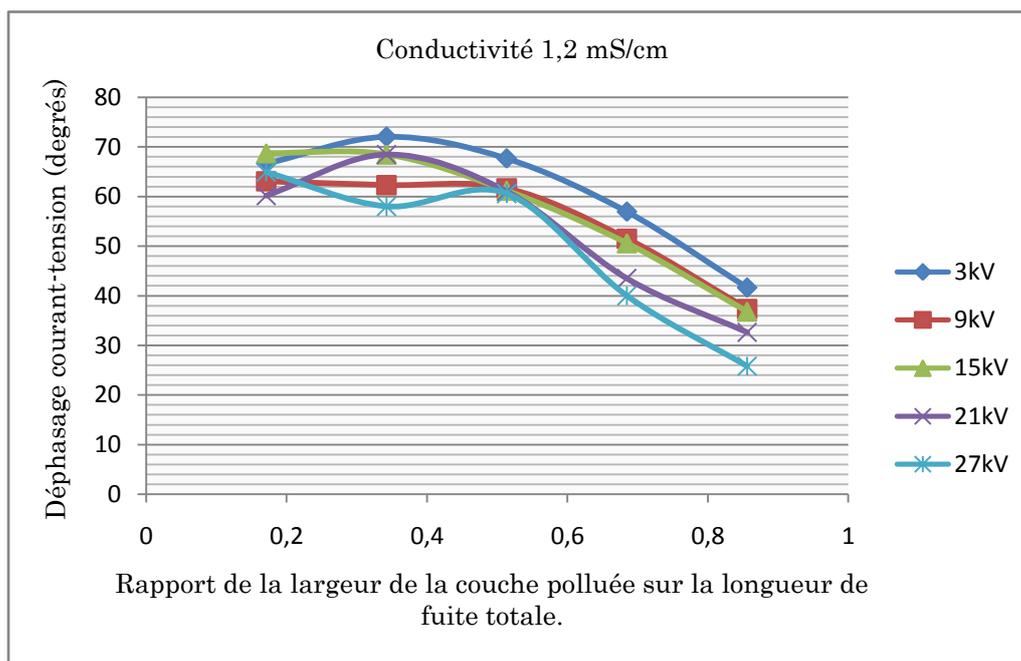


Figure IV.16 : Variation du déphasage courant-tension en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différentes tensions appliquées, cas d'une pollution du côté terre.

Les résultats obtenus pour cette configuration montrent de la même manière, que le déphasage courant-tension diminue en fonction de l'augmentation de la largeur de la couche polluée ; le déphasage diminue également avec l'augmentation de la tension appliquée qui apparaît clairement à

partir de la couche 15 cm. Toutefois cette valeur du déphasage reste inférieure par rapport à la pollution du côté HT, ce qui signifie que l'isolateur est beaucoup plus résistif dans le cas où la pollution est du côté terre.

L'occurrence des décharges parallèles pour la couche 25 cm et un niveau de tension de 27 kV_{eff} cause une baisse remarquable du déphasage qui montre encore une fois que les décharges augmentent l'effet résistif de l'isolateur et diminuent son effet capacitif.

IV-4-3-3-Couche centrale polluée :

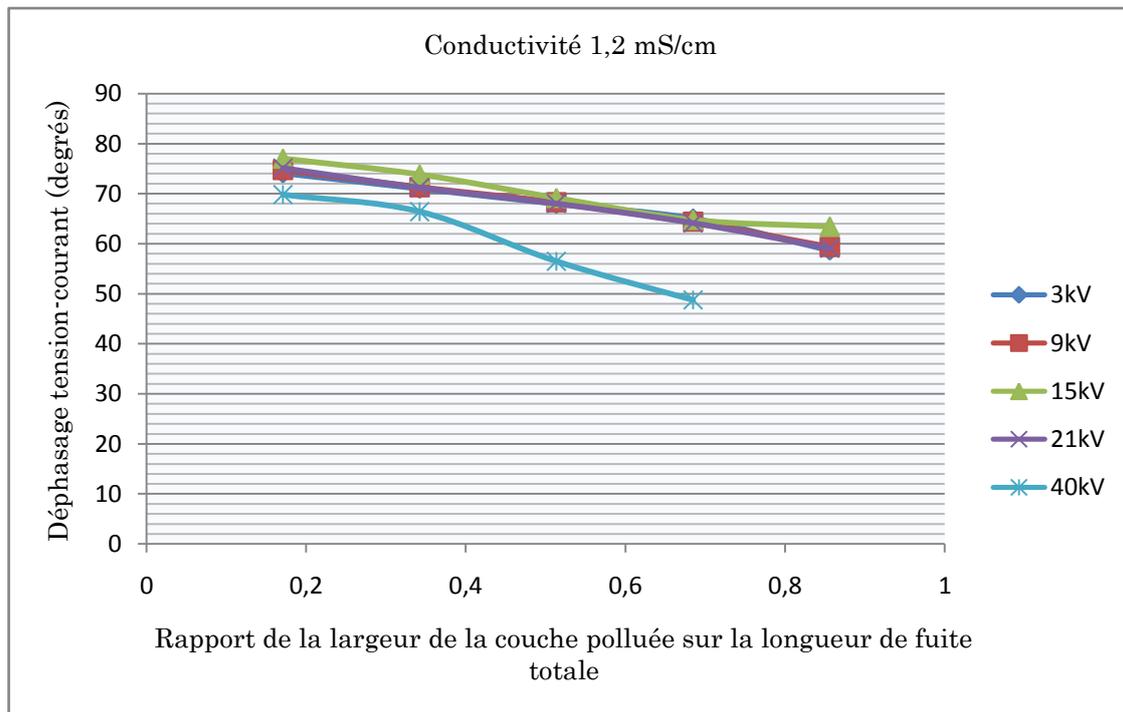


Figure IV.17 : Variation du déphasage courant-tension en fonction du rapport de la largeur de la couche centrale polluée sur la longueur de fuite totale pour différentes tensions appliquées.

Pour ce cas, le déphasage courant-tension diminue avec l'augmentation de la largeur de la couche centrale polluée qui nous indique une augmentation de l'effet résistif par rapport à l'effet capacitif.

Pour des niveaux de tensions inférieures ou égales à 21 kV_{eff}, L'augmentation de la tension appliquée n'a pratiquement pas d'effet sur le déphasage courant-tension.

Pour le niveau de tension 40 kV_{eff}, la valeur du déphasage diminue considérablement à cause de l'agitation thermique qui augmente l'effet résistif par rapport à l'effet capacitif du modèle plan.

IV-4-4-Discussion :

L'étude du déphasage courant de fuite-tension appliquée montre pour le cas sec que le modèle plan est caractérisé par un effet capacitif dominant et un faible effet résistif pour des tensions inférieures à 24 kV_{eff}. Cet effet capacitif diminue avec l'augmentation de la tension au-delà de 30 kV_{eff} à cause de l'augmentation de l'agitation thermique qui fait augmenter légèrement l'effet résistif.

Pour la pollution uniforme, la valeur du déphasage diminue avec l'augmentation de la conductivité du milieu qui indique que l'isolateur a un effet purement résistif. Pour les grandes conductivités (1,2 et 10,1 mS/cm) l'occurrence des décharges parallèles créent des zones sèches qui augmentent l'effet capacitif de l'isolateur. Cette augmentation est plus remarquable avec l'accroissement du niveau de tension appliqué.

Pour la pollution non-uniforme, l'augmentation de la largeur de la couche polluée pour tous les emplacements réduit l'effet capacitif et augmente l'effet résistif de l'isolateur. L'effet résistif est amplifié par le court-circuit des intervalles d'air entre la couche polluée et les électrodes pour une tension de 27 kV_{eff} et une largeur de la couche de 25 cm pour les trois configurations.

La diminution du déphasage courant-tension est moins accentuée dans le cas d'une pollution au centre du plan, ce qui montre un comportement hautement capacitif du modèle et donc une rigidité diélectrique plus grande comparativement aux pollutions HT et terre. Le cas de la pollution du côté terre représente un cas critique car le modèle est le moins rigide diélectriquement compte tenu de la faible valeur de son impédance totale équivalente.

IV-5-Etude des décharges parallèles :

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement des décharges parallèles sur la surface isolante uniformément polluée sous tension alternative 50 Hz. Nous nous intéressons surtout à la longueur critique de l'arc juste avant le contournement ainsi qu'à leur nombre en fonction de la tension appliquée, une fois du côté HT et une fois du côté.

IV-5-1-Etude de la longueur critique :

Les longueurs critiques des arcs parallèles pour chaque conductivité sont montrées à la figure IV.18.

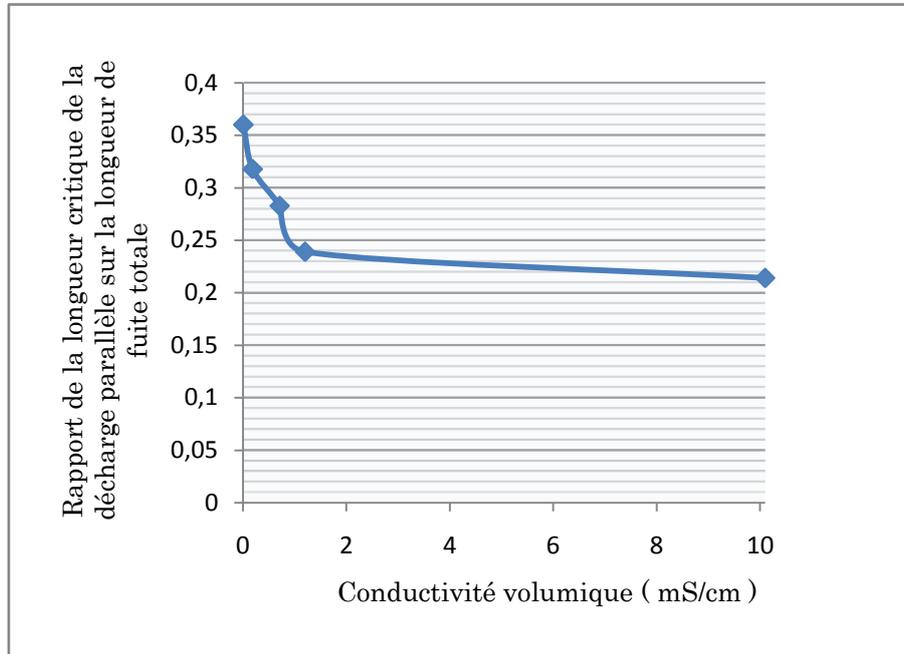


Figure IV.18 : *Longueur critique de la décharge parallèle pour chaque conductivité.*

D'après la figure IV.18, nous remarquons que la longueur critique maximale de la décharge parallèle est de 36 % de la longueur de fuite totale pour la plus faible conductivité 10 $\mu\text{S/cm}$ et de 31,8 % pour la conductivité 190 $\mu\text{S/cm}$.

Pour les grandes conductivités, la longueur critique de la décharge parallèle est de 23,9% pour 1,2 mS/cm et 21,4% pour 10,1 mS/cm de la longueur de fuite totale.

Ceci nous amène à dire que la longueur critique de la décharge diminue de manière non-linéaire avec l'augmentation de la conductivité volumique qui est due à la diminution de l'effet résistif de l'isolateur lorsque la pollution de la surface est obtenue par la méthode de pulvérisation. Cette diminution est causée par l'apparition d'arcs sur toute la surface polluée qui favorise pour de faibles tensions, la création d'un canal ionisé le long duquel progressera la décharge finale. L'apparition des arcs peut être interprétée par une baisse considérable de l'impédance équivalente de l'isolateur polluée qui favorise la création des zones sèches. La figure IV.19 montre les photos des longueurs critiques pour chaque conductivité.

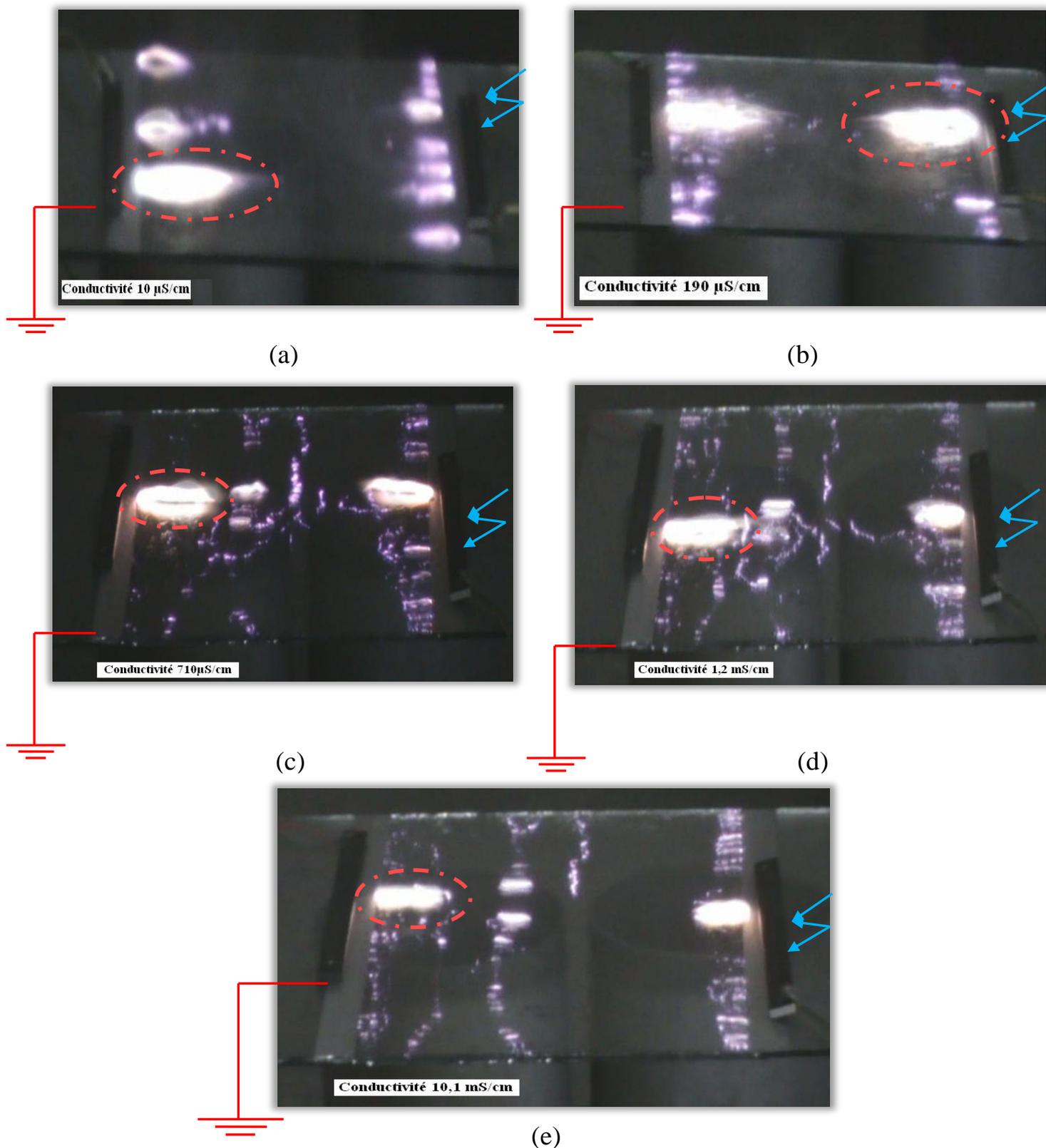
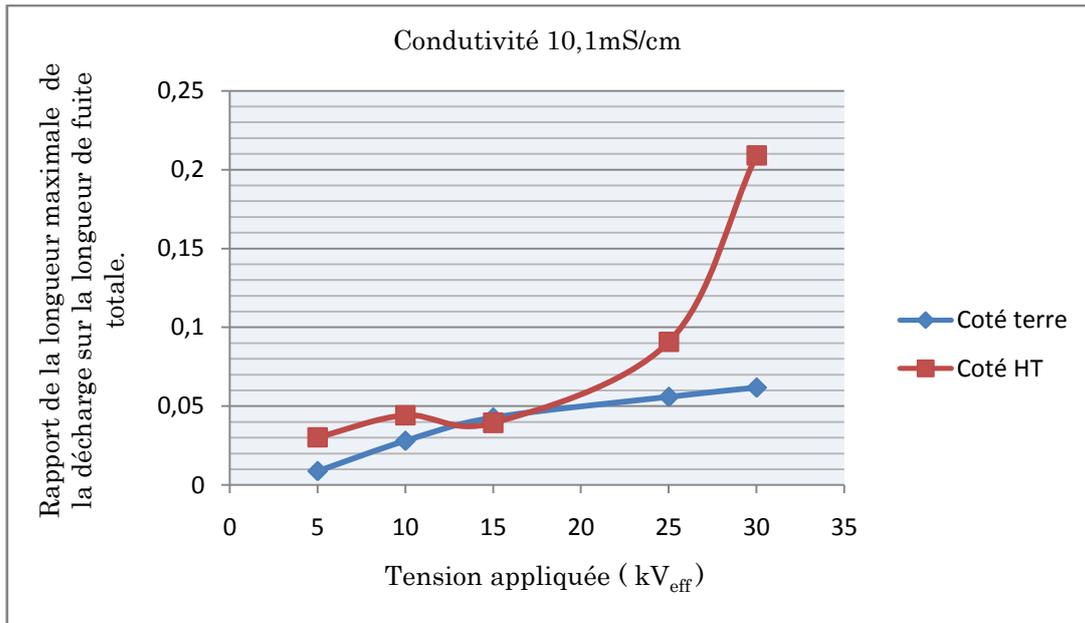
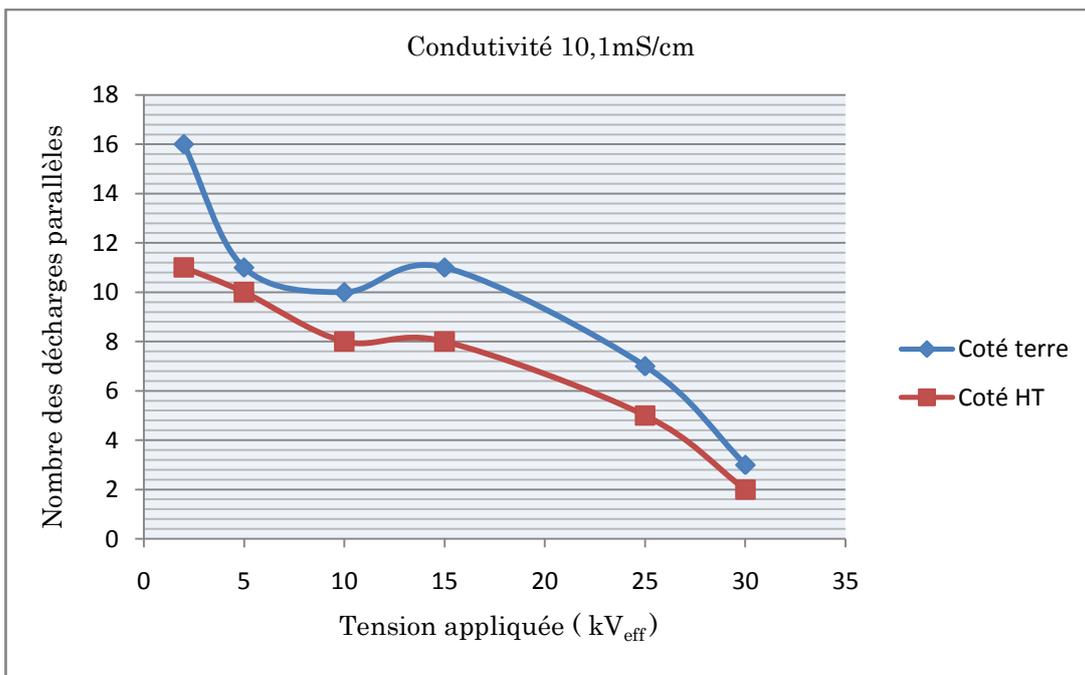


Figure IV.19 : Photos des longueurs critiques : (a) conductivité $10 \mu\text{S/cm}$, (b) conductivité $190 \mu\text{S/cm}$, (c) conductivité $710 \mu\text{S/cm}$, (d) conductivité $1,2 \text{ mS/cm}$, (e) conductivité $10,1 \text{ mS/cm}$.



(a)



(b)

Figure IV.24 : Conductivité 10,1 mS/cm : (a) Rapport de la longueur maximale de la décharge parallèle sur la longueur de fuite totale en fonction de la tension, (b) Nombre des décharges parallèles en fonction de la tension.

IV-6-Conclusion :

Dans ce chapitre concernant l'étude du comportement du modèle plan dans des conditions de pollution différentes, la tension de contournement diminue dans le cas de la pollution uniforme avec l'augmentation, soit de la conductivité de la surface polluée, soit avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée dans le cas de la pollution non-uniforme. Le cas de la pollution de la couche centrale présente une rigidité diélectrique plus importante que le cas où la couche polluée est du côté terre ou du côté HT car l'effet de conduction est moins important que ces deux cas qui peut être similaire à la présence de barrières isolante qui remplacent les intervalles d'air couche polluée-électrode. Les décharges parallèles à la surface de l'isolateur se forment lorsque 85,6% de la distance inter-électrode est polluée, ce qui correspond à la plus petite tension de contournement pour les trois cas de la pollution non-uniforme.

L'étude du courant de fuite montre que l'augmentation de son amplitude maximale est proportionnelle à la conductivité du milieu lorsque la pollution à la surface du plan est uniforme et avec l'accroissement de la tension appliquée. La diminution de la valeur du courant de fuite est causée par l'assèchement de quelques zones du plan provoqué par l'activité des décharges parallèles à la surface de l'isolateur. Cet assèchement est plus important avec l'augmentation de la conductivité volumique du milieu et de la tension appliquée (conductivité 1,2 mS/cm et 10,1 mS/cm). Pour la pollution non-uniforme avec une conductivité de 1,2 mS/cm, l'amplitude du courant de fuite croît avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée pour les trois cas ; celle-ci est la plus faible lorsque la couche centrale du plan est polluée. La création des décharges à la surface se fait lorsque 85,6% de la longueur de fuite est polluée ; elles participent à l'augmentation du courant de fuite de manière exponentielle.

Le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée a été d'une grande utilité pour comprendre le comportement du circuit équivalent du modèle plan ; sa valeur diminue avec l'augmentation de la conductivité du milieu indiquant que l'isolateur a un effet résistif dominant. Elle augmente pour les grandes conductivités (10,1 mS/cm) à cause de l'assèchement progressif de l'isolateur plan, qui augmente l'effet capacitif de l'isolateur. Pour la pollution non-uniforme, l'effet résistif de l'isolateur augmente avec l'élargissement de la couche polluée et cela pour les trois configurations. Dans le cas où il y a amorçage des décharges parallèles, la valeur du déphasage courant-tension chute subitement, marquant la diminution de l'effet capacitif. L'augmentation de la tension provoque une légère diminution du déphasage lorsque la couche est polluée du côté terre, HT et au centre.

Chapitre V :

*Energie des harmoniques du
courant de fuite et de la tension.*

V-1-Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'étude des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite. Pour cela nous calculons l'énergie des harmoniques les plus significatifs (1^{er}, 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème}), à l'aide de l'analyse spectrale avec le périodogramme de Welch.

Le calcul de l'énergie des harmoniques de tension et ceux du courant de fuite est effectué à l'aide d'un programme écrit sous MATLAB®.

L'objectif de cette étude est de comprendre d'une part, la cause des distorsions observées sur le courant de fuite et la tension appliquée et d'autre part, d'évaluer la quantité d'énergie du courant de fuite qui est responsable de l'évaporation de l'eau en présence des décharges électrique à la surface du plan. Cela a pour but de diagnostiquer la sévérité de pollution en fonction des harmoniques de courant ayant une énergie significative.

V-2-Analyse de la tension appliquée :

Cette analyse a pour but de déterminer les harmoniques présents dans l'onde de tension qui agissent de manière directe sur le signal du courant de fuite en fonction de l'état de surface de l'isolateur plan.

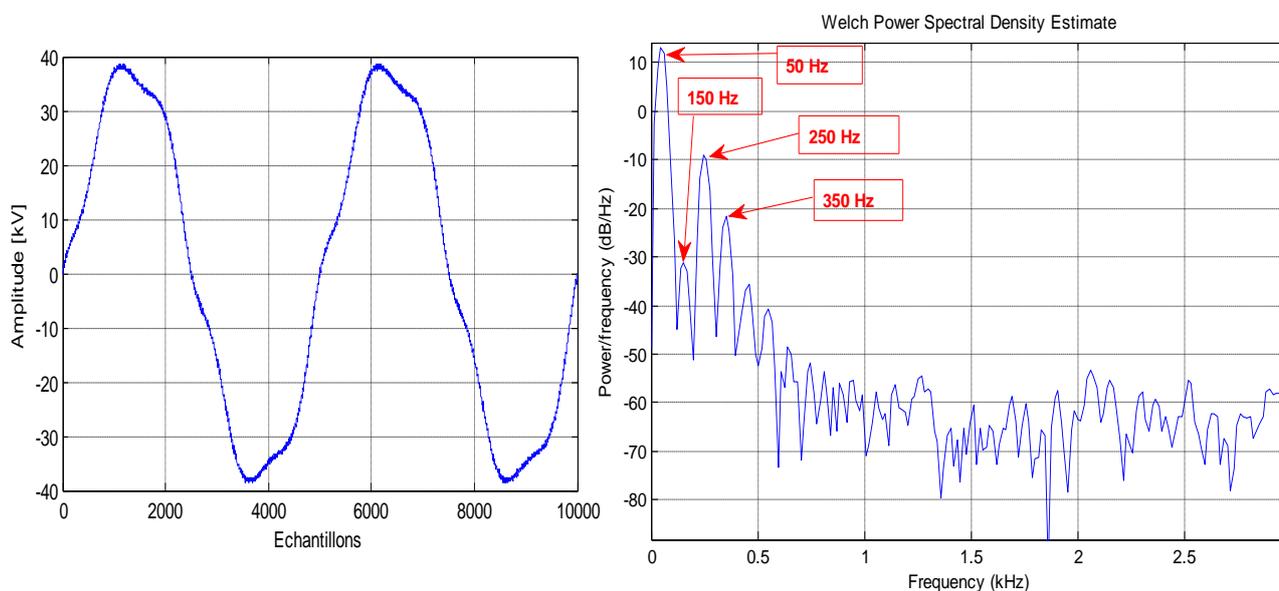


Figure V.1 : Représentation du signal de la tension en aval du transformateur (à gauche) et de son spectre de Welch (à droite).

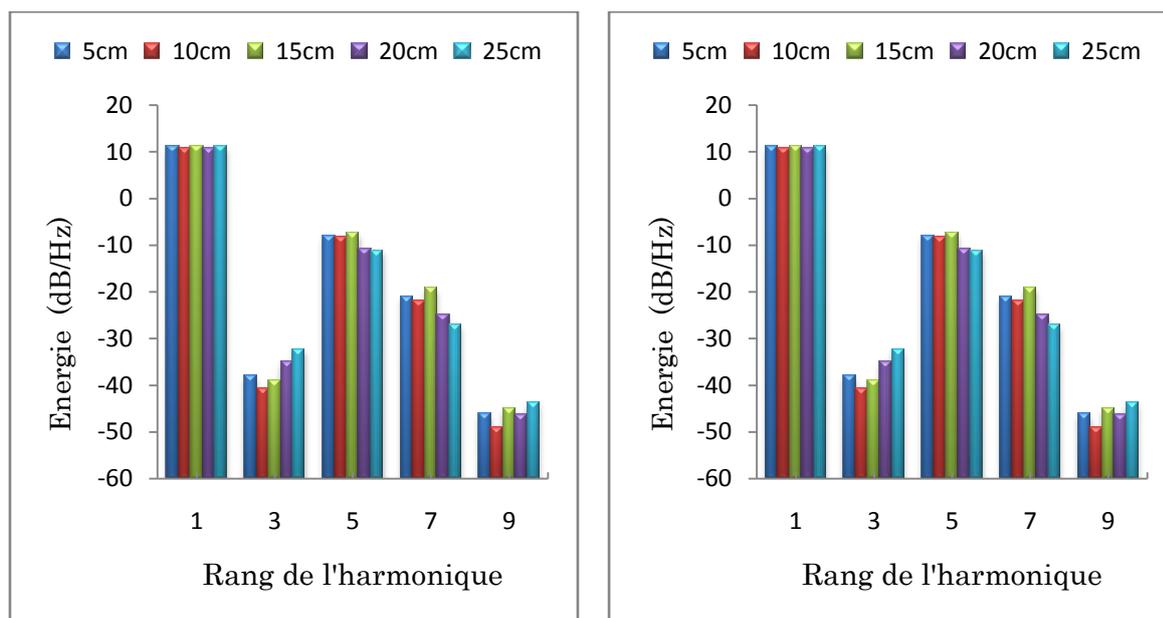
V-4-1-4-Tension appliquée 21 kV_{eff}:

Figure V.10 : *Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à 21 kV_{eff} du côté HT.*

Pour ce palier et pour les harmoniques de tension, l'énergie du fondamental augmente d'avantage par rapport à 15 kV_{eff} en étant constante pour les différentes couches. L'énergie du 5^{ème} et du 7^{ème} varie de la même manière que le niveau précédent. L'énergie du 3^{ème} augmente à partir de la conductivité 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le 9^{ème} harmonique varie de manière aléatoire. Le 5^{ème} harmonique est présent dans le signal de la tension en grande proportion.

Pour le courant de fuite, le fondamental augmente en fonction de la largeur de la couche polluée avec une énergie plus importante que celle du palier précédent. L'énergie des 3^{ème}, 5^{ème} et 9^{ème} harmoniques augmente avec la l'élargissement de la couche polluée. Le 7^{ème} harmonique affiche une énergie constante sauf pour la couche 15 cm où son énergie est maximale. Le 5^{ème} reste encore dominant avec une proportion de plus de 70% par rapport au fondamental.

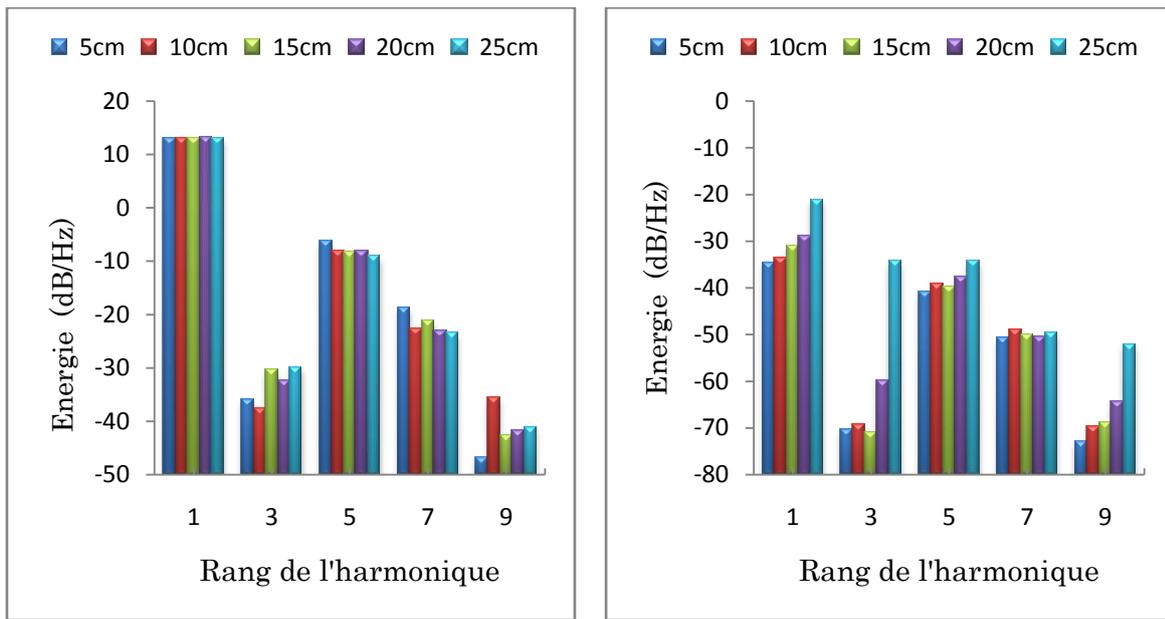
V-4-1-5-Tension appliquée 27 kV_{eff}:

Figure V.11 : *Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à 27 kV_{eff} du côté HT.*

Pour les harmoniques de tension, nous constatons que l'énergie du fondamental et des 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques est pratiquement constante sauf pour la couche 5 cm où ces deux derniers sont plus élevés que les autres couches. L'énergie des 3^{ème} et 9^{ème} harmoniques est aléatoire pour les cinq couches.

Pour le courant de fuite, Le fondamental et 9^{ème} harmonique croient avec la progression de la couche polluée. L'énergie du 7^{ème} est constante pour toutes les couches. Les 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques augmentent également en fonction de la largeur de la couche. La couche 25 cm est marquée par l'amorçage des décharges parallèles à la surface de l'isolateur qui est confirmé par une énergie très élevée du 3^{ème} et du 5^{ème} par rapport aux harmoniques de rang supérieur. Nous constatons également que l'occurrence des décharges est accompagnée par l'élévation des harmoniques de hautes fréquences dont l'énergie dépasse celle des harmoniques 7 et 9 (Figure V.12).

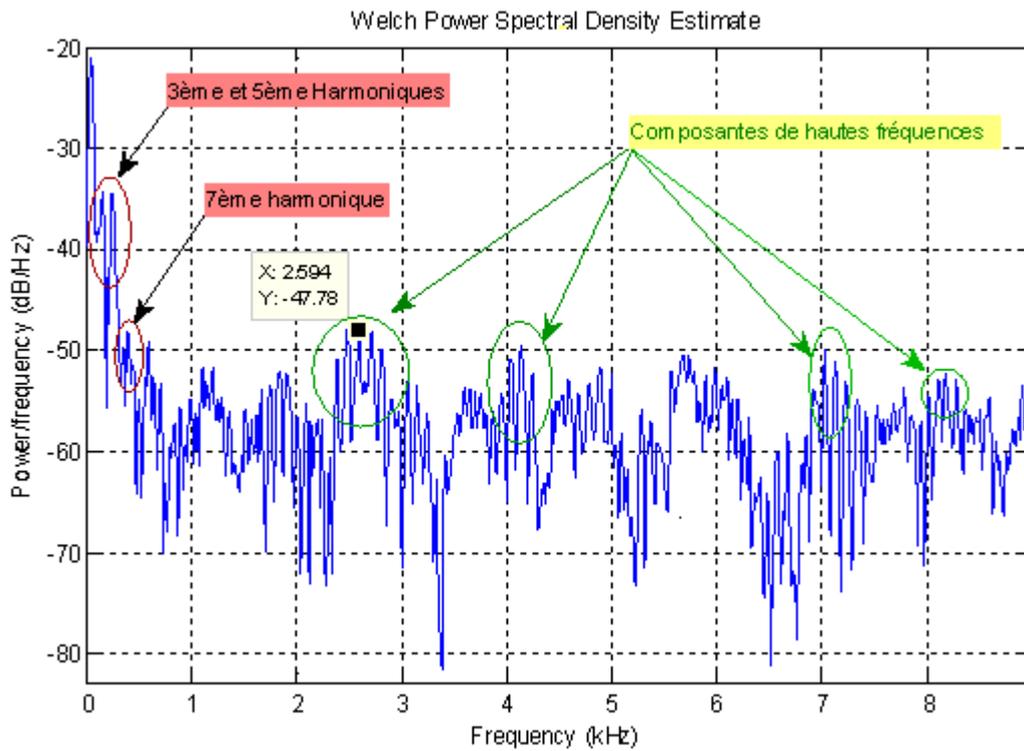


Figure V.12 : Spectre de Welch du courant de fuite pour 25 cm du côté HT avec une tension appliquée de $27 kV_{eff}$. (Illustration du fait que les composantes de haute fréquence possèdent une grande énergie par rapport au 7^{ème} et 9^{ème} harmoniques durant la décharge).

Le spectre de Welch montre clairement que l'énergie du fondamental et du 3^{ème} harmonique est la plus grande avec une modeste contribution des harmoniques de haute fréquence du courant de fuite (à partir de 1.5 kHz). Cette élévation est causée par l'occurrence des décharges parallèles qui contribuent à cet apport énergétique. Le même phénomène est observé pour la pollution uniforme et lorsqu'il commence à y avoir un assèchement de la surface polluée.

Cela nous amène à conclure que les décharges parallèles en pollution uniforme, contribuent de manière directe à l'augmentation du courant et donc à l'assèchement rapide du modèle vue la grande quantité d'énergie cédée par la décharge électrique au courant de fuite en particulier pour le fondamental et le 3^{ème} harmonique.

V-4-3-4-Tension appliquée $21kV_{eff}$:

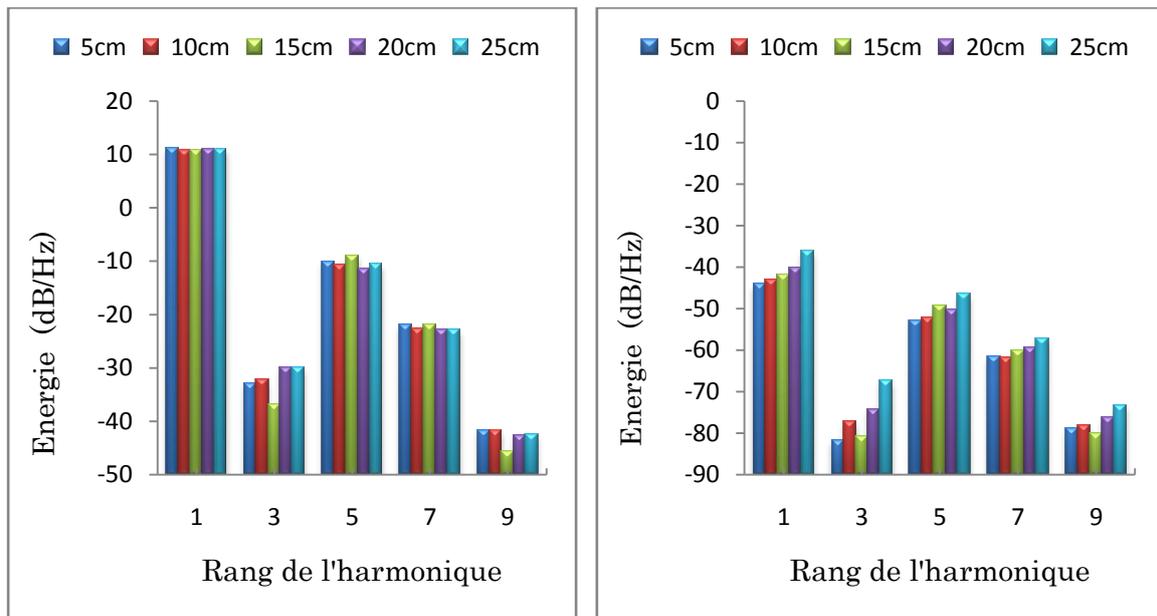


Figure V.22 : Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à $21 kV_{eff}$ pour la couche centrale.

V-4-3-5-Tension appliquée $40kV_{eff}$:

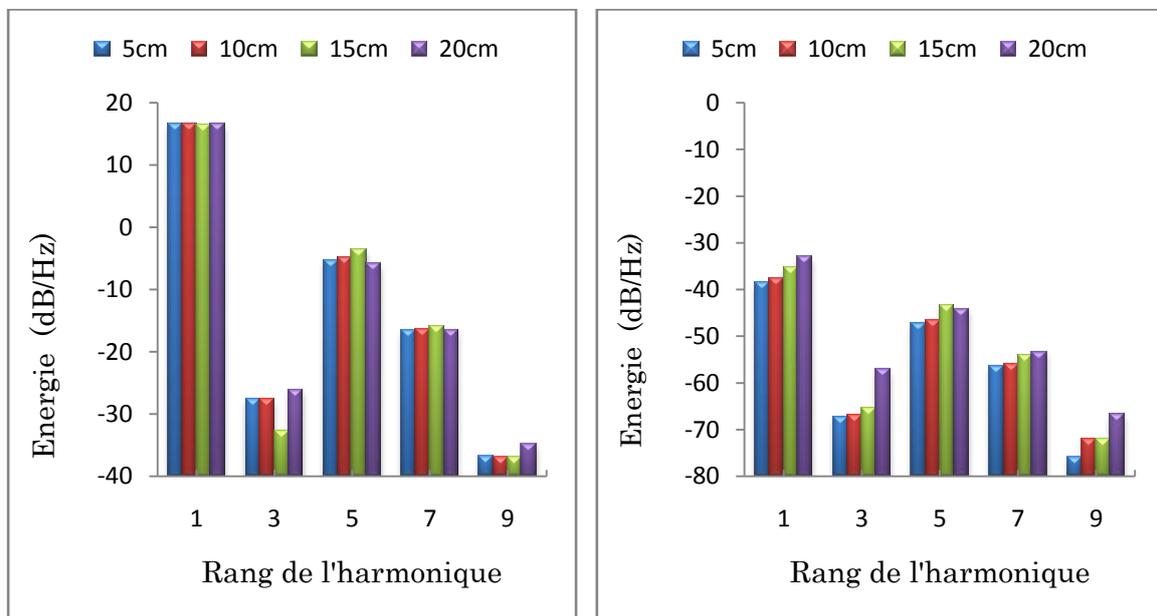


Figure V.23 : Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à $40 kV_{eff}$ pour la couche centrale.

Pour les différents paliers de tension et pour les harmoniques de tension, le fondamental et le 5^{ème} harmonique gardent toujours la même énergie pour toutes les couches avec une amplitude plus élevée en fonction de l'augmentation du niveau de tension appliqué. L'énergie des 3^{ème} et 7^{ème} harmoniques augmente en fonction de la largeur de la couche conductrice pour le niveau 9kV_{eff} mais se stabilise pour les paliers de tension supérieurs. L'énergie du 9^{ème} harmonique est caractérisée par une diminution soudaine pour la couche 25 cm.

Pour le courant de fuite, tous les harmoniques ont une énergie qui augmente avec l'agrandissement de la couche conductrice. L'harmonique 5 est présent en grande proportion par rapport au fondamental en comparant avec les harmoniques 3,7 et 9.

V-4-3-6- Etude de la couche 25 cm pour une tension de 36 kV_{eff} :

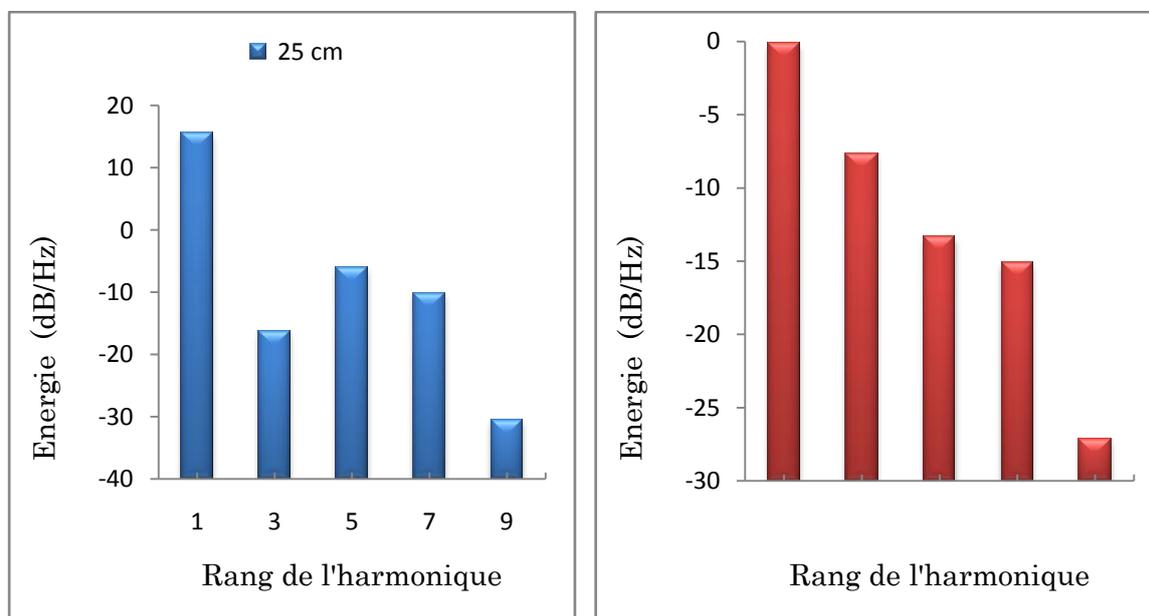


Figure V.24 : Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) pour la couche centrale de largeur 25 cm à 36 kV_{eff}.

L'étude de cette couche est effectuée séparément de celle des autres pour deux raisons principales :

- Le niveau de tension appliquée n'est pas le même que pour les autres couches conductrices à cause de la tension de contournement qui est la plus faible.
- Pour faire apparaître l'effet des décharges parallèles sur la déformation du signal du courant de fuite.

Pour les harmoniques de tension, nous remarquons que le fondamental possède la plus grande énergie suivie par le 5^{ème} harmonique dont la proportion par rapport au fondamental est de 60 %.

Pour le courant de fuite, le fondamental a la plus grande énergie, secondé par le 3^{ème} harmonique qui affiche une amplitude plus importante que ceux de rang supérieur. La figure V.25 montre la répartition d'énergie du signal du courant de fuite en présence des décharges électriques.

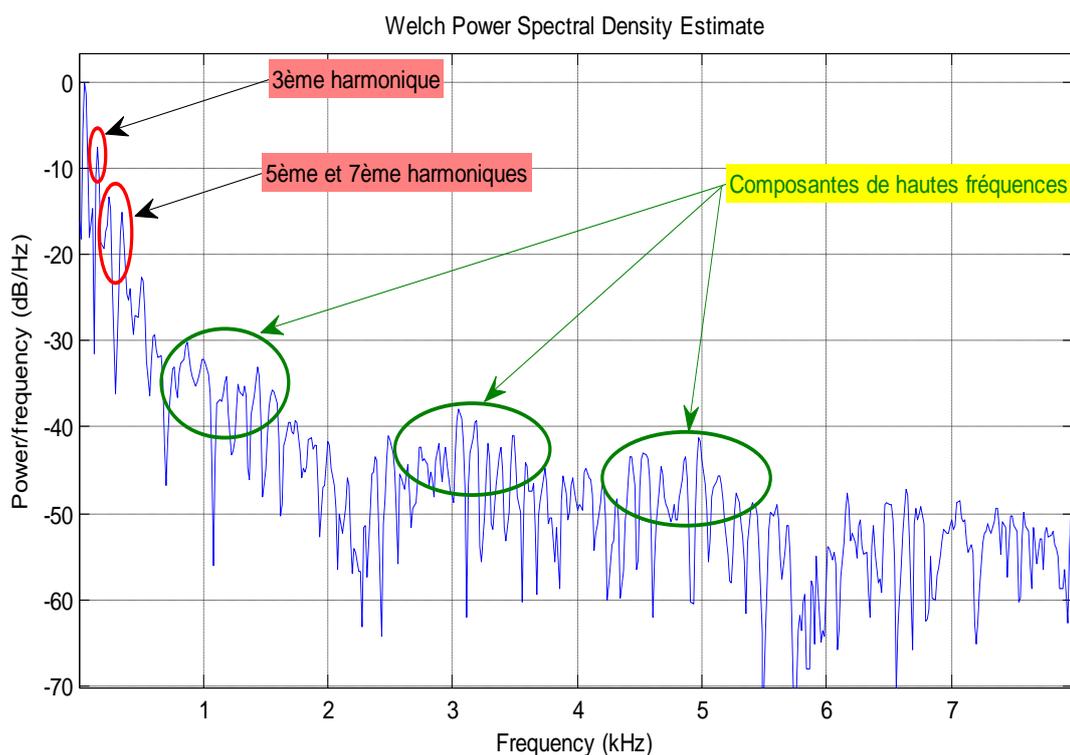


Figure V.25 : *Spectre de Welch du courant de fuite pour une largeur de 25 cm pour la couche centrale, pour une tension appliquée de 36 kV_{eff} (durant la décharge).*

V-5-Conclusion :

Cette étude nous a permis de conclure que l'énergie des harmoniques du courant de fuite augmente avec la sévérité de la pollution en comparant avec le cas sec, en particulier pour les 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques pour les niveaux de tension étudiés. L'occurrence des décharges électriques dans les zones sèches à la surface de l'isolateur, est détectée par l'augmentation des énergies des 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques par rapport à ceux de rang supérieur. Ces observations ont été également faites par d'autres chercheurs sur des isolateurs en polymère [87]. Les harmoniques présents dans le signal de la tension proviennent en grande partie du transformateur d'essai à cause de l'effet capacitif inter-spores créé par l'isolation entre celles-ci, qui constitue avec les inductances de fuite des circuits séries résonnants à des fréquences proches de celles provenant du réseau, en plus de la non-linéarité du circuit magnétique du transformateur [88]. La distorsion du signal de la tension est causée en grande partie par les 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques. Nous avons aussi pu constater que l'occurrence des décharges électriques accentue la distorsion de la tension appliquée, à cause des chutes de tension observées au niveau de la crête. L'élévation du niveau de tension participe à l'augmentation d'énergie des harmoniques de tension et par conséquent de ceux du courant de fuite qui traverse la surface isolante.

L'assèchement du plan pour les grandes conductivités (1,2 mS/cm et 10,1 mS/cm) est plus rapide car l'énergie apportée par les décharges fait augmenter l'amplitude des 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques en plus du fondamental. Cette énergie est beaucoup plus importante que celle pour les faibles conductivités (10 μ S/cm et 190 μ S/cm).

Pour la pollution non-uniforme du côté HT, nous pouvons conclure que le diagnostic de l'augmentation de la largeur de la couche polluée peut se faire en se basant sur l'augmentation d'énergie des 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques pour les niveaux de tension inférieurs à 21 kV_{eff}. En ce qui concerne les niveaux de tension supérieurs (21 et 27 kV_{eff}) le diagnostic peut se faire en se basant sur l'énergie des 3^{ème} et 9^{ème} harmoniques. L'onde de tension ne nous permet pas de faire un diagnostic correct de l'état de surface de l'isolateur car le taux d'harmoniques présents dans le signal dépend du réseau électrique ainsi que du matériel de laboratoire utilisé.

L'amorçage des décharges électriques pour les grands niveaux de tension (27 kV_{eff} et plus) cause une augmentation brusque de l'amplitude du courant de fuite qui a pour effet d'amplifier de façon significative l'énergie des 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques. La présence des décharges peut aussi être détectée grâce à l'élévation d'énergie des composantes fréquentielles supérieures au 11^{ème} harmonique.

Pour la pollution du côté terre, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut être fait en se basant sur l'énergie du fondamental et des 5^{ème} et 9^{ème} harmoniques du courant de fuite, pour les faibles niveaux de tension ($< 3kV_{\text{eff}}$). Pour les niveaux de tension supérieurs, l'augmentation de la largeur de la couche polluée peut être déduite de l'augmentation d'énergie des 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques. Les décharges électriques à la surface de l'isolateur, contiennent une quantité d'énergie considérable emmagasinée principalement dans les 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques du courant de fuite.

Dans le cas où la couche conductrice est au centre du plan, l'augmentation de la largeur de la couche polluée peut être détectée grâce à l'élévation d'énergie des 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques de courant pour les faibles niveaux de tension ($< 3kV_{\text{eff}}$). Pour les niveaux de tension supérieurs, le même diagnostic peut être fait via l'augmentation d'énergie de tous les harmoniques du courant de fuite.

L'amorçage des décharges parallèles dans les intervalles d'air est détecté de la même manière que la pollution uniforme par le 3^{ème} harmonique, caractérisé par une grande énergie par rapport aux harmoniques de rang supérieur.

Les 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques peuvent être utilisés pour différencier la pollution uniforme de la pollution non-uniforme. En effet, lorsqu'il s'agit d'une pollution uniforme, les 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques ont une énergie plus importante par rapport à ceux de rang supérieur. Pour la pollution non-uniforme, les 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques sont dominants.

En définitif, l'activité des décharges parallèles à la surface du modèle est, pour toutes les conductivités étudiées un signe précurseur d'un contournement probable. Afin d'empêcher ce contournement, une surveillance de l'amplitude du fondamental et du 3^{ème} harmonique du courant de fuite constitue un bon outil de diagnostic in situ. En effet, lorsque l'énergie du 3^{ème} harmonique est très élevée et proche de celle du fondamental le contournement de l'isolateur est imminent. Cette énergie est d'autant plus importante avec l'augmentation de la conductivité du milieu pour le cas uniforme, ou bien avec l'élargissement de la couche polluée pour le cas non-uniforme avec une conductivité de 1.2 mS/cm, que se soit du côté HT, terre ou au centre du modèle.

Chapitre VI :

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

VI-1-Introduction :

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

VI-2-Pollution uniforme :

Pour ce cas, un problème majeur se pose qui est de différencier une onde de tension déformée par les harmoniques du réseau d'une autre, qui subirait des distorsions par les décharges parallèles. Pour cela, la comparaison est faite par rapport à une onde de tension parfaitement sinusoïdale et une autre déformée par les harmoniques.

Le traitement des signaux de la tension appliquée est effectué grâce au logiciel MATLAB® qui calcule les coefficients de la CWT et la fréquence correspondante à chaque échelle.

VI-2-4-Conductivité 1,2 mS/cm :

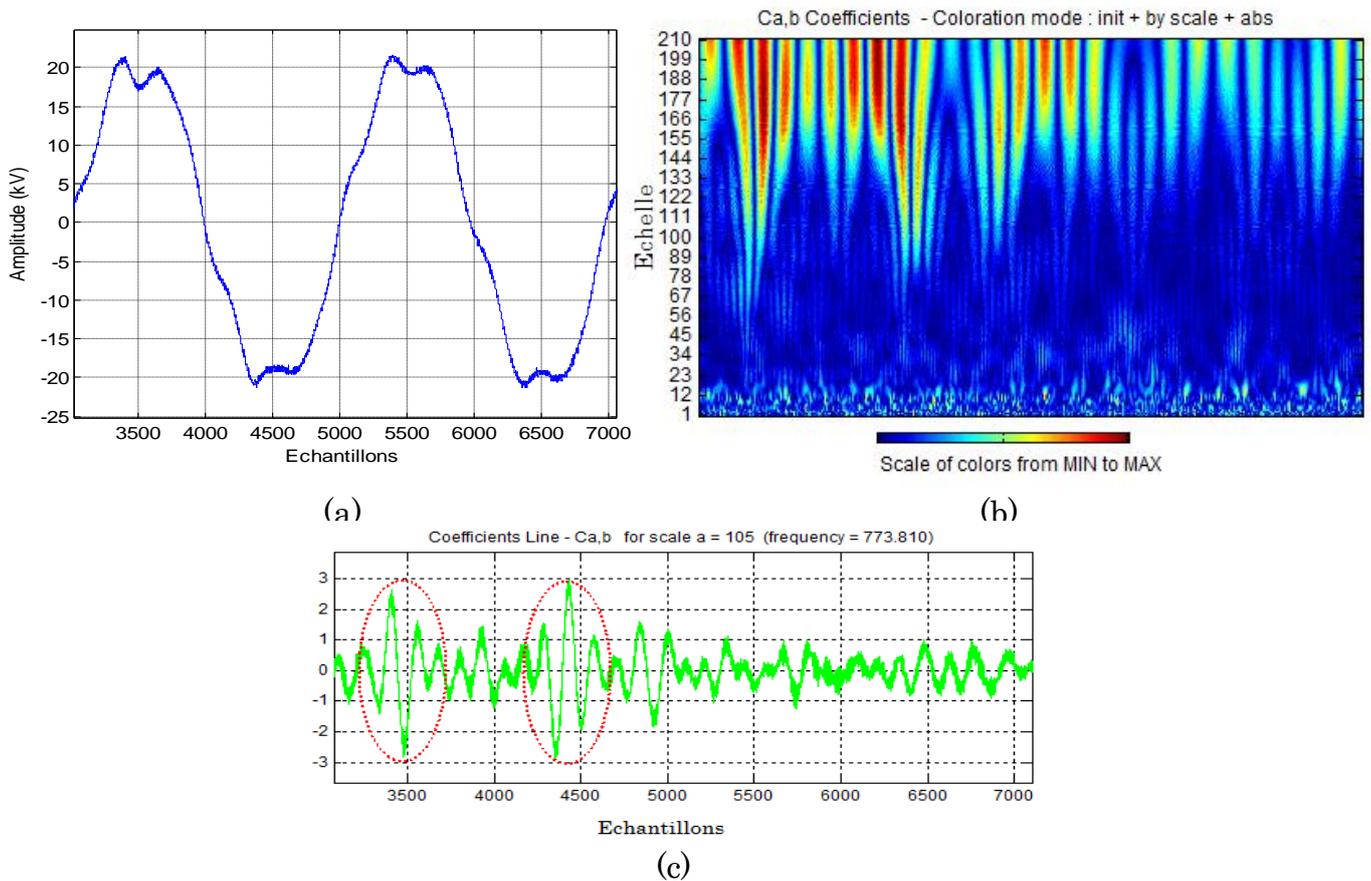
Tension appliquée 15 kV_{eff} :

Figure VI.4 : Conductivité 1,2 mS/cm : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff}; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff}, (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$.

Pour cette conductivité élevée, les perturbations gagnent pratiquement toutes les régions du signal de la tension appliquée. Le scalogramme indique que les coefficients de la CWT sont très élevés pour des échelles encore plus faibles par rapport à la conductivité précédente ; c'est-à-dire que des perturbations de plus hautes fréquences apparaissent en plus de celles à faibles fréquences. Ceci peut expliquer l'assèchement encore plus rapide dû à la diminution de la résistance de la couche polluée en présence de solution hautement conductrice. Les coefficients de la CWT calculés pour l'échelle $a = 105$ montrent une corrélation de plus en plus évidente entre l'ondelette de Morlet et la transformée continue de la tension appliquée.

VI-2-5-Conductivité 10,1 mS/cm:

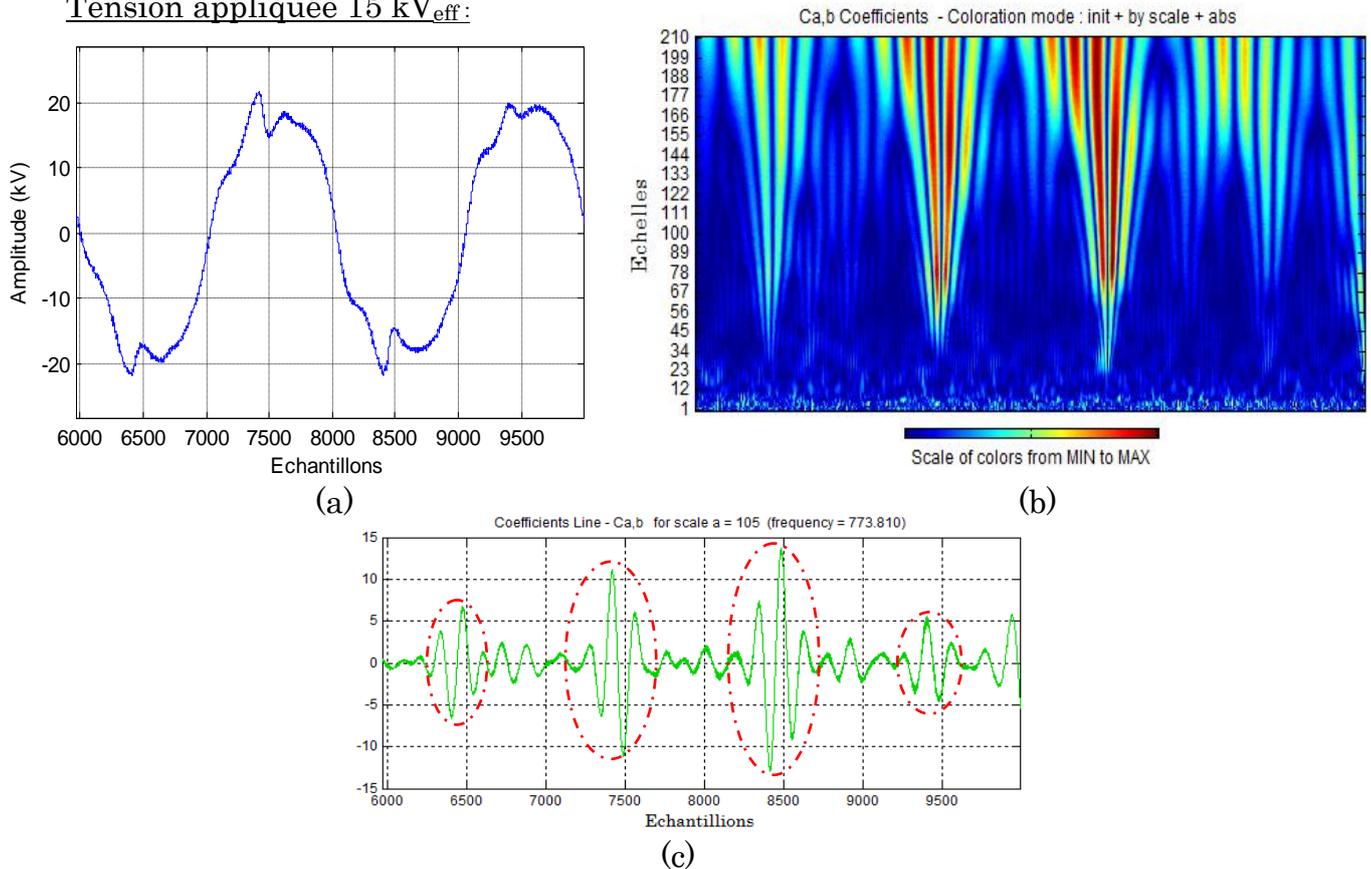
Tension appliquée 15 kV_{eff}:

Figure VI.5 : Conductivité 10,1 mS/cm : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff}; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff}; (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$.

Pour cette très haute conductivité, la cassure de l'onde de tension est très visible pour ce niveau de tension à cause de l'assèchement ultra rapide de la plaque qui intensifie les zones sèches à la surface de l'isolateur. Le champ électrique est très élevé dans ces espaces, ce qui a pour effet de court-circuiter les micro-capacités existantes et par conséquent une chute de tension encore plus importante. L'analyse par le scalogramme montre que l'activité des décharges électriques induit des déformations très sévères sur la tension appliquée qui va jusqu'aux très hautes fréquences (échelle 23). Les coefficients de la CWT calculés pour $a = 105$ montrent d'avantage de corrélation entre la transformée en ondelette de la tension et l'ondelette de Morlet avec une amplitude plus élevée, qui traduit la sévérité des chutes de tension observée sur le signal.

VI-3-Conclusion sur l'analyse par la CWT :

D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de tension, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut se faire 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.

Concernant l'analyse par le scalogramme, l'augmentation de la conductivité de la couche polluée est détectée grâce aux décharges qui ont lieu à la surface de l'isolateur. Cette augmentation peut être observée par la couleur des coefficients qui spécifient leurs valeurs selon qu'elles soient faibles ou élevées. Un coefficient élevé pour une grande échelle indique une oscillation du signal à basse fréquence et inversement pour une échelle de plus petite valeur. Dans notre cas, la fréquence des perturbations occasionnées sur la tension augmente avec la sévérité de la conductivité du milieu. Cela montre que le diagnostic de l'état de surface de l'isolateur est possible grâce à la tension appliquée mais pendant l'occurrence des décharges électriques et pour une pollution uniforme.

Ce diagnostic peut également être fait à travers une échelle bien déterminée (105 dans notre cas) qui nous renseigne sur la pollution du milieu grâce aux coefficients de cette même échelle. Lorsque la corrélation entre la CWT du signal et l'ondelette analysante est quasi inexistante avec une faible amplitude, la conductivité de la surface est faible (10 et 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette corrélation est autant plus apparente avec l'augmentation de la conductivité volumique qui fait augmenter l'amplitude des coefficients de la CWT ainsi que le nombre d'oscillations qui ressemblent beaucoup à celles de l'ondelette choisie (Morlet dans notre cas).

VI-4-Pollution non-uniforme :

Pour les trois cas, le courant de fuite subit une décomposition par l'ondelette de **Daubechies 4** jusqu'au niveau 10. Les bandes de fréquences correspondantes à chaque détail sont montrées au tableau VI.I.

Les valeurs de la déviation standard sont calculées pour les détails correspondants afin d'identifier les transitions d'énergie présentes dans le signal du courant de fuite pour chaque largeur de la couche polluée. La déviation standard peut être considérée comme une mesure de la quantité d'énergie présente dans un signal de moyenne nulle [82]. Elle est donnée par l'expression :

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

d_n : correspond à un échantillon du détail d.

δ : est la déviation standard du signal d.

m_n : est la moyenne du signal.

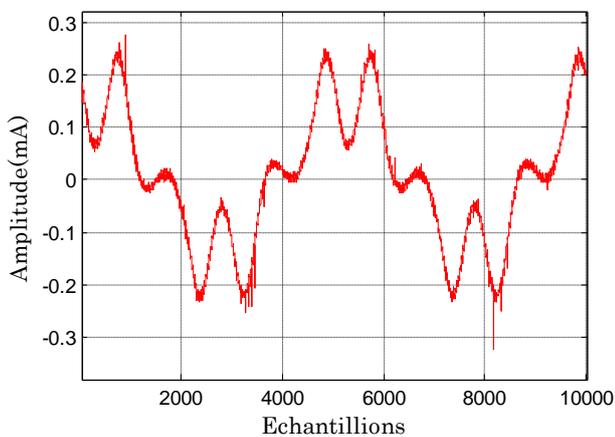
N : correspond à la taille du signal.

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

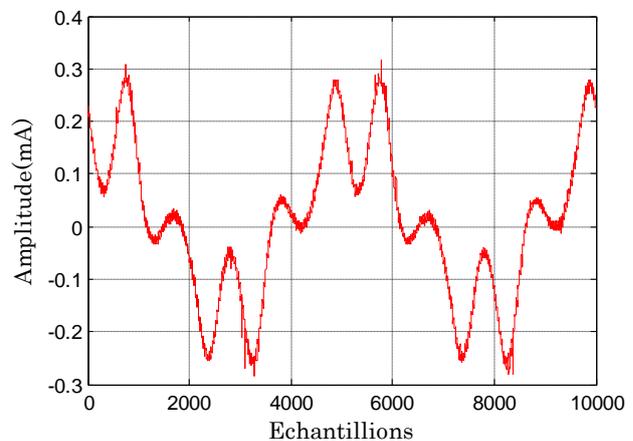
Tableau VI.I : *Bandes fréquentielles des détails de la décomposition du courant de fuite par la DWT.*

VI-4-1-Pollution côté HT :

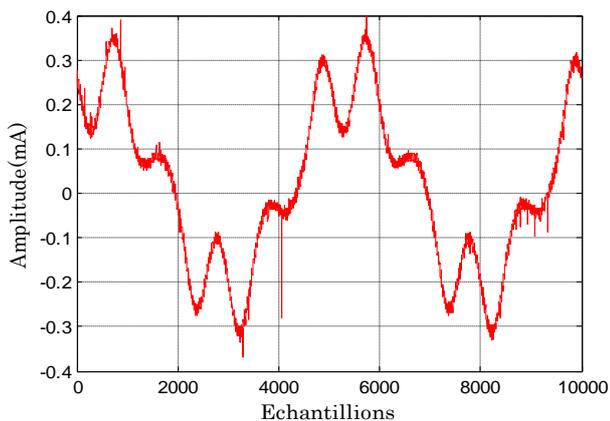
La figure VI.6 montre les différentes formes d'onde obtenues pour les cinq largeurs de la couche conductrice à 27 kV_{eff}. Nous remarquons que la distorsion de ces signaux est très importante et due à l'amplification des harmoniques de tension par l'intermédiaire de la surface de l'isolateur partiellement polluée. Nous constatons également la présence de pics sur tout le signal du courant de fuite ; leur amplitude augmente avec l'élargissement de la couche polluée. Pour la couche 25 cm, les décharges électriques ont lieu à la surface de l'isolateur et elles déforment davantage la forme du courant de fuite et augmentent l'amplitude des pics. L'augmentation de l'amplitude de ces pics peut être interprétée par la diminution de la résistance de la couche polluée sur l'isolateur lorsque sa largeur croît, ce qui rend l'occurrence d'une décharge de contournement très probable.



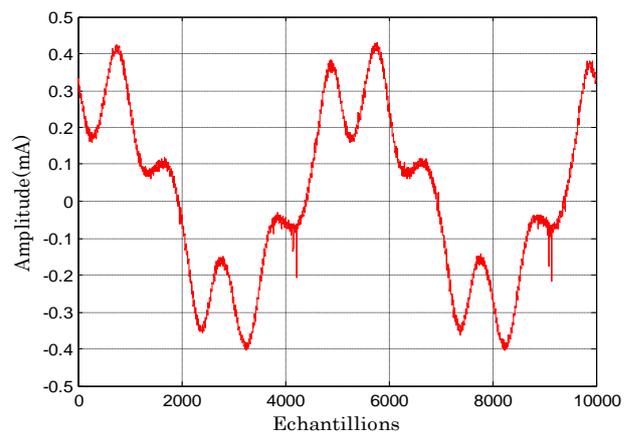
(a)



(b)



(c)



(d)

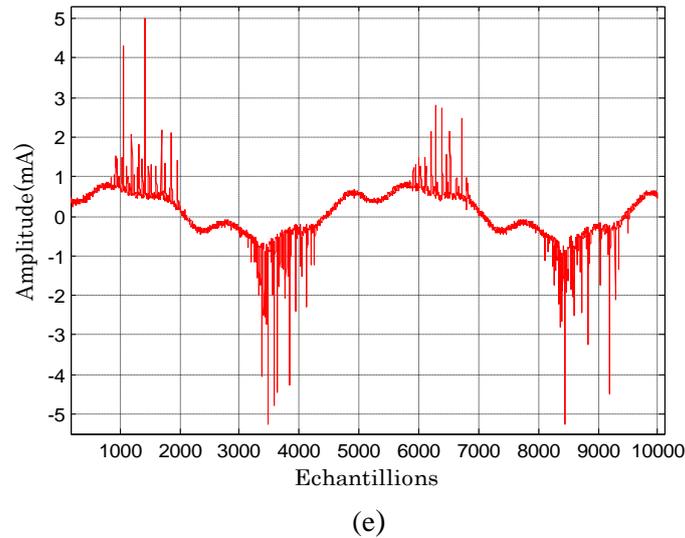


Figure VI.6 : Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté HT à $27\text{ kV}_{\text{eff}}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.

La décomposition du courant de fuite par la DWT permet d'identifier les composantes fréquentielles qui peuvent servir au diagnostic de l'état de surface. La figure VI.7 représente la valeur de la déviation standard pour chaque détail correspondant. 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®.

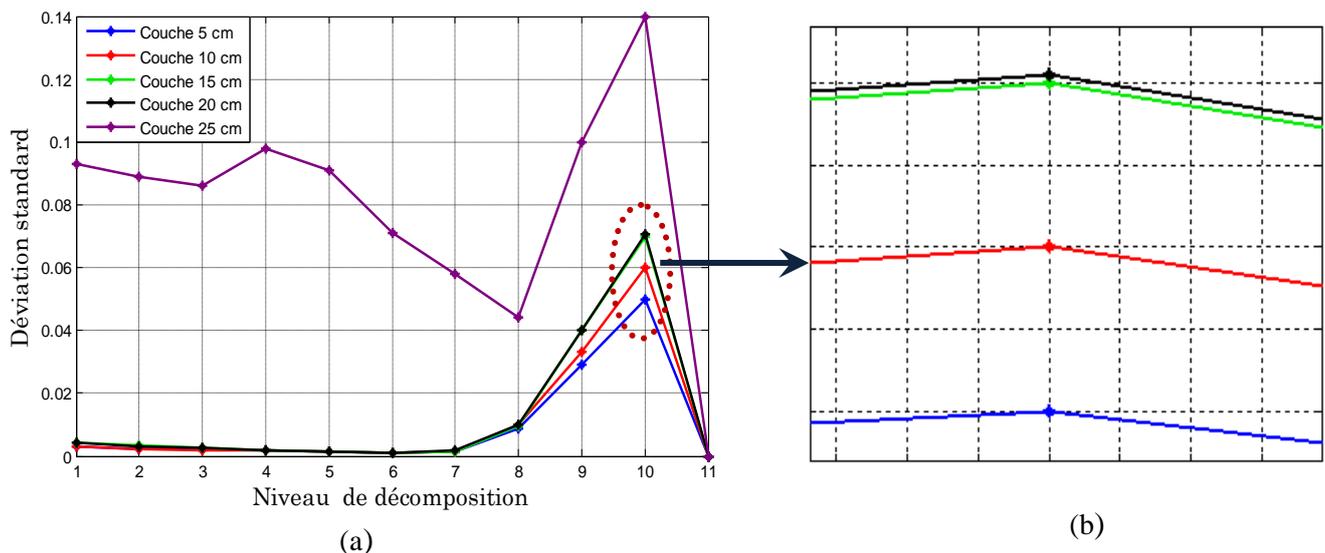


Figure VI.7 : Côté HT : (a) représentation de la déviation standard pour chaque détail, (b) Agrandissement pour le détail 10 (Illustration du fait que l'énergie du détail 10 pour la couche 20 cm est légèrement plus élevée que celle du détail 10 pour la couche 15 cm).

D'après la représentation précédente, nous remarquons que la composante D_{10} a une énergie qui augmente avec l'agrandissement de la couche conductrice. En réalité le détail D_{10} contient l'harmonique 3 qui a une très grande énergie pour la couche 25 cm à cause des décharges parallèles ayant lieu à la surface du plan. Cela confirme une fois de plus que ce phénomène est en relation avec l'harmonique 3 du courant de fuite. Ainsi, le détail D_{10} pourrait éventuellement servir au diagnostic de la pollution du modèle plan lorsque celle-ci débute du côté HT. Les variations du détail D_{10} pour chaque largeur de la couche polluée sont montrées à la figure VI.8.

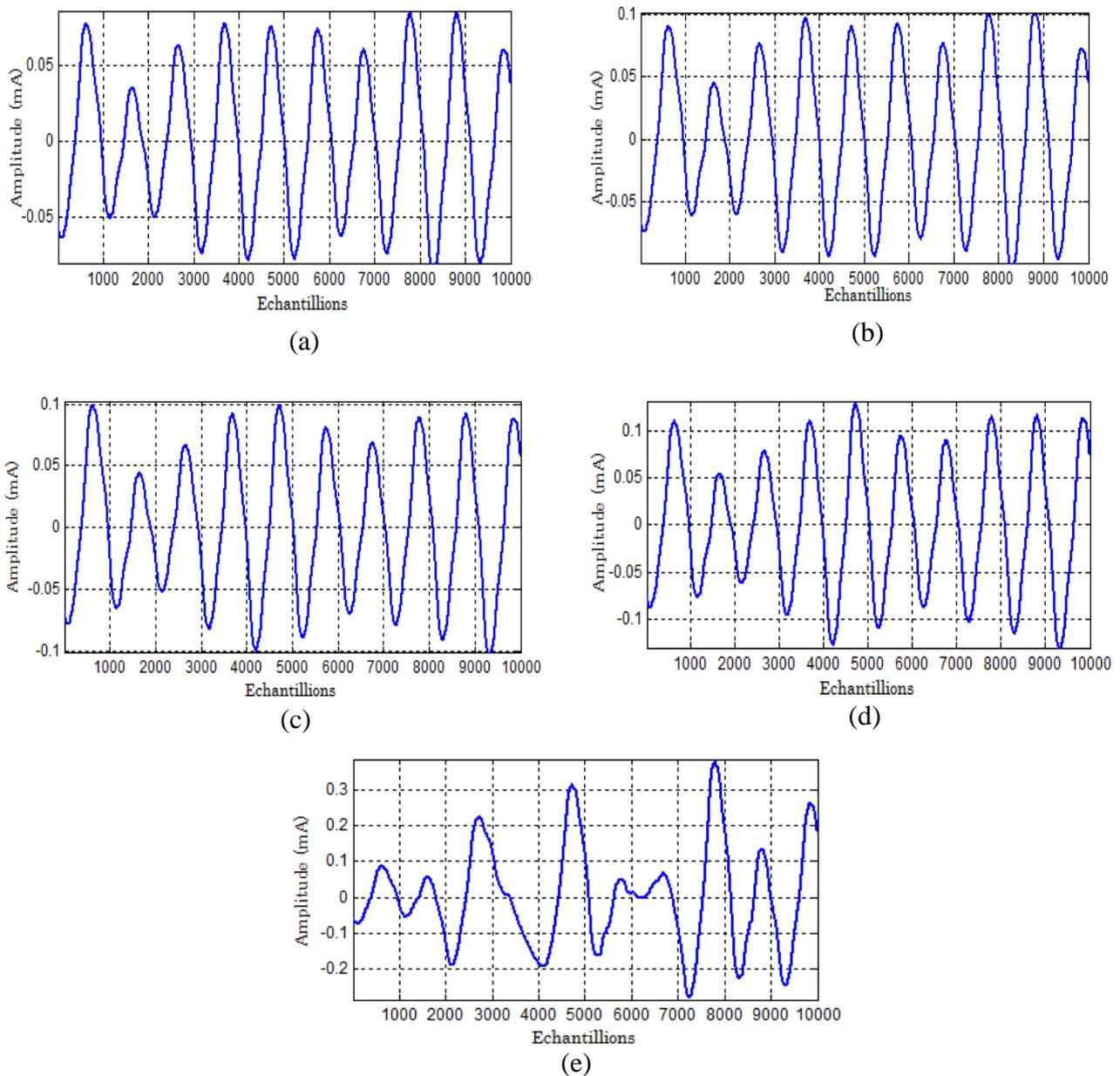
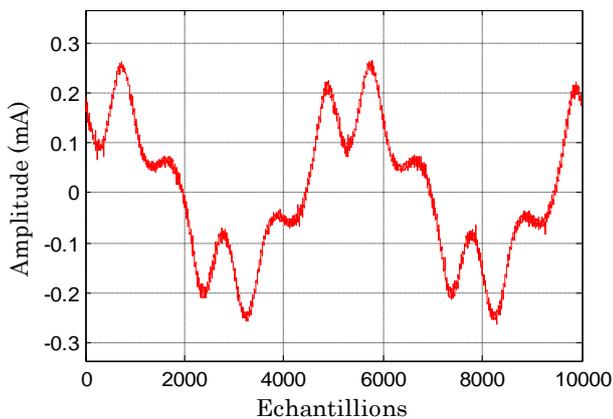


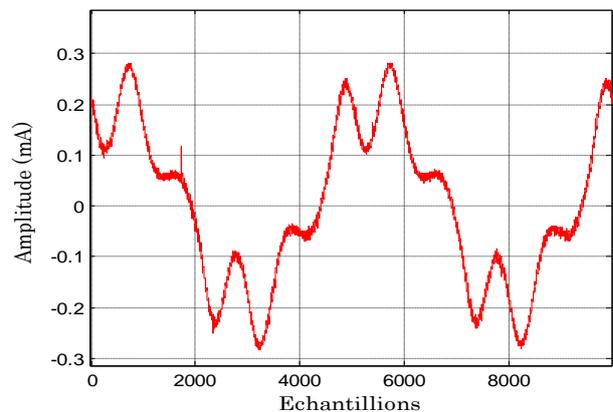
Figure VI.8 : Evolutions du détail D_{10} à $27 \text{ kV}_{\text{eff}}$ pour la pollution du côté HT: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.

VII-4-2-Pollution du côté terre :

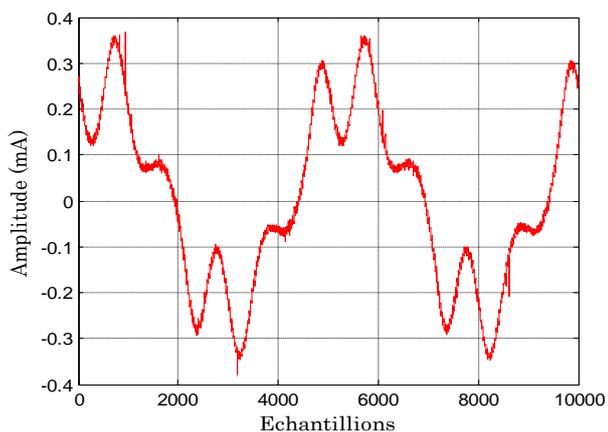
Pour cette configuration, les formes d'ondes du courant de fuite pour chaque largeur de la couche polluée sont pratiquement similaires à celles obtenues pour le côté HT. Toutefois, les pics présents sur les différents signaux ont une amplitude légèrement plus importante par rapport au côté HT. La figure VI.9 montre une forme d'onde typique lorsque les décharges ont lieu dans les intervalles d'air formés par les électrodes et la couche conductrice de largeur 25 cm.



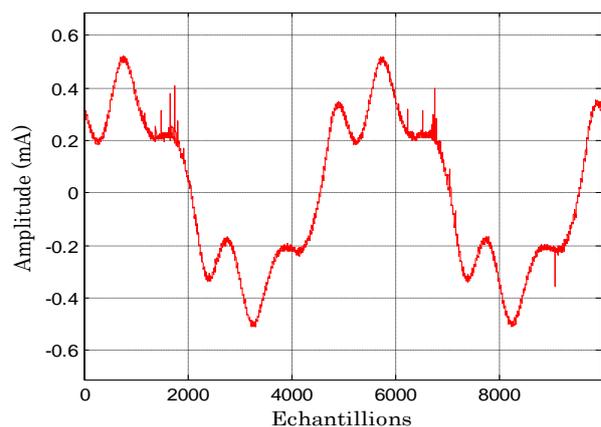
(a)



(b)



(c)



(d)

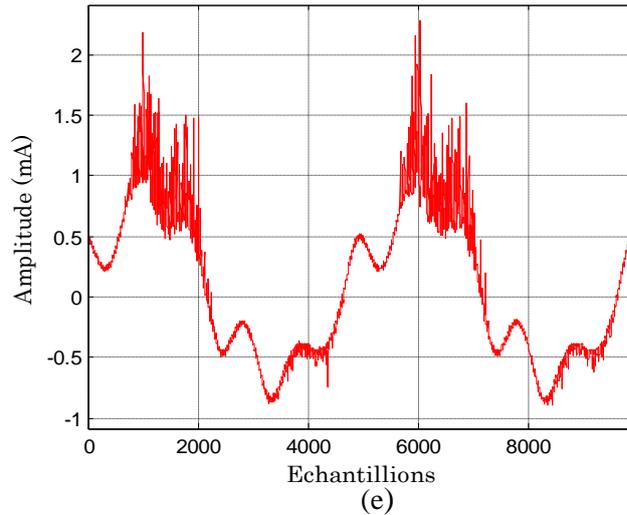


Figure VI.9: *Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté terre à 27 kV_{eff}: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.*

Pour cette configuration, la représentation de la déviation standard en fonction des détails du courant de fuite, permet de constater que les composantes D_{10} et D_8 sont susceptibles de caractériser l'augmentation de la largeur de la couche polluée. En effet, les détails D_{10} et D_8 ont une énergie qui augmente avec l'agrandissement de cette couche. Nous remarquons également pour la couche 25 cm que l'énergie de la composante D_{10} augmente de la même manière que le côté HT pour les mêmes raisons. Notons également que l'énergie de la composante D_9 baisse au moment de la décharge électrique. Les variations des composantes D_8 et D_{10} sont montrées aux figures VI.11 et VI.12.

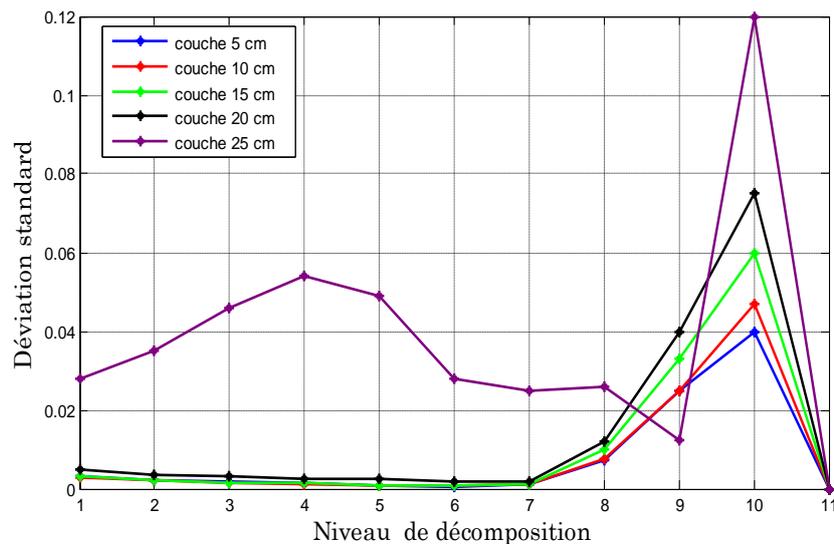
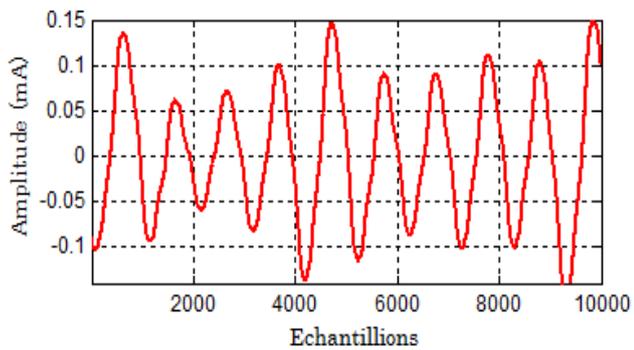
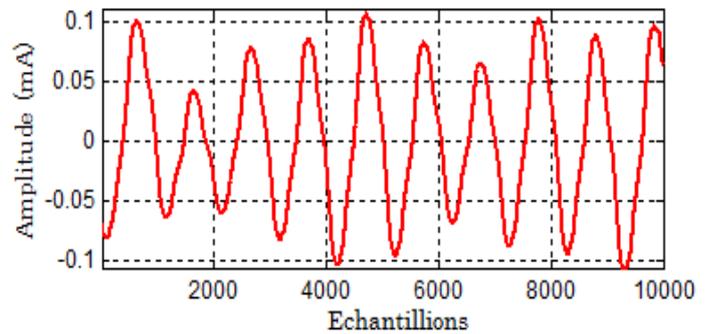


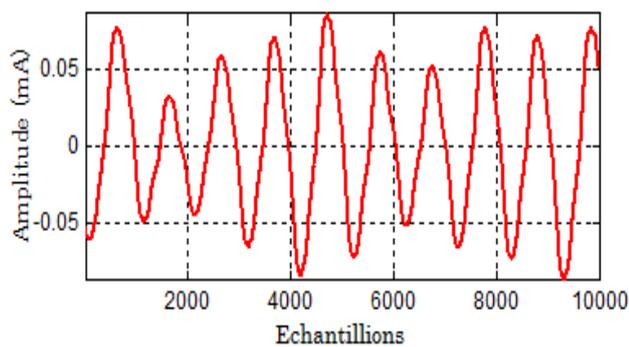
Figure VI.10 : *Représentation de la déviation standard pour chaque détail du courant de fuite pour la pollution du côté terre.*



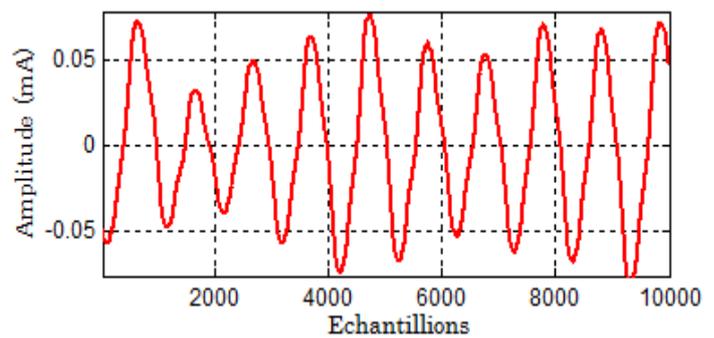
(a)



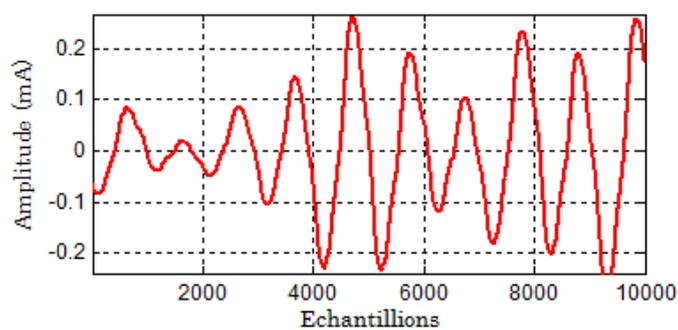
(b)



(c)

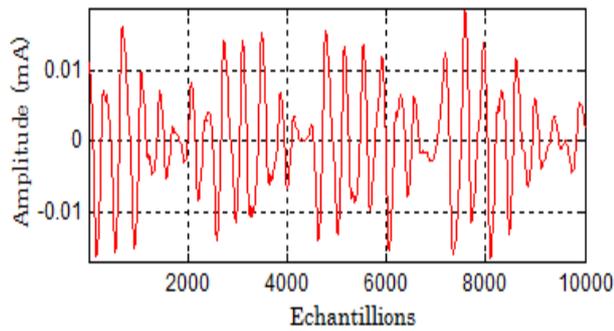


(d)

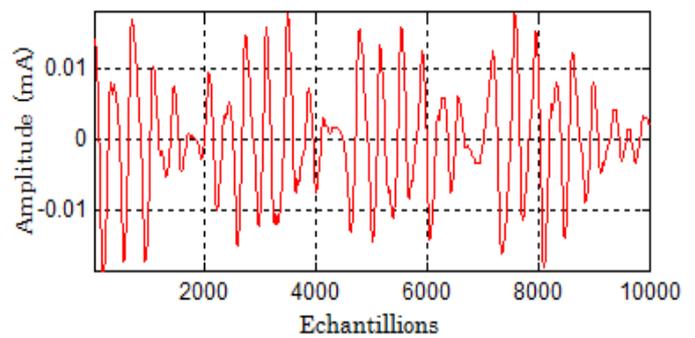


(e)

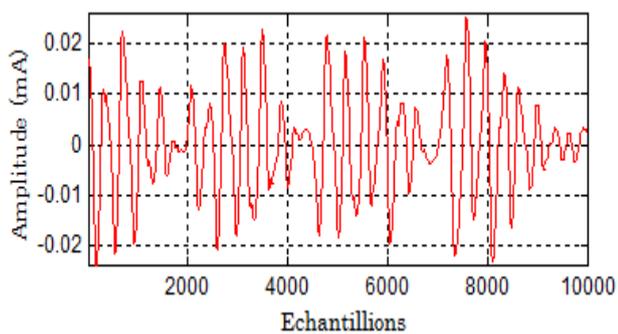
Figure VI.11 : Evolutions du détail D_{10} à $27 \text{ kV}_{\text{eff}}$ pour la pollution du côté terre :
 (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm,
 (e) couche 25 cm.



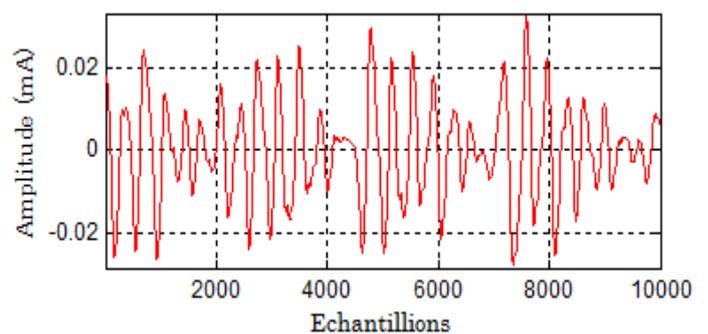
(a)



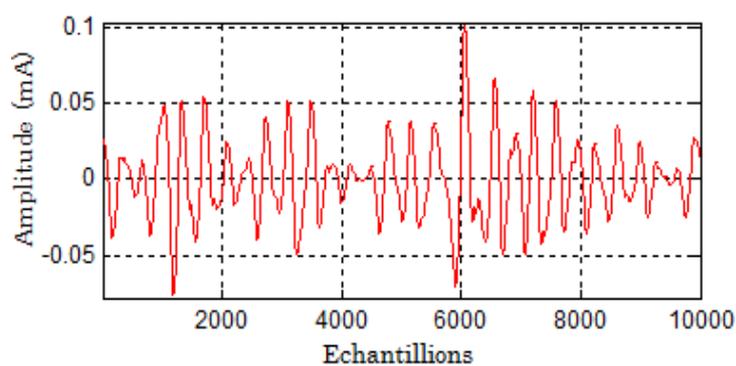
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure VI.12 : Evolutions du détail D_8 pour la pollution du côté terre à $27 \text{ kV}_{\text{eff}}$:
(a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm,
(e) couche 25 cm.

VI-4-3-Pollution de la couche centrale :

Pour cette dernière configuration, l'amplitude du courant de fuite est la plus petite parmi les trois cas, ce qui confirme la bonne rigidité de l'isolateur pour une pollution de la couche centrale. Nous remarquons que le nombre de pics observés sur le courant de fuite augmente suivant la largeur de la couche polluée. Pendant les décharges électriques et pour un niveau de tension proche de celui du contournement (Figure VI.14), le courant de fuite a une amplitude très élevée avec une distorsion remarquable et des pics de décharges au niveau de la crête. Les annulations du courant de fuite (Figure VI.14) pendant un bref instant prouvent que la tension appliquée à ces instants est faible pour pouvoir amorcer une décharge électrique dans les intervalles d'air électrode-couche polluée

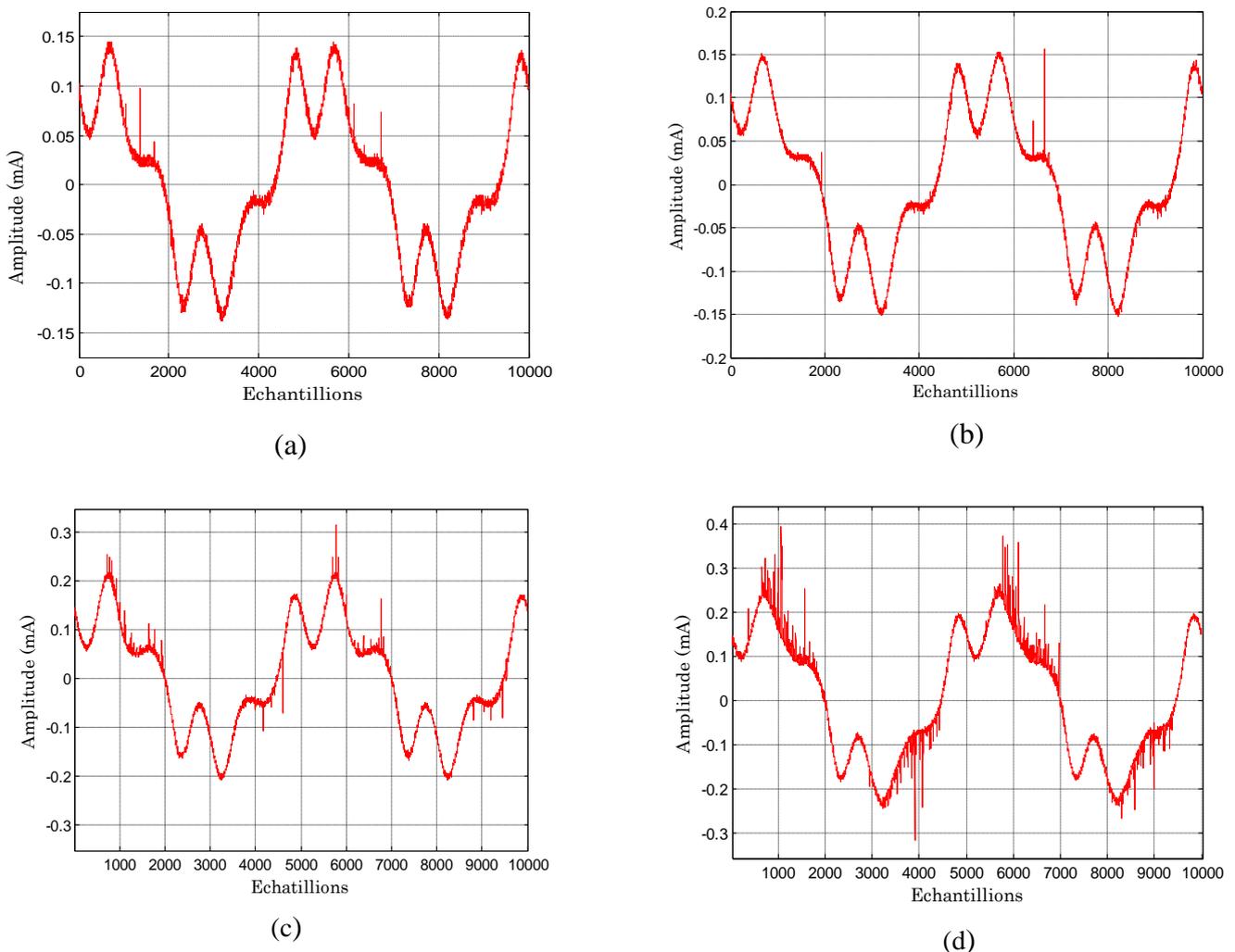


Figure VI.13 : *Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution de la couche centrale à $40kV_{eff}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm.*

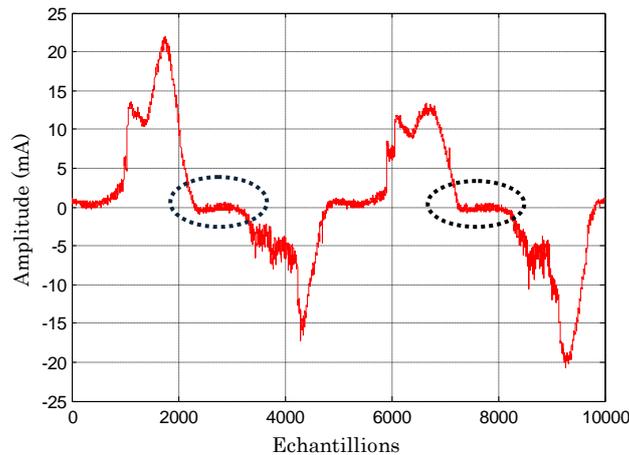


Figure VI.14: *Forme d'onde du courant de fuite à 36 kV_{eff} pour une pollution de la couche centrale de largeur 25 cm.*

La représentation STD-MRA pour les quatre couches polluées (5, 10, 15 et 20 cm) indique que les détails D_1 et D_8 ont une énergie qui augmente pour chacune d'elles. On constate également pour la couche 25 cm et pour une tension de 36 kV_{eff}, que l'énergie du détail D_{10} est très élevée à cause des décharges électriques ayant lieu à la surface de l'isolateur. Cela confirme que le 3^{ème} harmonique décrit parfaitement les phénomènes de décharges dans l'intervalle d'air électrode-couche polluée. Les variations de D_8 et D_1 sont représentées sur les figures VI.16 et VI.17.

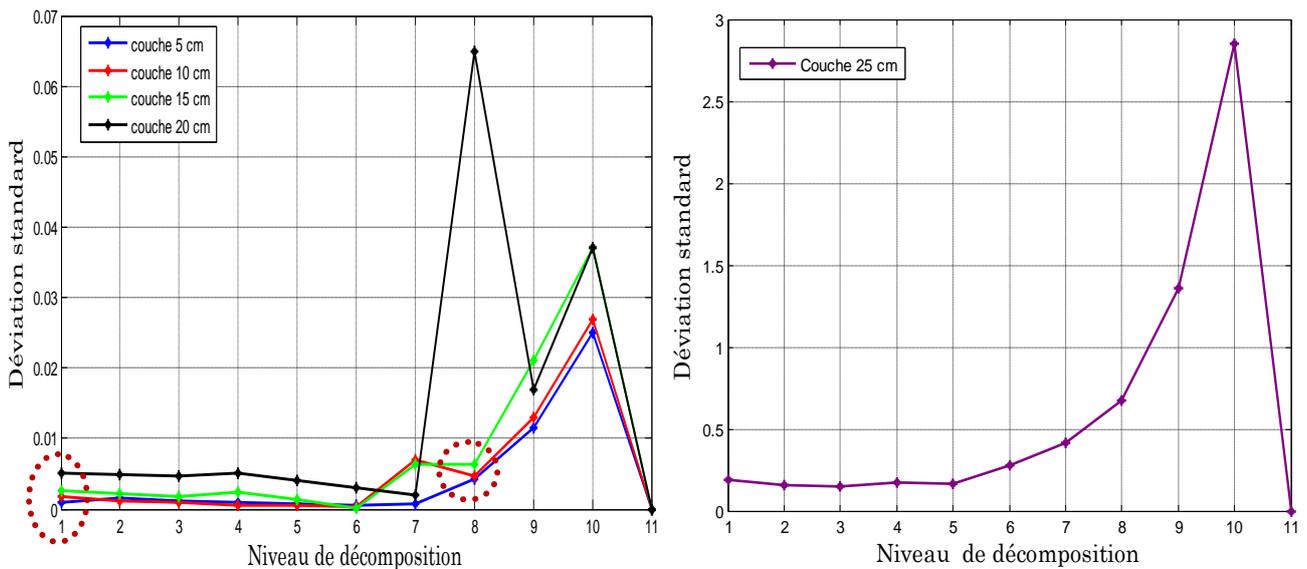


Figure VI.15 : *Déviati on standard pour chaque détail du courant de fuite : (a) pour les quatre couches centrales polluées, (b) pour la couche 25 cm à 36 kV_{eff}.*

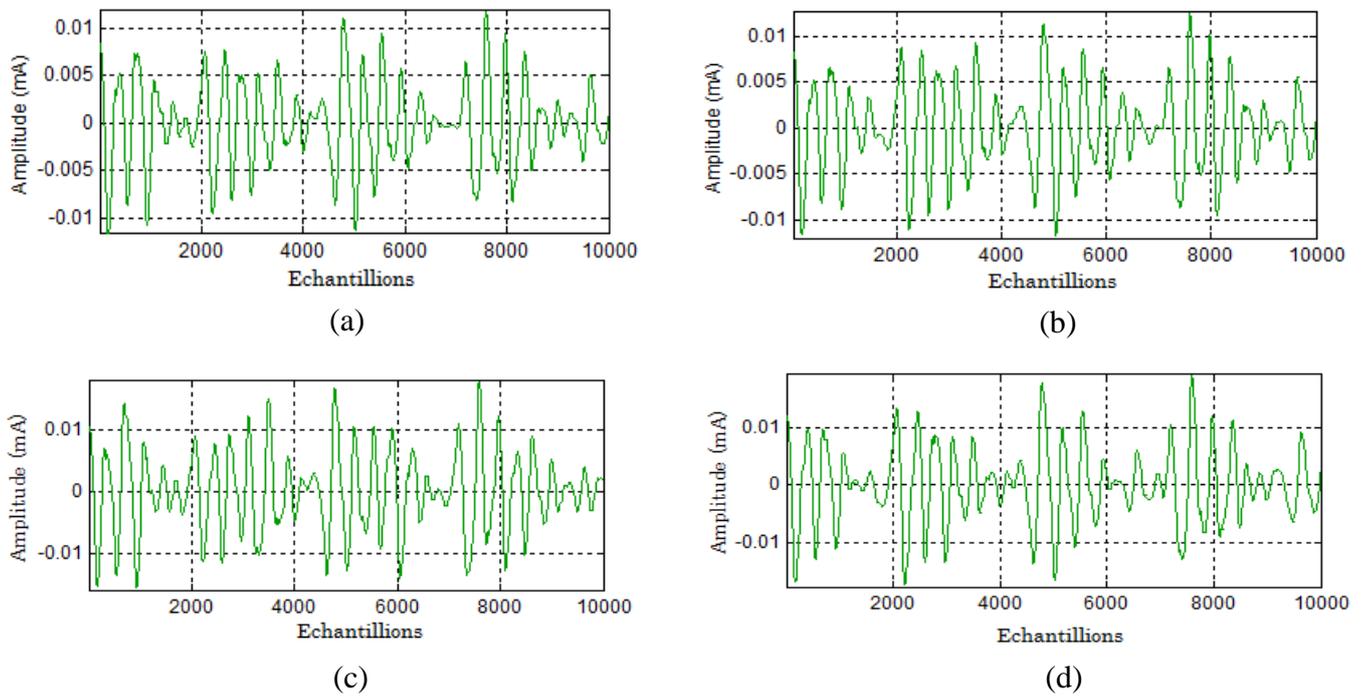


Figure VI.16 : Evolutions du détail D_8 pour la pollution de la couche centrale à $40 kV_{eff}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm.

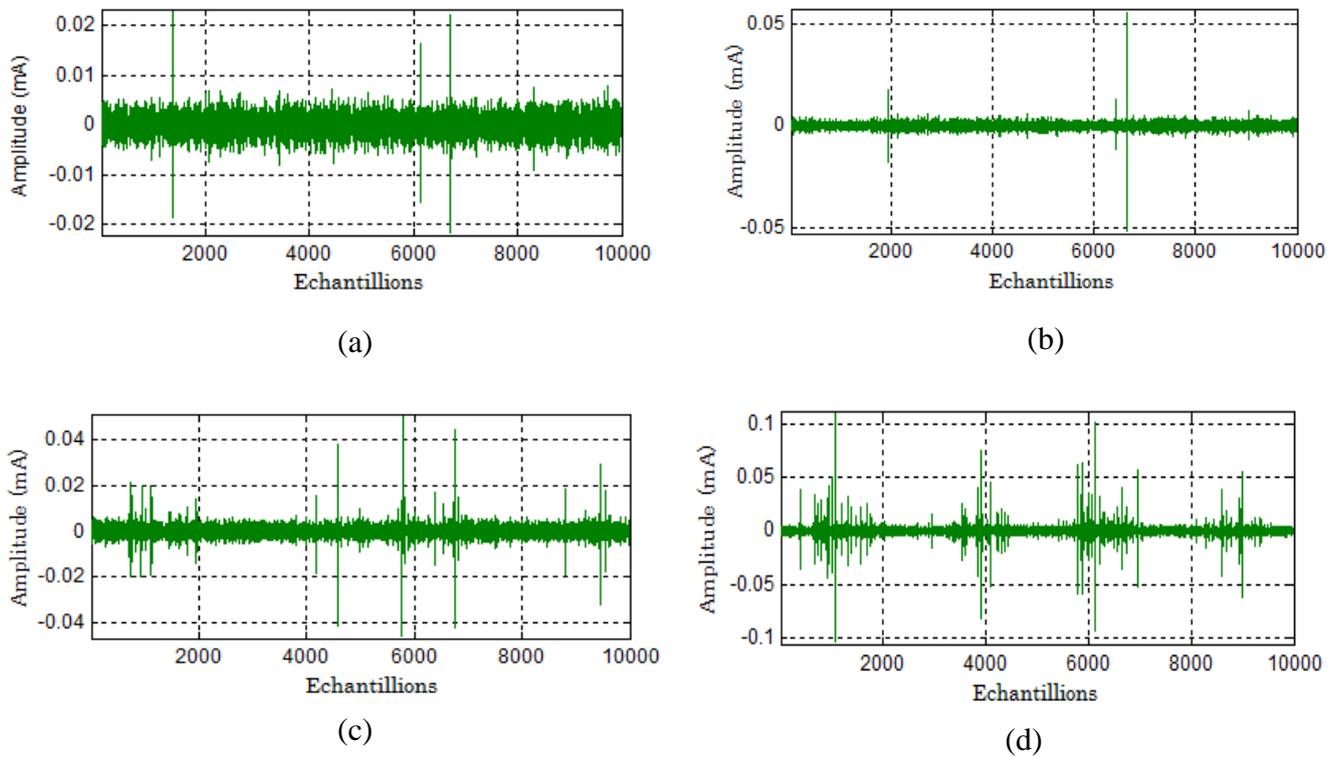


Figure VI.17 : Evolutions du détail D_1 pour la pollution de la couche centrale $40 kV_{eff}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm.

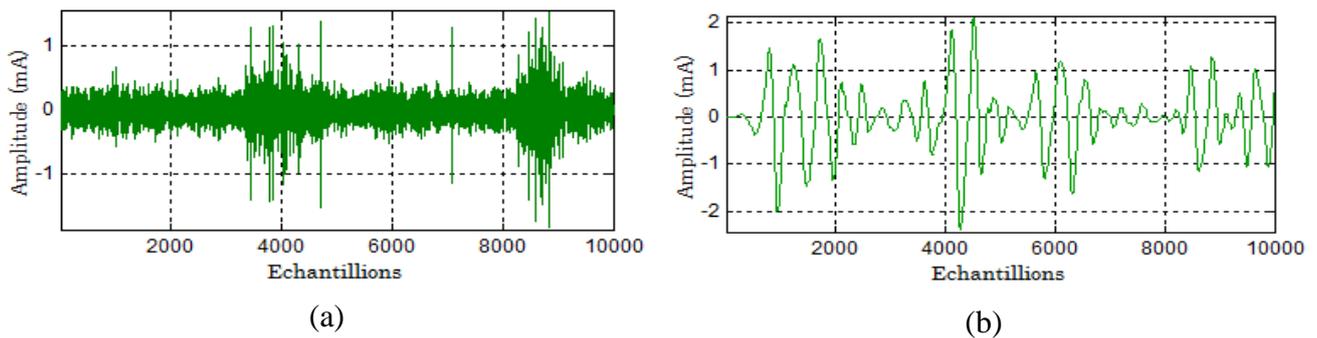


Figure VI.18 : *Couche centrale polluée de largeur 25 cm à 36 kV_{eff} : (a) détail D_1 , (b) détail D_8 .*

VI-5-Conclusion sur l'analyse par la DWT :

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

Pour la pollution du côté HT, la STD-MRA plot indique que le détail D_{10} distingue entre les différentes couches polluées. En effet, plus la couche polluée s'élargit et plus l'énergie du détail D_{10} augmente.

Pour la pollution du côté terre, les détails D_8 et D_{10} sont ceux qui identifient l'élargissement de la couche polluée. Cela signifie que la différenciation entre la pollution du côté HT et celle du côté terre peut être faite grâce à l'augmentation d'énergie du détail D_8 .

Pour la pollution de la couche centrale, les composantes fréquentielles D_1 et D_8 déterminent l'agrandissement de la zone conductrice. Ce type de pollution peut être également séparé des deux autres cas grâce à l'augmentation d'énergie de la composante D_1 de très haute fréquence.

Chapitre VII :

*Modélisation du comportement
du modèle plan.*

VII-1-Introduction :

Cette partie concerne la modélisation du comportement du modèle plan proposé. Pour cela, l'approche par les fonctions analytiques est choisie pour faire apparaître la corrélation qui existe entre les différents paramètres électriques et cela pour les différentes répartitions de la couche polluée à la surface de l'isolateur. Cette modélisation est réalisée à l'aide du logiciel MATLAB® qui calcule les coefficients des fonctions proposées. L'évaluation des courbes théoriques est effectuée via l'importance des erreurs commises lors de l'interpolation.

VII-2-Paramètres d'évaluation utilisés :

Afin de donner une bonne tendance mathématique aux résultats obtenus expérimentalement, quatre paramètres statistiques sont calculés pour justifier le choix de chaque modèle mathématique.

VII-2-1-Analyse des résidus (erreur d'approximation) :

Le résidu est défini comme étant la différence entre la valeur approximée et la valeur réelle :

$$r = y - \hat{y} \quad (\text{VII.1})$$

Lorsque la représentation de ces résidus est aléatoire autour de la valeur zéro, cela signifie que le modèle choisi décrit parfaitement la variation des valeurs réelles.

VII-2-2-Somme des carrés des erreurs (SSE):

Cette mesure statistique mesure la répartition des valeurs obtenues de l'approximation par rapport aux valeurs réelles. Son expression est donnée par :

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{VII.2})$$

Une valeur proche de zéro indique une faible valeur de l'erreur répartie de manière aléatoire, commise par l'interpolation, ce qui rend le modèle utile pour la prédiction de valeurs autres que celles obtenues.

VII-2-3-Coefficient de détermination R^2 :

Le coefficient de détermination représente la proportion de la variation totale par rapport à la moyenne qui est expliquée par la régression [89]. Il peut prendre des valeurs entre 0 et 1, avec une valeur proche de 1 indiquant qu'une grande proportion de la variance est prise en compte par le modèle. Il est exprimé par la relation :

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{VII.3})$$

VII-2-4-Coefficient R^2 ajusté :

Le coefficient R^2 ajusté est utile pour comparer l'estimation de modèles différents. Il tient compte de la diminution du nombre de degrés de liberté consécutifs à l'introduction de nouvelles variables indépendantes [90].

Le degré de liberté résiduel est donné par :

$$v = n - m$$

n et m sont respectivement le nombre des valeurs réelles et des valeurs obtenues après l'estimation.

Le coefficient R^2 ajusté est donné par la formule :

$$R^2(\text{ajusté}) = 1 - \frac{SSE/(n-k)}{SST(n-1)} \quad (\text{VII.4})$$

Il peut prendre des valeurs entre 0 et 1, avec une valeur proche de 1 qui indique un bon modèle, et peut être négatif lorsque ce dernier contient des valeurs qui ne favorisent pas une prédiction convenable.

VII-2-5-Erreur standard (RMSE):

C'est un paramètre statistique qui estime la déviation standard des valeurs aléatoires présentes dans les données expérimentales. Lorsque le modèle est conforme à la prédiction, la valeur du paramètre tend vers 0.

$$RMSE = s = \sqrt{\frac{SSE}{v}} \quad (\text{VII.5})$$

VII-3-Modélisation de la tension de contournement :

VII-3-1-Pollution uniforme:

Etant donné que la tension de contournement varie de manière non linéaire en fonction de la conductivité volumique, elle peut être modélisée par la fonction :

$$Uc = A.e^{B.\sigma} + C.e^{D.\sigma}$$

A, B, C et D sont des constantes déterminées à partir du Logiciel MATLAB® et l'intervalle de confiance est calculé à 95%. La figure VII.1 montre la courbe de tendance par rapport aux points expérimentaux qui sont proches à une erreur près. Le tableau VII.I nous montre les valeurs des différentes constantes ainsi que l'intervalle de confiance pour chacune d'entre elles.

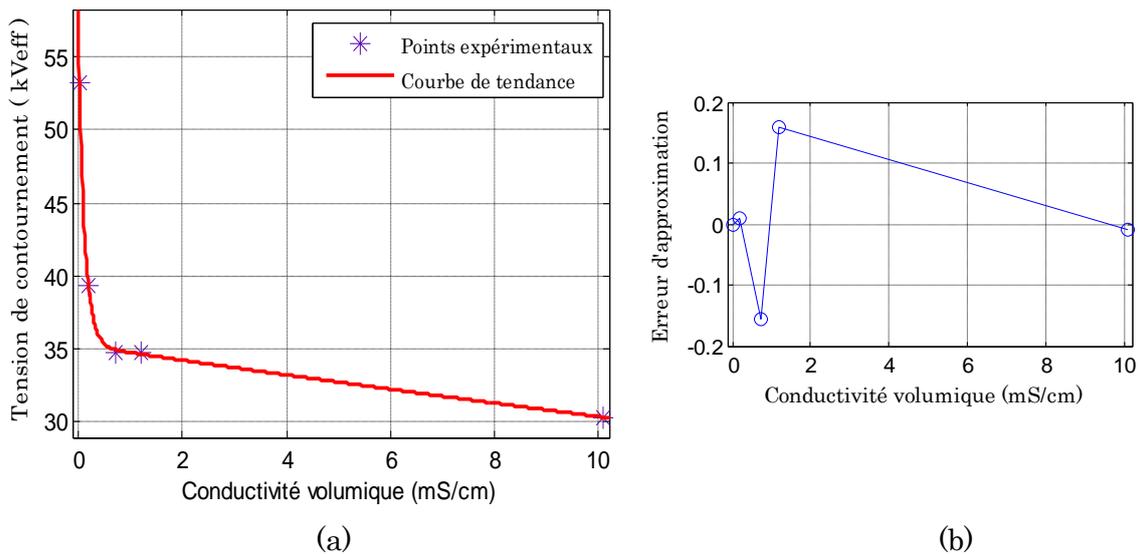


Figure VII.1 : *Conductivité uniforme : (a) Modèle de la tension de contournement en fonction de la conductivité volumique, (b) Erreur d'approximation.*

Les valeurs des coefficients R^2 et R^2 ajusté sont très proche de 1 et l'erreur tend relativement vers zéro. Cela montre que la fonction mathématique choisie est convenable pour expliquer la diminution de la tension de contournement lorsque la conductivité volumique de la couche du plan uniformément polluée augmente.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
A	25.48	14.24	36.72	SSE	0.4122
B	-8.908	-20.65	2.834	R ²	0.9992
C	34.69	28.01	41.37	R ² ajusté	0.9968
D	-0.01784	-0.05394	0.01825	RMSE	0.642

Tableau VII.I : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la tension de contournement en fonction de la conductivité volumique.

VII-3-2- Pollution non uniforme:

Pour ce cas, la modélisation de la tension de contournement en fonction du rapport Ω , entre la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale, nous permet de voir l'effet de l'augmentation de la couche polluée sur les performances électriques de la plaque en verre. Pour les trois cas de la pollution non-uniforme, la fonction mathématique adéquate est de type polynômial tel que :

$$Uc = p_1.\Omega^3 + p_2.\Omega^2 + p_3.\Omega + p_4$$

VII-3-2-1- Pollution du côté HT :

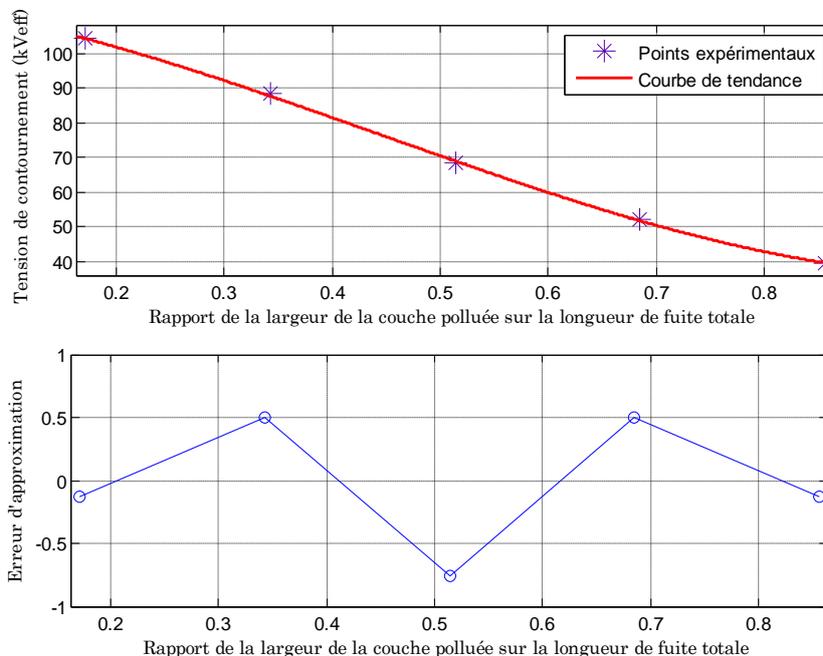


Figure VII.2 : Courbe de tendance et erreur d'approximation pour le modèle de la tension de contournement en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté HT et la longueur de fuite totale.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
p ₁	157.7	-1074	1390	SSE	3.415
p ₂	-218.6	-2129	1692	R ²	0.9987
p ₃	-9.918	-891.4	871.6	R ² ajusté	0.9948
p ₄	112.1	-3.369	227.6	RMSE	1.848

Tableau VII.II : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la tension de contournement en fonction de la largeur de la couche polluée du côté HT sur la longueur de fuite totale.

Nous constatons que le modèle polynomial décrit parfaitement la variation de la tension de contournement pour le cas de la pollution du côté HT vu les valeurs des coefficients de détermination R² et R² ajusté proche de 1. Toutefois, le paramètre RMSE est relativement loin de 0 mais le modèle peut quand même être utilisé pour la prédiction d'autres valeurs de la tension de contournement.

VII-3-2-2-Pollution du côté terre :

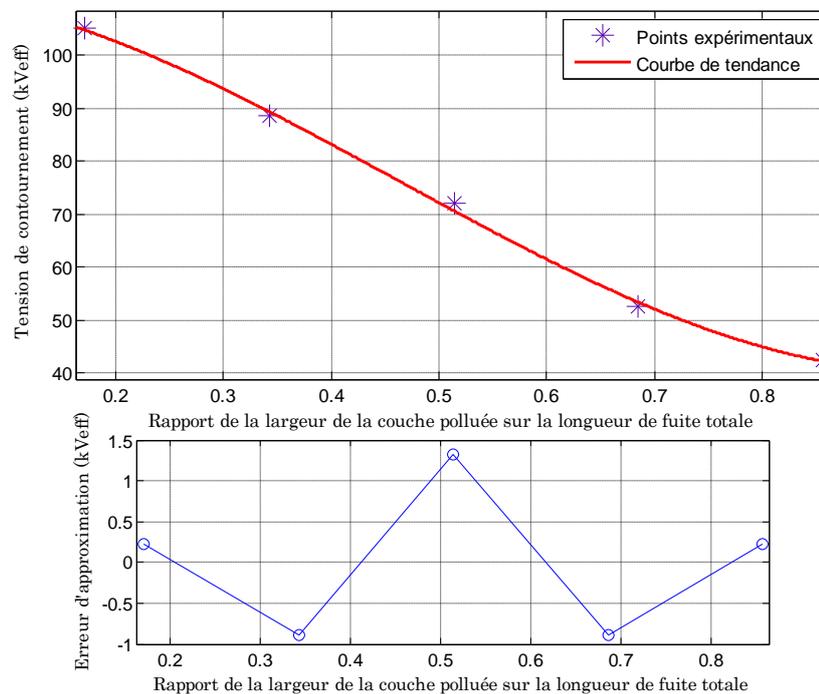


Figure VII.3 : Courbe de tendance et erreur d'approximation pour le modèle de la tension de contournement en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté terre et longueur de fuite totale.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
p_1	120.3	-580.1	820.7	SSE	1.104
p_2	-159.9	-1246	926.3	R^2	0.9996
p_3	-39.63	-540.7	461.4	R^2 ajusté	0.9984
p_4	115.2	49.61	180.9	RMSE	1.051

Tableau VII.III : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la tension de contournement en fonction de la largeur de la couche polluée du côté terre sur la longueur de fuite totale.

Les paramètres d'évaluation indiquent que le modèle mathématique choisi pour décrire la variation de la tension de contournement en fonction du ratio Ω , est tout à fait apte à prédire des points autres que les résultats expérimentaux obtenus, à cause des valeurs satisfaisantes des coefficients R^2 et R^2 ajusté ainsi que la distribution quasi aléatoire des erreurs pour chaque conductivité.

VII-3-2-3-Pollution de la couche centrale :

La courbe de tendance et les erreurs d'approximation du modèle sont montrées à la figure VII.4.

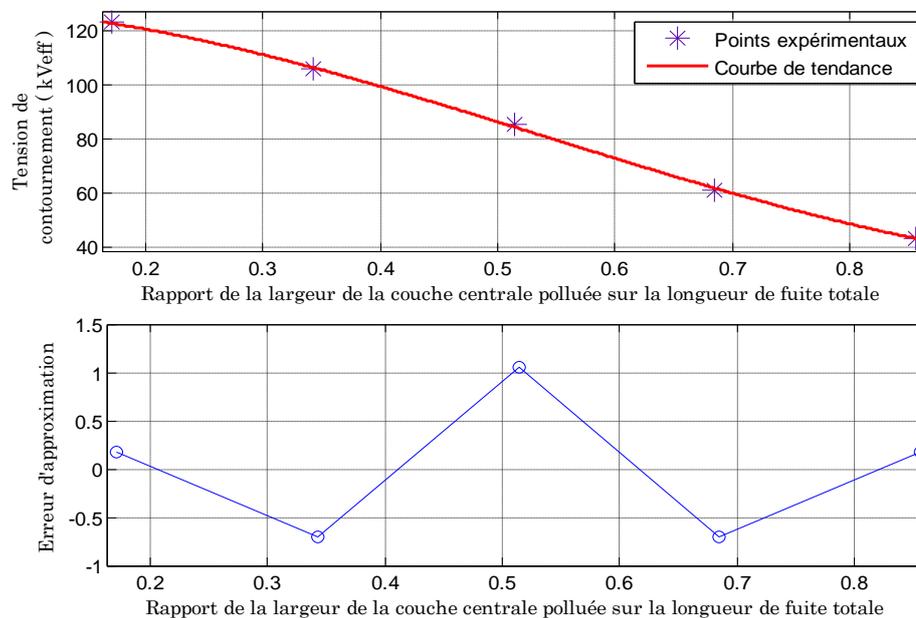


Figure VII.4 : Courbe de tendance et erreur d'approximation pour le modèle de la tension de contournement en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
p1	161.8	-810.5	1134	SSE	2.127
p2	-262.1	-1770	1246	R ²	0.9995
p3	5.835	-689.8	701.5	R ² ajusté	0.998
p4	128.9	37.83	220.1	RMSE	1.458

Tableau VII.IV : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la tension de contournement en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale.

Le modèle mathématique proposé décrit de la même manière que les autres cas l'évolution de la tension de contournement en fonction du ratio Ω , ce qui signifie du point de vue mathématique que le comportement de l'isolateur en présence de couche centrale polluée ne change pas vis-à-vis de la tension de contournement (diminution avec l'augmentation de la largeur de la couche).

VII-4-Modélisation du courant de fuite :

La modélisation du courant de fuite en fonction de la nature de la pollution (uniforme ou non-uniforme) et de la tension appliquée permet de voir l'effet de ces deux contraintes sur le comportement de l'isolateur pour des valeurs autres que celles obtenus expérimentalement. Pour la conductivité uniforme, cette modélisation permet de voir l'effet de la tension. Pour la conductivité non-uniforme, la modélisation permet de voir l'effet de l'agrandissement de la couche conductrice sur le courant de fuite.

Pour les faibles niveaux de tension (de 3 à 21 kV_{eff}), le modèle mathématique du courant de fuite en fonction du ratio Ω est polynomial de forme :

$$I(\Omega) = a_1.\Omega^2 + a_2.\Omega + a_3$$

Pour le niveau de tension 27 kV_{eff} (pendant les décharges parallèles), le modèle mathématique de l'isolateur est exprimé comme suit :

$$I(\Omega) = A_1.\Omega^{b1} + C_1$$

VII-4-1-Conductivité non-uniforme:VII-4-1-1-Pollution du côté HT :

La figure VII.5 montre l'évolution du modèle du courant de fuite en fonction du rapport Ω ainsi que l'erreur d'approximation pour des niveaux de tension inférieurs à 27 kV_{eff}.

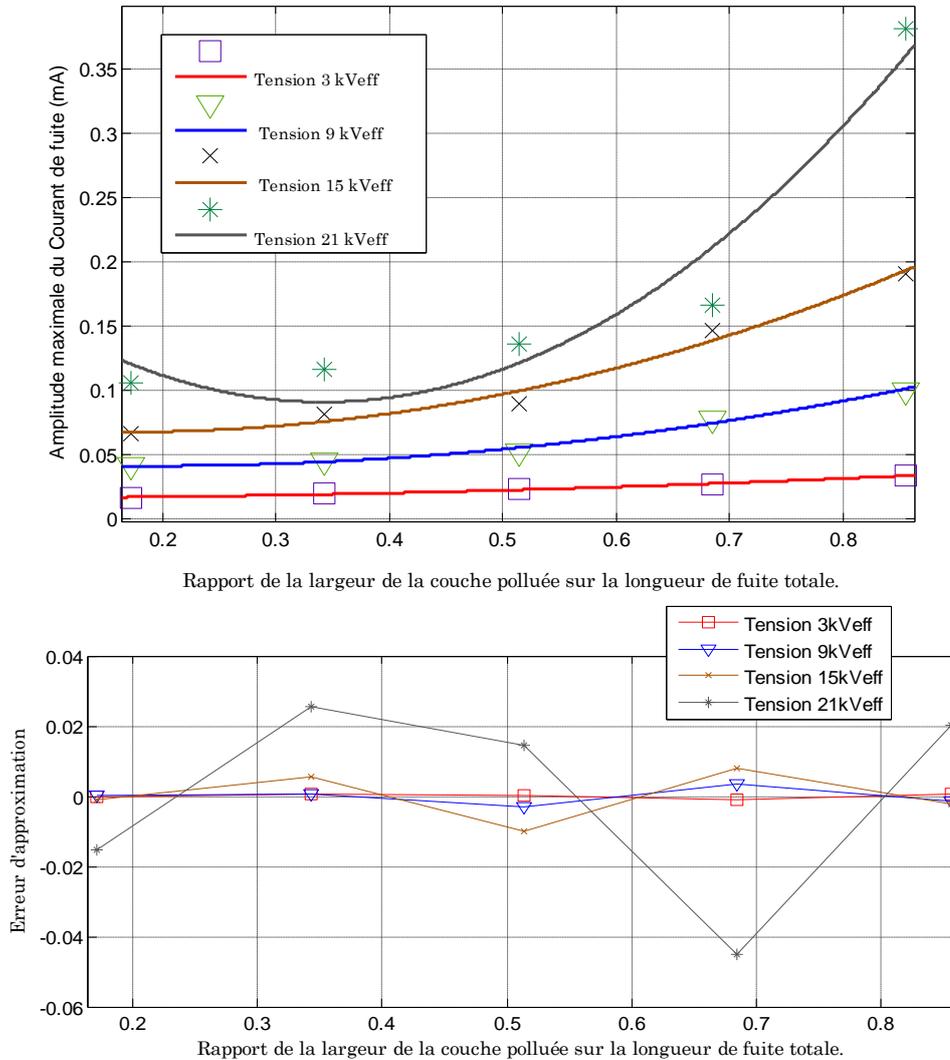


Figure VII.V : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté HT et la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension.*

D'après les résultats du tableau VII.V, nous constatons que le modèle polynomial du second degré permet d'évaluer la variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du ratio Ω , sauf pour le niveau 21 kV_{eff} et pour les largeurs inférieures à 15 cm où le modèle a une tendance faiblement décroissante et par conséquent une erreur plus grande.

	Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
			Limite inférieure	Limite supérieure		
3kV	a ₁	0.02265	-0.01365	0.05896	SSE	0.000001715
	a ₂	0.001074	-0.03695	0.0391	R ²	0.9906
	a ₃	0.01654	0.007997	0.02508	R ² ajusté	0.9811
					RMSE	0.000926
9kV	a ₁	0.1354	-0.002078	0.273	SSE	0.0000246
	a ₂	-0.05145	-0.1955	0.09256	R ²	0.9902
	a ₃	0.04656	0.0142	0.07892	R ² ajusté	0.9803
					RMSE	0.003507
15kV	a ₁	0.265	-0.1267	0.6568	SSE	0.0001996
	a ₂	-0.08872	-0.4989	0.3215	R ²	0.9817
	a ₃	0.07546	-0.01671	0.1676	R ² ajusté	0.9635
					RMSE	0.00999
21kV	a ₁	1.022	-0.6253	2.669	SSE	0.003529
	a ₂	-0.6991	-2.424	1.026	R ²	0.9323
	a ₃	0.211	-0.1766	0.5985	R ² ajusté	0.8647
					RMSE	0.042

Tableau VII.V : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension.

La figure VII.6 montre l'évolution du modèle du courant de fuite en fonction du ratio Ω lorsqu'il y a des décharges parallèles à la surface. Nous remarquons que ce modèle théorique intègre parfaitement les résultats expérimentaux vu la distribution aléatoire de l'erreur en plus du fait que les coefficients R² et RMSE tendent respectivement vers 1 et 0, ce qui rend le modèle mathématique idéal pour la prédiction d'autres valeurs.

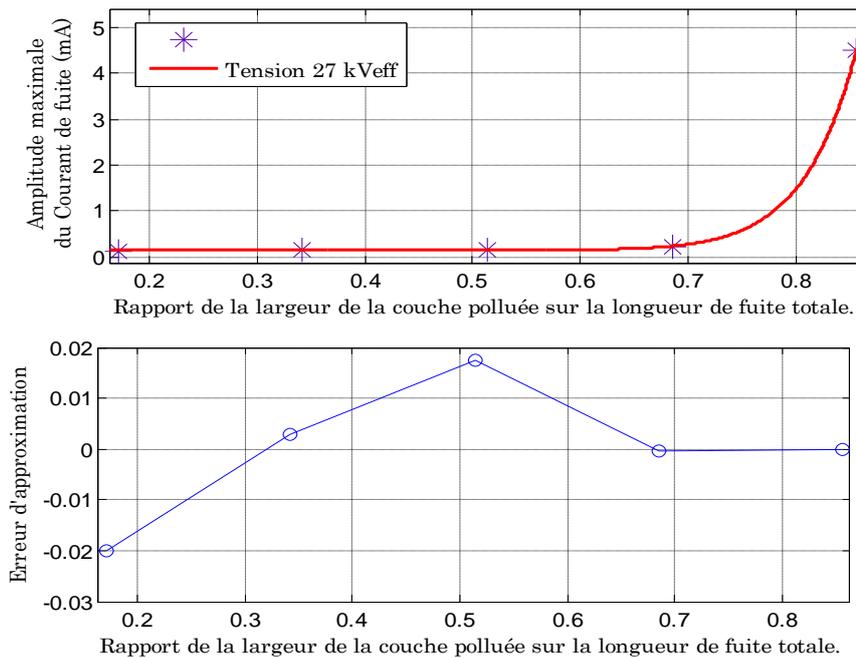


Figure VII.6 : Courbe de tendance et erreur d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté HT et la longueur de fuite totale pour 27 kV_{eff}.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
A ₁	65.23	17.57	112.9	SSE	0.0007123
b ₁	17.45	12.71	22.18	R ²	1
C ₁	0.1531	0.1059	0.2002	R ² ajusté	0.9999
				RMSE	0.01887

Tableau VII.VI : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale pour 27 kV_{eff}.

VII-4-1-2-Pollution du côté terre :

L'augmentation du courant de fuite en fonction de Ω pour les faibles tensions (inférieures à 27 kV_{eff}) est montrée à la figure VII.7. Pour le niveau 27 kV_{eff} l'évolution du modèle est montrée à la figure VII.8.

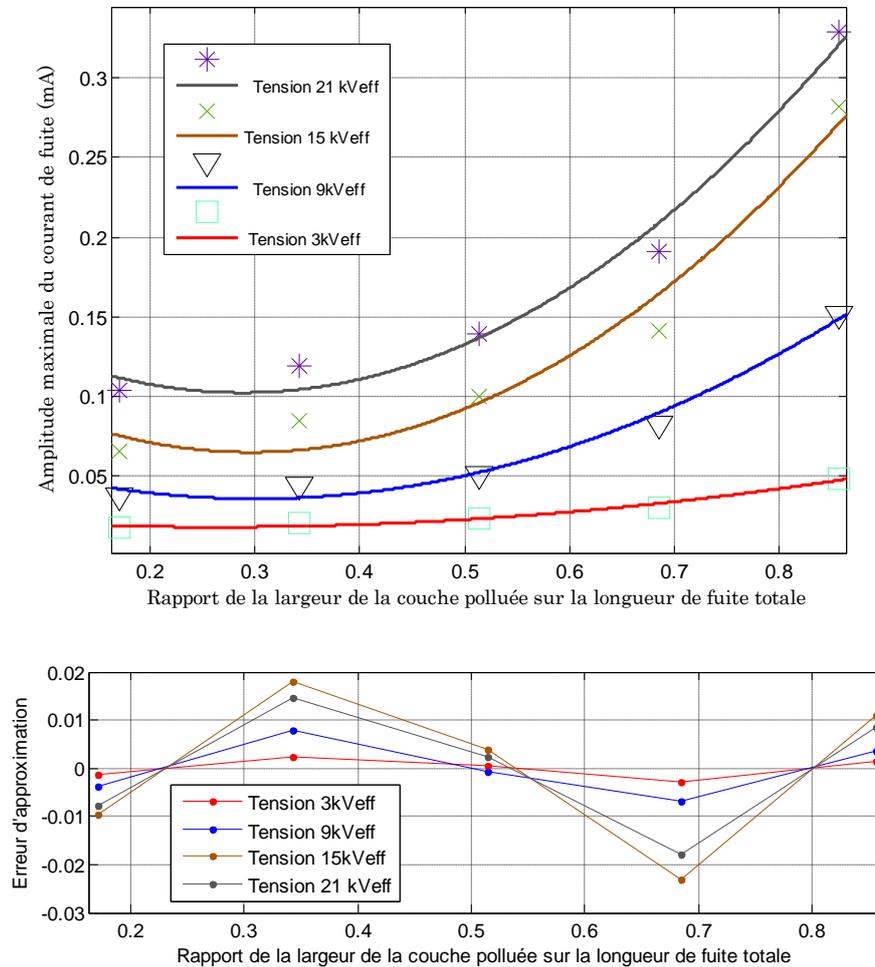


Figure VII.7 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté terre et la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension.*

Contrairement au cas précédent, le modèle mathématique affiche une erreur moins importante pour le niveau de tension 21 kV_{eff} en plus des valeurs satisfaisantes des paramètres statistiques, qui révèlent que la fonction polynomiale du second degré est adéquate pour décrire l'augmentation de l'amplitude maximale du courant en fonction du rapport Ω . La valeur du coefficient R^2 permet de conclure que la prédiction d'autres valeurs est possible avec le modèle mathématique choisi.

	Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle.	
			Limite inférieure	Limite supérieure		
3kV	a ₁	0.0833	-0.03432	0.2009	SSE	0.000018
	a ₂	-	-0.1669	0.0794	R ²	0.9707
	a ₃	0.02382	-0.003858	0.05149	R ² ajusté	0.9414
						RMSE
9kV	a ₁	0.3656	0.04454	0.6867	SSE	0.0001341
	a ₂	-0.2201	-0.5563	0.1161	R ²	0.9848
	a ₃	0.06895	-0.006594	0.1445	R ² ajusté	0.9696
						RMSE
15kV	a ₁	0.6584	-0.2566	1.573	SSE	0.001089
	a ₂	-0.3908	-1.349	0.5673	R ²	0.964
	a ₃	0.123	-0.09226	0.3383	R ² ajusté	0.928
						RMSE
21kV	a ₁	0.6771	-0.03914	1.393	SSE	0.0006674
	a ₂	-0.3909	-1.141	0.3592	R ²	0.98
	a ₃	0.1588	-0.009752	0.3273	R ² ajusté	0.9601
						RMSE

Tableau VII.VII : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté terre et la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension.

Lorsqu'il y a des décharges parallèles à la surface de l'isolateur, le modèle mathématique varie de la même manière que pour le cas de la pollution du côté HT. Cela signifie que pour un niveau de tension très élevé, le courant de fuite a tendance à s'emballer et donc le comportement de l'isolateur diffère exclusivement pour ce niveau. Les coefficients statistiques nous informent une fois de plus que le modèle mathématique choisi pour cette tension est adéquat pour la prédiction.

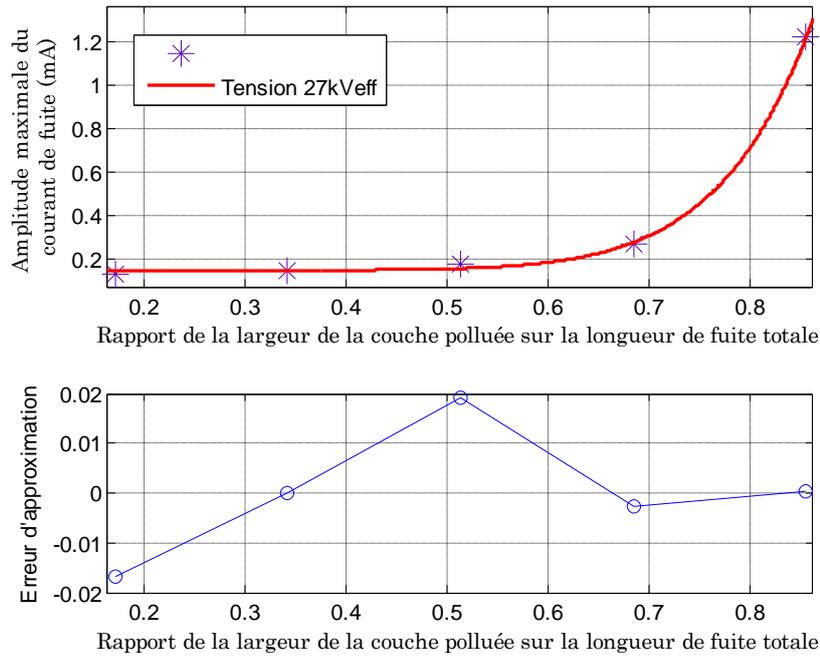


Figure VII.8 : Courbe de tendance et erreur d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté terre et la longueur de fuite totale pour 27 kV_{eff}.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
A1	4.735	2.414	7.056	SSE	0.0006551
b1	9.561	6.349	12.77	R ²	0.9993
C1	0.1467	0.09946	0.1939	R ² ajusté	0.9985
				RMSE	0.0181

Tableau VII.IIX : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche polluée du côté terre et la longueur de fuite totale pour 27 kV_{eff}.

VII-4-1-3-Pollution de la couche centrale:

Pour cette dernière configuration, le modèle mathématique permet d'obtenir de meilleurs résultats pour le niveau de tension 21 kV_{eff}. L'évolution du modèle par rapport aux valeurs expérimentales est montrée à la figure VII.9.

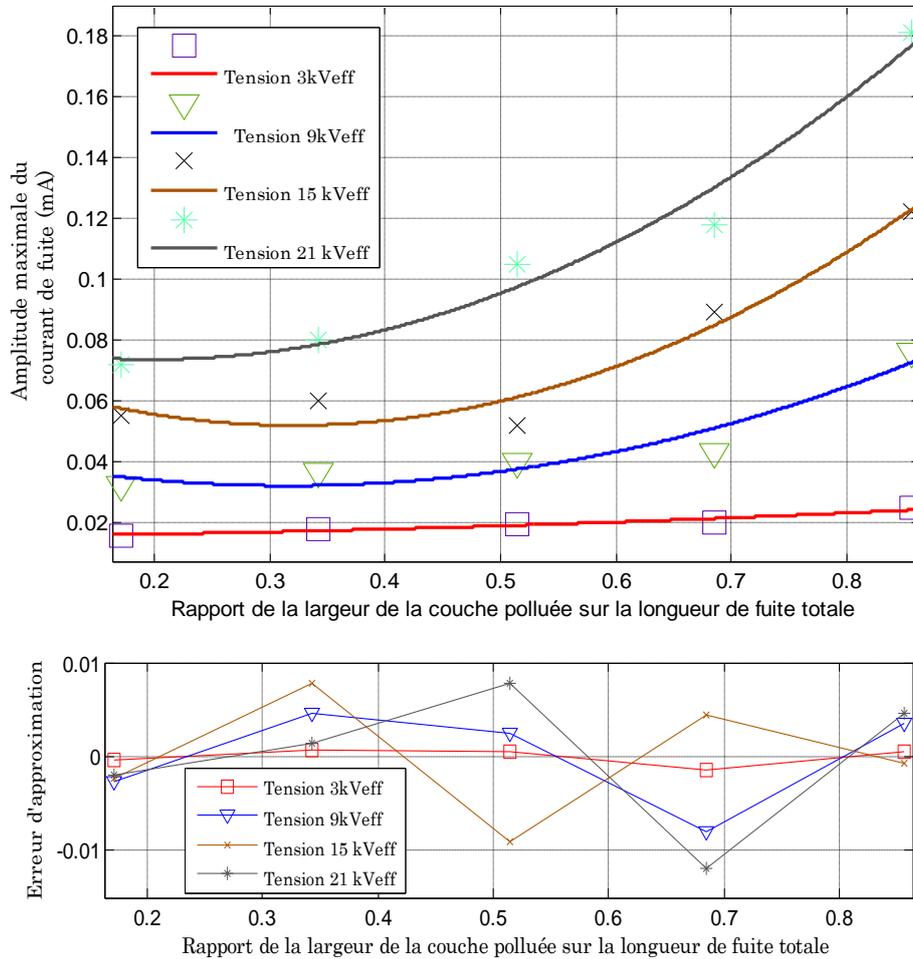


Figure VII.9 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension.*

Les paramètres statistiques indiquent une fois encore que l'augmentation du courant de fuite en fonction du ratio Ω est parfaitement représentée par la fonction polynomiale du second degré. Le coefficient de détermination pour les quatre niveaux de tension, révèle que la prédiction est quasi possible pour des largeurs de couches polluées qui ne dépassent pas la distance inter-électrode.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle		
		Limite inférieure	Limite supérieure			
3kV	a ₁	0.008281	-0.04053	0.0571	SSE	0.0000016
	a ₂	0.003287	-0.04783	0.05441	R ²	0.9307
	a ₃	0.01522	0.003734	0.02671	R ² ajusté	0.8614
						RMSE
9kV	a ₁	0.1383	-0.1526	0.4293	SSE	0.0001101
	a ₂	-0.08748	-0.3922	0.2172	R ²	0.9095
	a ₃	0.04594	-0.02253	0.1144	R ² ajusté	0.8189
						RMSE
15kV	a ₁	0.247	-0.1123	0.6063	SSE	0.000168
	a ₂	-0.1586	-0.5349	0.2177	R ²	0.9528
	a ₃	0.07738	-0.007175	0.1619	R ² ajusté	0.9056
						RMSE
21kV	a ₁	0.2372	-0.182	0.6565	SSE	0.0002287
	a ₂	0.09392	-0.533	0.3452	R ²	0.9695
	a ₃	0.08286	-0.0158	0.1815	R ² ajusté	0.9389
						RMSE

Tableau VII.IX : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale pour différents niveaux de tension.

Les décharges parallèles pour cette configuration changent de façon significative la variation du courant de fuite pour chaque largeur de la couche conductrice. L'augmentation est très intense pour la couche 25 cm lorsque la tension atteint 40kV_{eff}. L'isolateur est à ce moment considéré comme une résistance de faible valeur comparée à celle pour le cas sec.

Les coefficients statistiques montrent que le modèle choisi est adapté pour la prédiction de valeurs encore plus élevées mais pour des largeurs qui ne dépassent pas la distance inter-électrode.

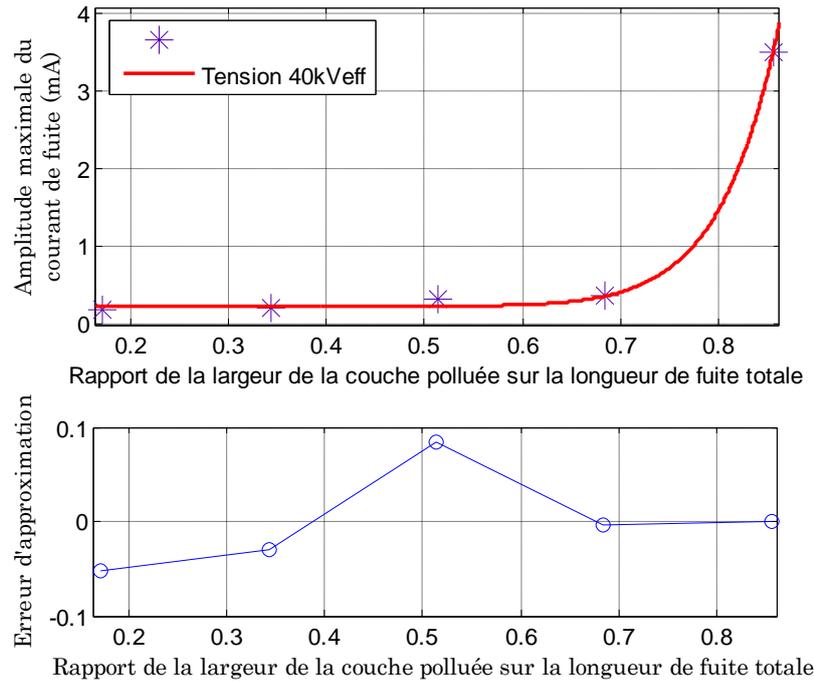


Figure VII.10 : Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale pour $40kV_{eff}$.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
a	30.73	-27.87	89.32	SSE	0.01082
b	14.4	1.979	26.83	R ²	0.9987
c	0.216	0.03101	0.4009	R ² ajusté	0.9974
				RMSE	0.07356

Tableau VII.X : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction du ratio entre la largeur de la couche centrale polluée et la longueur de fuite totale pour $40kV_{eff}$.

VII-4-2-Pollution uniforme :

Pour cette configuration, la modélisation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée n'est pas aisée. En effet, l'augmentation de cette grandeur est différente pour la faible conductivité volumique de 0.01 mS/cm, les conductivités intermédiaires 0.19, 0.71 et 1.2 mS/cm et la conductivité très élevée de 10.1 mS/cm. Dans chaque cas nous donnons un modèle mathématique particulier qui caractérise au mieux le comportement de l'isolateur plan. Cette difficulté repose sur l'apparition des décharges parallèles qui augmentent l'amplitude du courant de fuite pour certaines couches conductrices et diminuent celle-ci pour d'autres couches, à cause d'un assèchement partiel de la solution polluante se trouvant à la surface du plan.

Le modèle mathématique du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour 0.01 mS/cm (conductivité très faible) est polynomial d'expression :

$$I(v) = \zeta_1.v^2 + \zeta_2.v + \zeta_3$$

Le modèle mathématique du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour 0.19, 0.71 et 1.2 mS/cm (conductivités intermédiaires) s'exprime comme suit :

$$I(v) = a_1.(v - 3.6)^6 + a_2.(v - 1)^5 + a_3.v + a_4/v$$

Le modèle mathématique du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour 10.1 mS/cm (conductivité très élevée) est un polynôme du 3^{ème} degré :

$$I(v) = \zeta_1.v^3 + \zeta_2.v^2 + \zeta_3.v + \zeta_4$$

Les figures VII.11, VII.12 et VII.13 montrent les courbes de tendance correspondantes pour chaque catégorie de pollution.

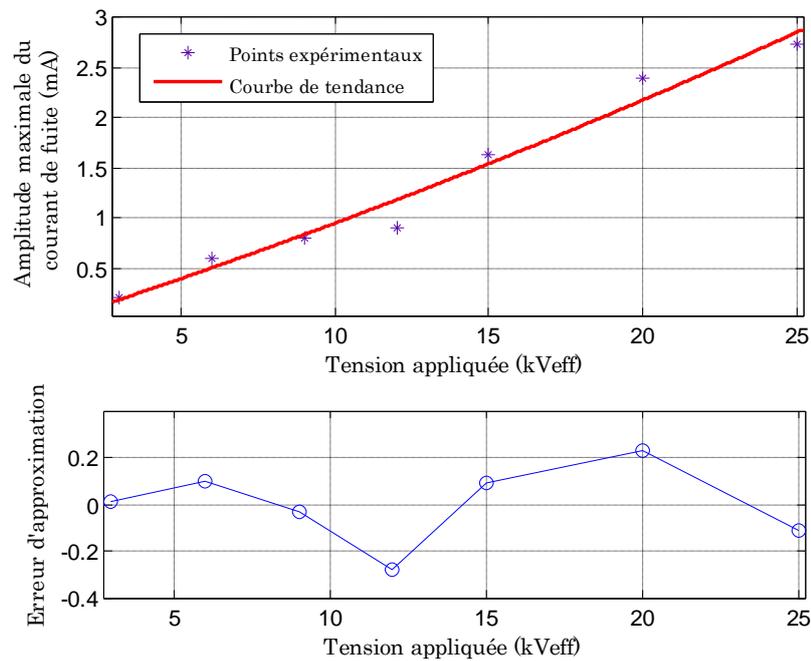
VII-4-2-1-Conductivité 0.01mS/cm :

Figure VII.11 : *Courbe de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée à une conductivité volumique de 0.01 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
ζ_1	0.0008171	-0.003652	0.005286	SSE	0.1611
ζ_2	0.09795	-0.03051	0.2264	R ²	0.9705
ζ_3	-0.1136	-0.8835	0.6563	R ² ajusté	0.9558
				RMSE	0.2007

Tableau VII.XI : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée à une conductivité volumique de 0.01 mS/cm.*

VII-4-2-2-Conductivités 0.19, 0.71 et 1.2 mS/cm:

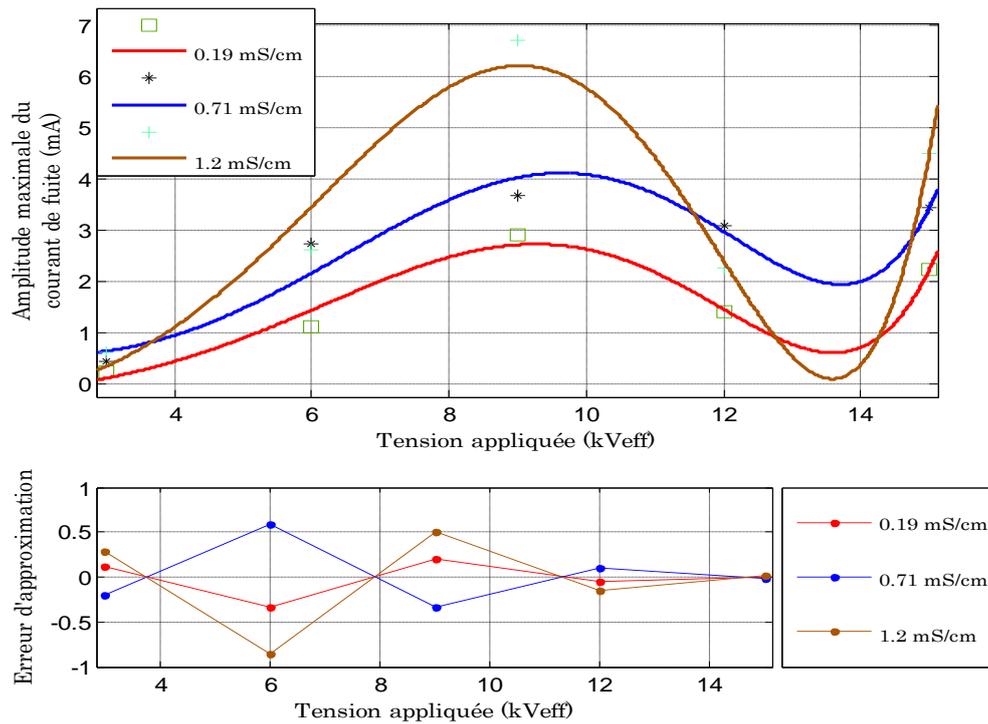


Figure VII.12 : Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée à 0.19, 0.71 et 1.2 mS/cm.

		Intervalle de confiance				Evaluation du modèle	
		Coefficients		Limite inférieure	Limite supérieure		
0.19 mS/cm	a1	1.765e-005	-3.417e-005	6.948e-005	SSE	0.1617	
	a2	-0.0001222	-0.0004494	0.0002049	R ²	0.9623	
	a3	0.008664	-0.0107	0.02803	R ² ajusté	0.8492	
	a4	-0.3825	-15.78	15.02	RMSE	0.4021	
0.71 mS/cm	a1	2.035e-005	-7.151e-005	0.0001122	SSE	0.508	
	a2	-0.0001477	-0.0007275	0.0004321	R ²	0.9245	
	a3	0.0113	-0.02302	0.04562	R ² ajusté	0.6979	
	a4	0.9989	-26.3	28.3	RMSE	0.7127	
1.2 mS/cm	a1	4.549e-005	-8.864e-005	0.0001796	SSE	1.083	
	a2	-0.0003085	-0.001155	0.0005381	R ²	0.9503	
	a3	0.02093	-0.02918	0.07104	R ² ajusté	0.801	
	a4	-0.6787	-40.54	39.18	RMSE	1.041	

Tableau VII.XII : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée à des conductivités volumiques de 0.19, 0.71 et 1.2 mS/cm.

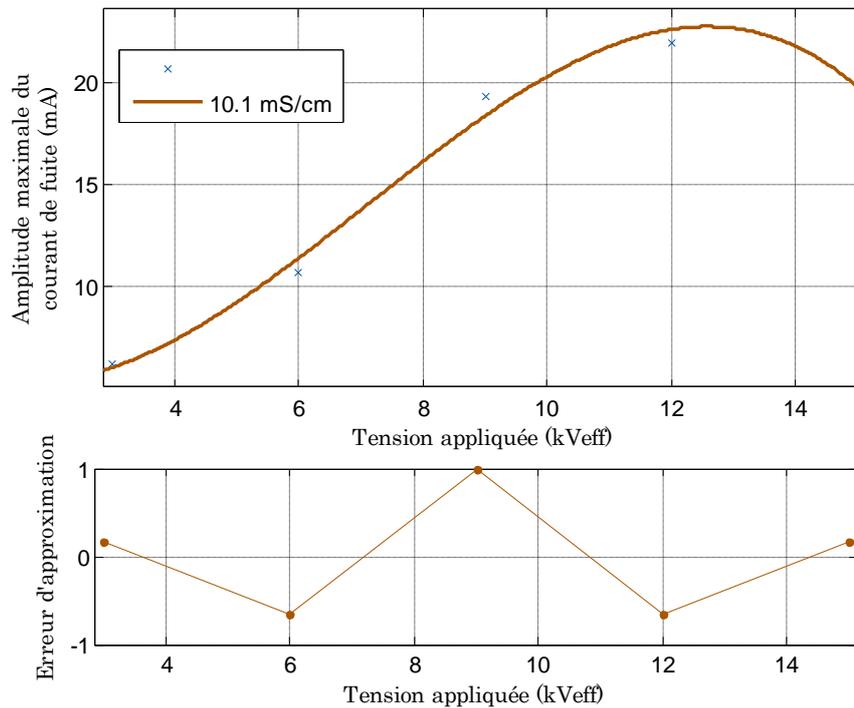
VII-4-2-3- Conductivité 10.1 mS/cm :

Figure VII.13 : *Courbe de tendance et erreur d'approximation pour le modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée à 10.1 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
p1	-0.02694	-0.1976	0.1437	SSE	1.894
p2	0.5759	-4.061	5.213	R ²	0.9899
p3	-1.698	-39.18	35.78	R ² ajusté	0.9594
p4	6.665	-79.36	92.69	RMSE	1.376

Tableau VII.XIII : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée à la conductivité volumique de 10.1 mS/cm.*

VII-5-Modélisation du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée :

Le but de cette modélisation est de quantifier la variation du déphasage courant-tension en fonction du ratio Ω afin de faciliter son étude pour des cas futurs. Cette étude permet également de voir l'évolution de l'impédance du milieu dans les cas uniforme et non-uniforme pour déterminer l'effet dominant (résistif ou capacitif) qui nous renseigne sur la rigidité du modèle pour chaque configuration de pollution.

VIII-5-1-Pollution uniforme :

Les variations du modèle mathématique pour la pollution uniforme sont montrées à la figure VII.14. Le modèle mathématique qui décrit au mieux les variations du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour la pollution uniforme est une fonction polynomiale du 3^{ème} degré d'expression :

$$\Phi(V) = \beta_1. V^3 + \beta_2. V^2 + \beta_3. V + \beta_4$$

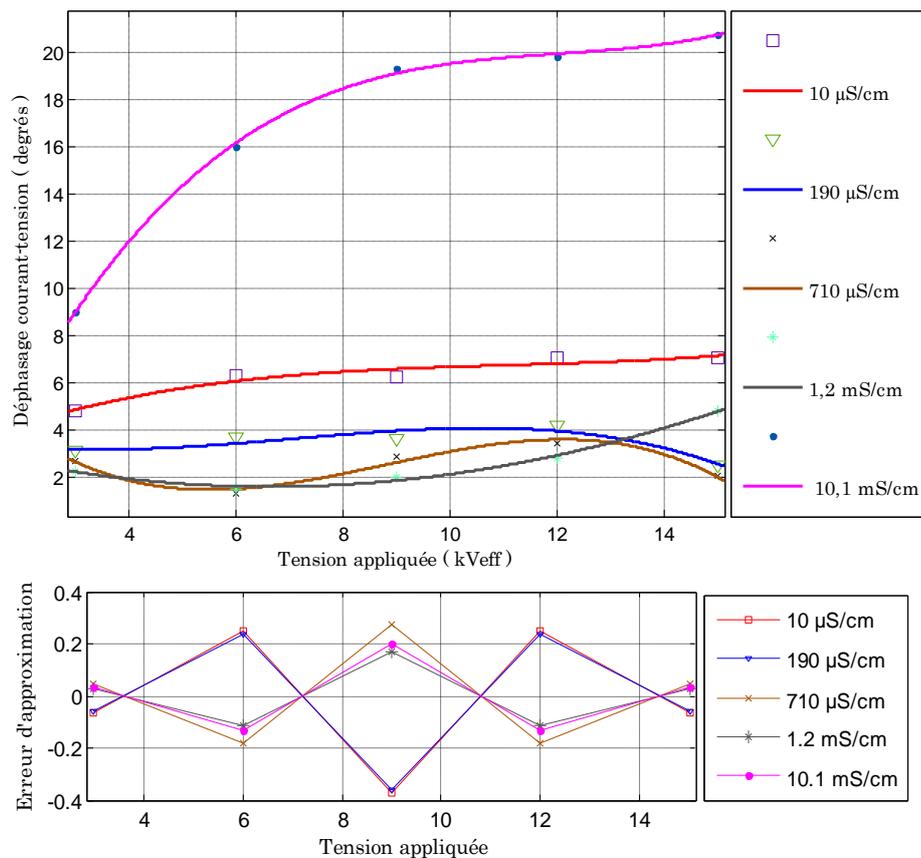


Figure VII.14 : Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du déphasage en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités.

Les paramètres statistiques nous indiquent que le modèle mathématique choisi est idéal pour décrire le comportement du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée. La prédiction d'autres valeurs est possible puisque le coefficient de détermination est très proche de 1 sauf pour la conductivité 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ où le modèle ne suit pas totalement les valeurs expérimentales mais peut prédire à 84,6% des valeurs autres que celles proposées.

	Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
			Limite inférieure	Limite supérieure		
0.01mS/cm	β_1	0.002531	-0.0615	0.06656	SSE	0.2666
	β_2	-0.08468	-1.825	1.655	R ²	0.9236
	β_3	1.01	-13.05	15.07	R ² ajusté	0.6943
	β_4	2.506	-29.77	34.78	RMSE	0.5163
0.19mS/m	β_1	-0.005216	-0.06703	0.05659	SSE	0.2484
	β_2	0.1108	-1.569	1.79	R ²	0.846
	β_3	-0.5908	-14.17	12.98	R ² ajusté	0.3841
	β_4	4.106	-27.05	35.26	RMSE	0.4984
0.71 mS/cm	β_1	-0.015	-0.06243	0.03243	SSE	0.1463
	β_2	0.3969	-0.8919	1.686	R ²	0.9447
	β_3	-3.014	-13.43	7.402	R ² ajusté	0.7786
	β_4	8.53	-15.38	32.44	RMSE	0.3825
1.2 mS/cm	β_1	-0.000216	-0.02912	0.02869	SSE	0.05432
	β_2	0.05179	-0.7336	0.8371	R ²	0.9917
	β_3	-0.6594	-7.007	5.688	R ² ajusté	0.9669
	β_4	3.75	-10.82	18.32	RMSE	0.2331
10.1 mS/cm	β_1	0.0129	-0.02178	0.04759	SSE	0.07822
	β_2	-0.4662	-1.409	0.4762	R ²	0.9992
	β_3	5.772	-1.845	13.39	R ² ajusté	0.9966
	β_4	-4.502	-21.98	12.98	RMSE	0.2797

Tableau VII.XIV : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du déphasage en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités.

VII-5-2-Pollution non-uniforme :

La modélisation du déphasage dans le cas non-uniforme en fonction du ratio Ω est également un polynôme du 3^{ème} degré d'expression :

$$\Phi(\Omega) = \alpha_1. \Omega^3 + \alpha_2. \Omega^2 + \alpha_3. \Omega + \alpha_4$$

VII-5-2-1-Pollution du côté HT :

La figure VII.12 montre l'évolution du déphasage dans le cas de la pollution du côté HT en fonction du ratio Ω .

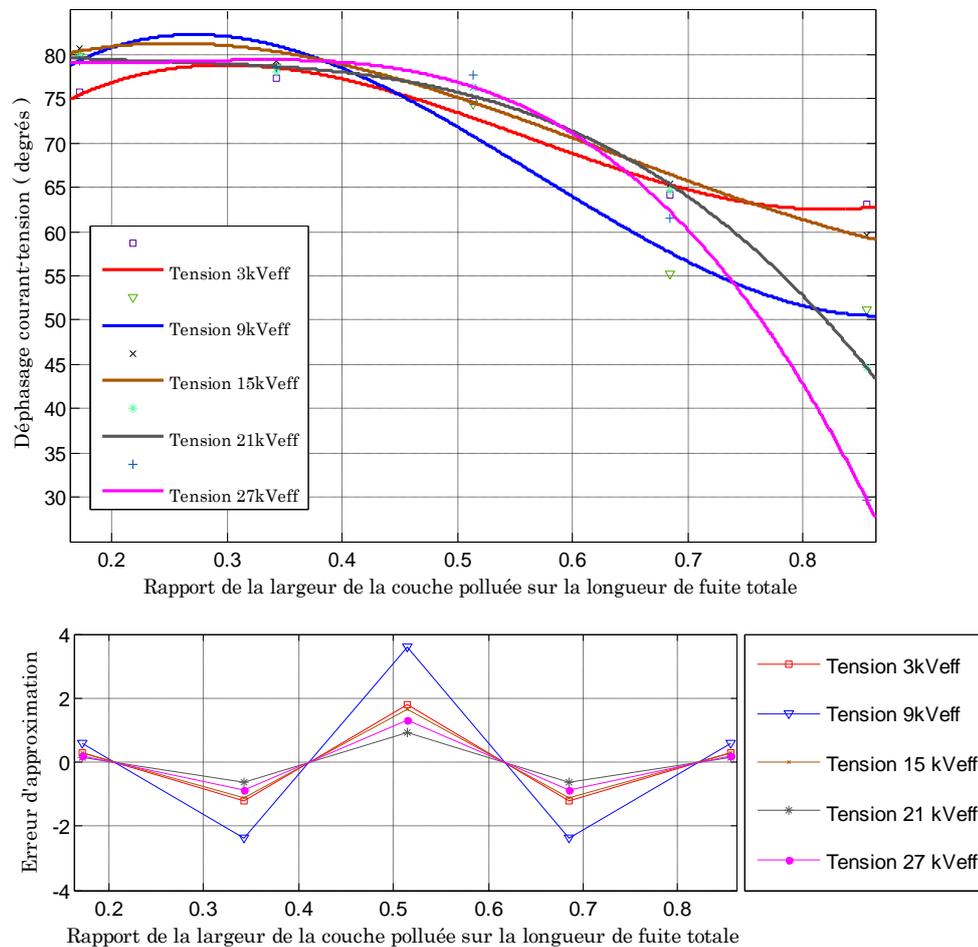


Figure VII.15 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du déphasage en fonction du ratio Ω du côté HT pour différents niveaux de tension.*

Nous remarquons que ce modèle décrit les variations du déphasage en fonction du ratio Ω de manière globale. Le coefficient R^2 indique une bonne prédiction pour les conductivités **0.71, 1.2 et 10.1mS/cm** contrairement aux conductivités **0.01 et 0.19 mS/cm** pour lesquelles le taux de prédiction est plus faible.

	Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
			Limite inférieure	Limite supérieure		
3kV	α_1	228.1	-1450	1906	SSE	6.336
	α_2	-383.8	-2986	2219	R ²	0.966
	α_3	168.5	-100.6	1369	R ² ajusté	0.864
	α_4	56.63	-29.77	213.9	RMSE	2.517
9kV	α_1	298.3	-3042	3639	SSE	25.1
	α_2	-510.1	-5691	4670	R ²	0.9661
	α_3	211.1	-2179	2601	R ² ajusté	0.8643
	α_4	56.54	-256.5	369.6	RMSE	5.01
15kV	α_1	110.8	-1426	1648	SSE	5.314
	α_2	-211.1	-2595	2172	R ²	0.9844
	α_3	85.51	-1014	1185	R ² ajusté	0.9377
	α_4	71.32	-72.71	215.3	RMSE	2.305
21kV	α_1	-139.5	-998.6	719.6	SSE	0.05432
	α_2	102.2	-1230	1435	R ²	0.9917
	α_3	-29.3	-643.9	585.3	R ² ajusté	0.9669
	α_4	82.27	1.756	162.8	RMSE	0.2331
27kV	α_1	-254.4	-1452	943.6	SSE	3.229
	α_2	204.7	-1653	2063	R ²	0.9982
	α_3	-51.36	-908.5	805.7	R ² ajusté	0.9928
	α_4	83.15	-29.12	195.4	RMSE	1.797

Tableau VII.XV : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du déphasage en fonction ratio Ω du côté HT appliquée pour différents niveaux de tension.

VII-5-2-2-Pollution du côté terre :

Les variations du déphasage pour la pollution du côté terre adhèrent d'avantage au modèle proposé et cela pour tous les niveaux de tension. Les erreurs commises sont minimales sauf pour la tension 27 kV_{eff} et sont réparties de façon aléatoire par rapport à l'axe des abscisses.

Les paramètres statistiques ont des valeurs satisfaisantes ; ainsi la prédiction est possible avec une erreur très mince comme le révèle la valeur du paramètre RMSE qui tend vers 0 sauf pour le niveau 27 kV_{eff}.

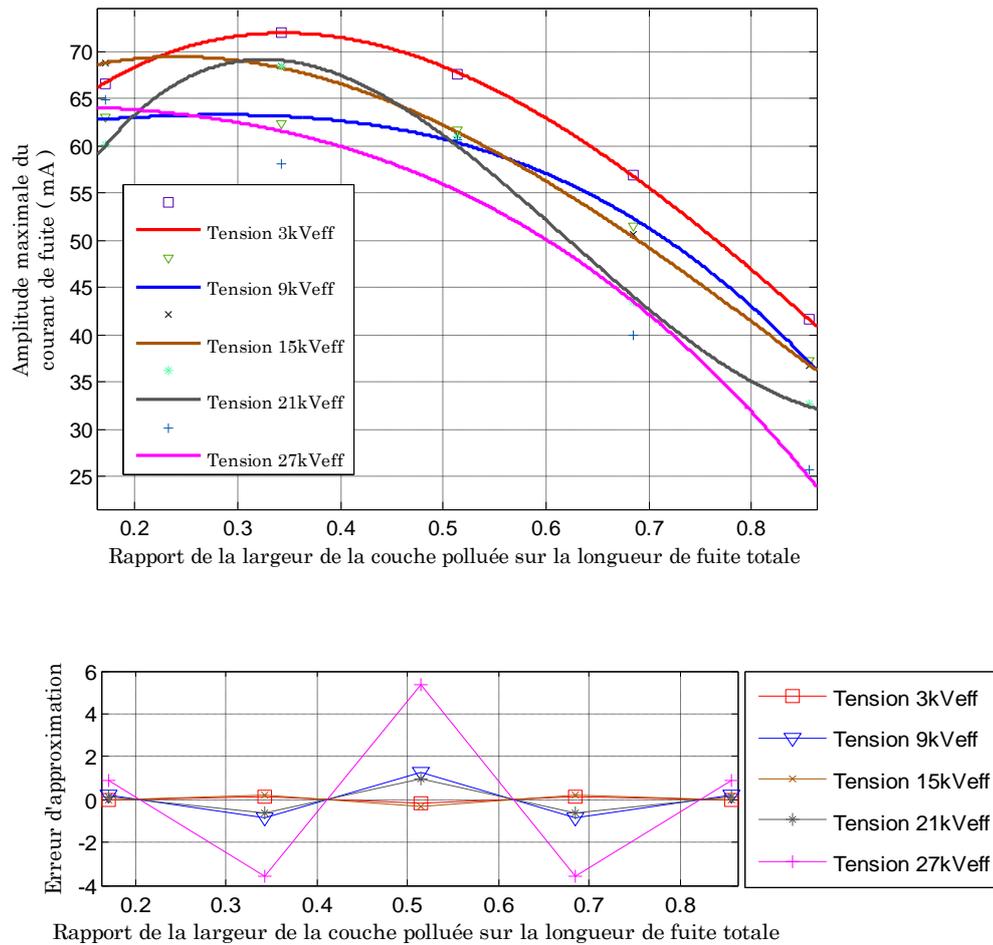


Figure VII.16 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du déphasage en fonction du ratio Ω du côté terre pour différents niveaux de tension.*

	Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
			Limite inférieure	Limite supérieure		
3kV	α_1	86.48	-50.23	223.2	SSE	0.04205
	α_2	-249.7	-461.7	-37.64	R ²	0.9999
	α_3	141.4	43.56	239.2	R ² ajusté	0.9997
	α_4	49.35	36.53	62.16	RMSE	0.2051
9kV	α_1	-68.3	-1265	1128	SSE	3.221
	α_2	16.83	-1839	1873	R ²	0.9934
	α_3	7.256	-848.8	863.3	R ² ajusté	0.9735
	α_4	61.44	-50.69	173.6	RMSE	1.795
15kV	α_1	63.96	-224.5	352.4	SSE	0.1871
	α_2	-172.6	-619.9	274.7	R ²	0.9997
	α_3	72.55	-133.8	278.9	R ² ajusté	0.999
	α_4	61.09	34.06	88.12	RMSE	0.4326
21kV	α_1	371.4	-520.3	1263	SSE	1.789
	α_2	-690.1	-2073	692.7	R ²	0.9979
	α_3	331.2	-306.7	969.2	R ² ajusté	0.9917
	α_4	21.66	-61.9	105.2	RMSE	1.337
27kV	α_1	-51.2	-5008	4905	SSE	55.27
	α_2	-13.05	-3543	3549	R ²	0.9491
	α_3	2.812	-908.5	805.7	R ² ajusté	0.7964
	α_4	64.21	-400.3	528.7	RMSE	7.434

Tableau VII.XVI : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du déphasage en fonction du ratio Ω du côté terre pour différents niveaux de tension.

VII-5-2-3-Pollution de la couche centrale :

Pour ce dernier cas, le modèle correspond exactement aux valeurs expérimentales ce qui le rend très intéressant pour décrire la variation du déphasage en fonction du ratio Ω . Ces variations sont montrées à la figure VII.17.

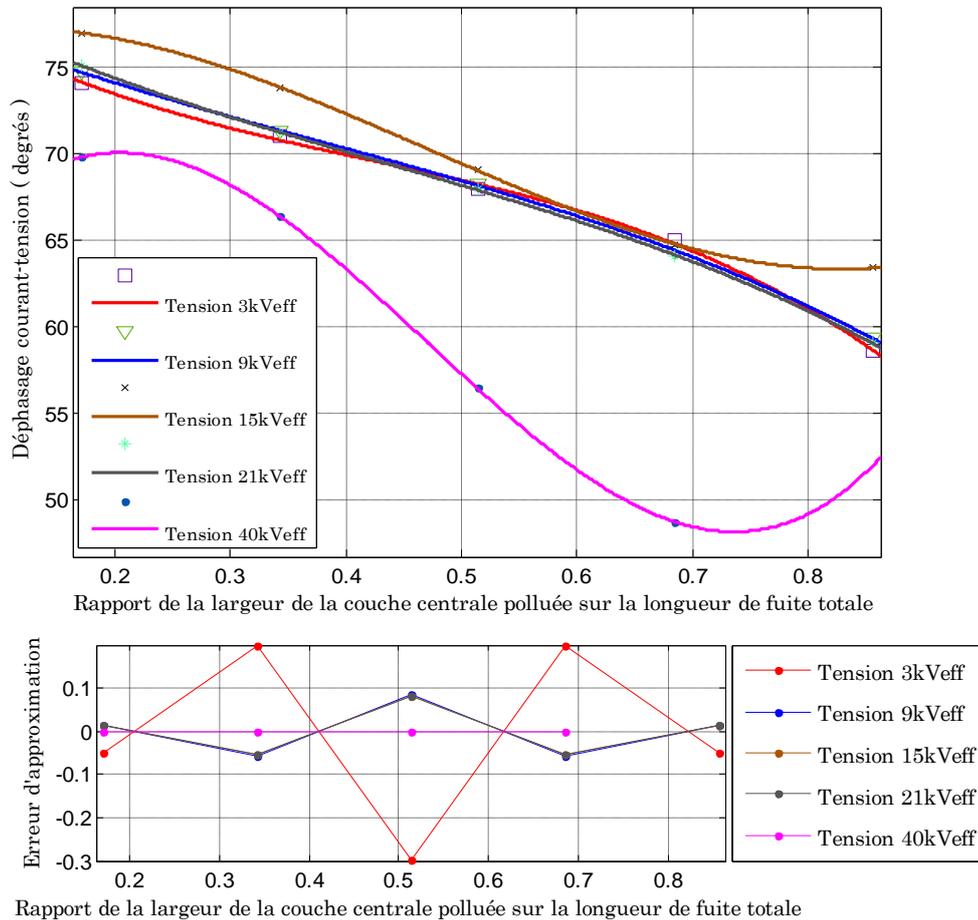


Figure VII.17 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du déphasage en fonction du ratio Ω de la couche centrale pour différents niveaux de tension.*

Nous remarquons d'après les valeurs affichées par les paramètres statistiques, que le modèle mathématique proposé pourra servir à la prédiction d'autres valeurs compte tenu de la valeur du coefficient R^2 qui est très proche de 1. Pour le niveau 40 kV_{eff}, l'erreur est la plus petite mais le modèle ne peut servir à la prédiction de valeurs supérieures à la couche 20 cm. Toutefois, il est possible de considérer une fonction polynômiale du second degré qui donne des résultats encore plus satisfaisants pour la prédiction à 40 kV_{eff}.

	Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
			Limite inférieure	Limite supérieure		
3kV	α_1	-57.6	-333.2	218	SSE	0.1709
	α_2	72.97	-354.4	500.4	R ²	0.9988
	α_3	-45.2	-242.4	152	R ² ajusté	0.9951
	α_4	80.04	54.21	105.9	RMSE	0.4134
9kV	α_1	-25.4	-103.6	52.8	SSE	0.01376
	α_2	29.3	-91.98	150.6	R ²	0.9999
	α_3	-29.45	-85.4	26.5	R ² ajusté	0.9996
	α_4	79.03	71.7	86.35	RMSE	0.1173
15kV	α_1	75.34	-0.4544	151.1	SSE	0.01293
	α_2	-106.3	-223.9	11.22	R ²	0.9999
	α_3	20.93	-33.3	75.16	R ² ajusté	0.9996
	α_4	76.14	69.04	83.24	RMSE	0.1137
21kV	α_1	-30.71	-105.7	44.28	SSE	0.01265
	α_2	40.18	-76.11	156.5	R ²	0.9999
	α_3	-36.77	-90.42	16.88	R ² ajusté	0.9997
	α_4	80.37	73.34	87.4	RMSE	0.1125
40kV	α_1	290	/	/	SSE	3.484e-027
	α_2	-409.3	/	/	R ²	1
	α_3	130.9	/	/	R ² ajusté	/
	α_4	57.94	/	/	RMSE	/

Tableau VII.XVII : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du déphasage en fonction du ratio Ω de la couche centrale pour différents niveaux de tension.

VII-6-Modélisation de la longueur et du nombre des décharges parallèles :

La modélisation de la longueur et du nombre des décharges parallèles est établie en fonction de la tension appliquée pour la pollution uniforme. Elle nous permettra d'évaluer mathématiquement l'évolution des décharges pour comprendre réellement l'effet de la tension appliquée et de la conductivité volumique du milieu.

VII-6-1-Modélisation de la longueur des décharges parallèles :

Le modèle mathématique qui lie la longueur des décharges à la tension appliquée du côté HT et du côté terre, pour les conductivités 0.01, 0.19 et 0.71 mS/cm est exprimé par :

$$L(v) = K.e^{\lambda.v}$$

Pour les conductivités élevées (1.2 et 10.1 mS/cm), le modèle mathématique pour le côté HT est identique au précédent sauf pour le côté terre. En effet, le modèle qui décrit au mieux le phénomène est exprimé par :

$$L(v) = K_1.v^p + \tau$$

Cette différence vis-à-vis du modèle montre que le comportement des décharges parallèles pour les grandes conductivités diffère totalement des faibles conductivités bien que les niveaux de tensions appliquées soient relativement proches.

Dans ce qui suit, nous présentons les courbes de tendance, les erreurs d'approximation et les paramètres statistiques pour chaque conductivité volumique de la surface conductrice.

VII-6-1-1-Conductivité 0.01 mS/cm :

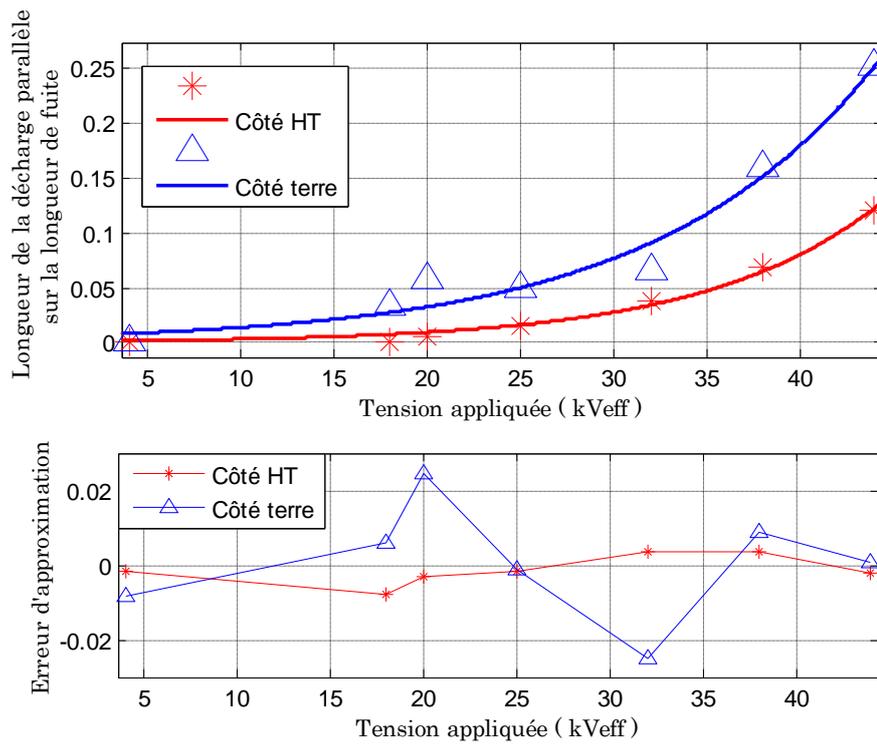


Figure VII.18 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle de la longueur des décharges parallèles en fonction de la tension pour 0.01 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
K	0.001145	0.0002516	0.002038	SSE	0.0001057
λ	0.1062	0.08761	0.1248	R ²	0.9913
Coté HT				R ² ajusté	0.9896
				RMSE	0.004597
K	0.005969	-7.932e-005	0.01202	SSE	0.001408
λ	0.08508	0.06038	0.1098	R ²	0.9694
Coté terre				R ² ajusté	0.9602
				RMSE	0.01229

Tableau VII.XVIII : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la longueur des décharges en fonction de la tension appliquée pour 0.01 mS/cm.*

VII-6-1-2-Conductivité 0.19 mS/cm :

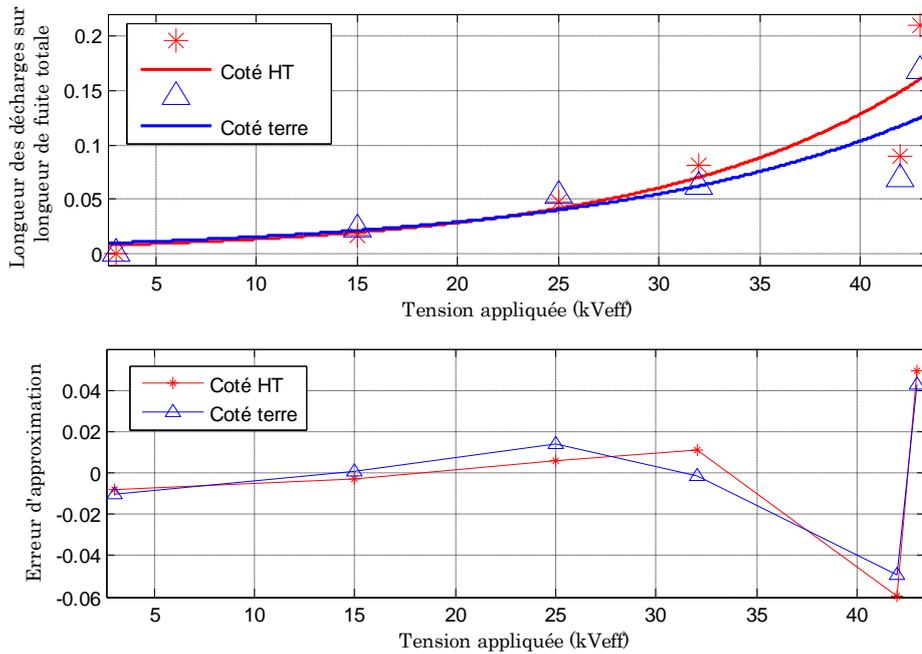


Figure VII.19 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle de la longueur des décharges parallèles en fonction de la tension pour 0.19 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
K	0.008255	-0.02004	0.03655	SSE	0.004557
λ	0.06326	-0.02126	0.1478	R ²	0.7291
Côté terre				R ² ajusté	0.6613
				RMSE	0.03375
K	0.006364	-0.01864	0.03137	SSE	0.006265
λ	0.07511	-0.02051	0.1707	R ²	0.7795
Côté HT				R ² ajusté	0.7243
				RMSE	0.03958

Tableau VII.XIX : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la longueur des décharges en fonction de la tension appliquée pour 0.19 mS/cm.*

VII-6-1-3-Conductivité 0.71 mS/cm :

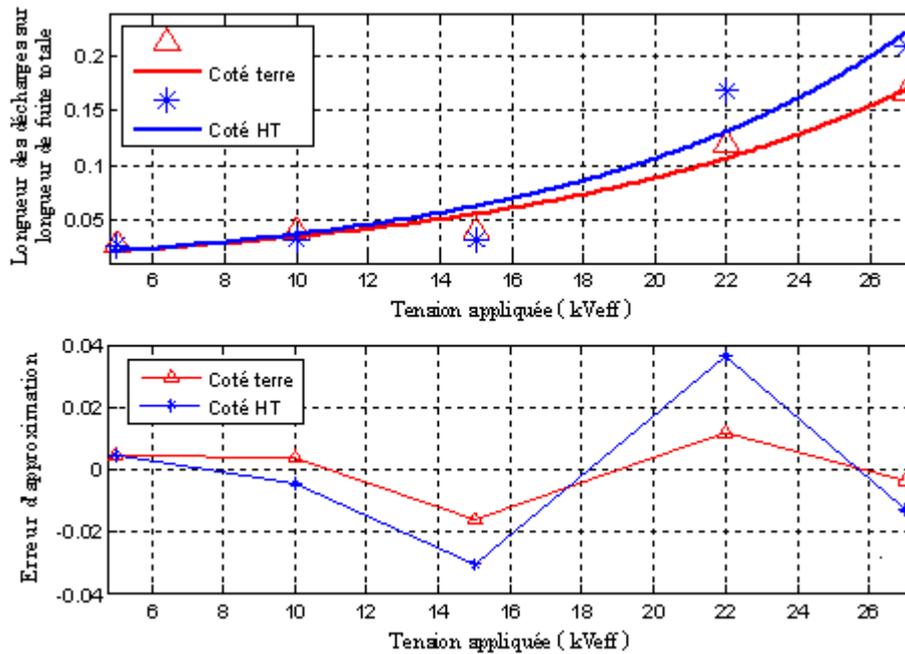


Figure VII.20 : Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle de la longueur des décharges parallèles en fonction de la tension pour 0.71 mS/cm.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
K	0.01308	-0.01373	0.03988	SSE	0.002491
λ	0.1049	0.02304	0.1868	R ²	0.9197
Coté HT				R ² ajusté	0.8929
				RMSE	0.02882
K	0.01388	0.0003304	0.02744	SSE	0.0004531
λ	0.09282	0.05322	0.1324	R ²	0.9701
Coté terre				R ² ajusté	0.9602
				RMSE	0.01229

Tableau VII.XX : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la longueur des décharges en fonction de la tension appliquée pour 0.71 mS/cm.

VII-6-1-4-Conductivité 1.2 mS/cm :

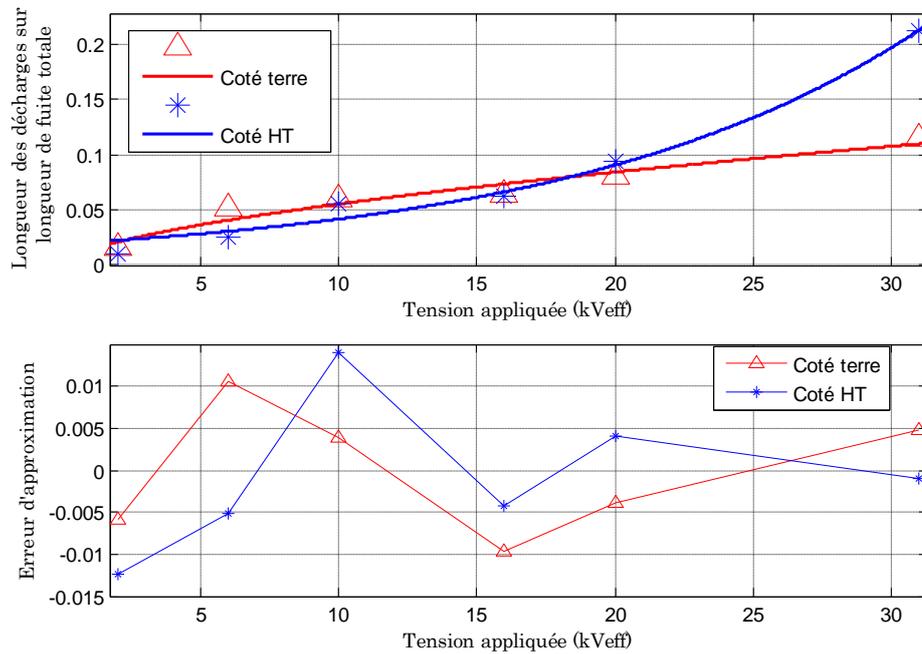


Figure VII.21 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle de la longueur des décharges parallèles en fonction de la tension pour 1.2 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
K	0.01908	0.0102	0.02795	SSE	0.0004091
λ	0.07786	0.0613	0.09442	R ²	0.9845
Coté HT				R ² ajusté	0.9806
				RMSE	0.01011
K_1	0.0136	0.003188	0.024	SSE	0.0002907
ρ	0.6085	0.3543	0.8627	R ²	0.9465
Coté terre				R ² ajusté	0.9331
				RMSE	0.008525

Tableau VII.XXI : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la longueur des décharges en fonction de la tension appliquée pour 1.2 mS/cm.*

VII-6-1-5-Conductivité 10.1 mS/cm :

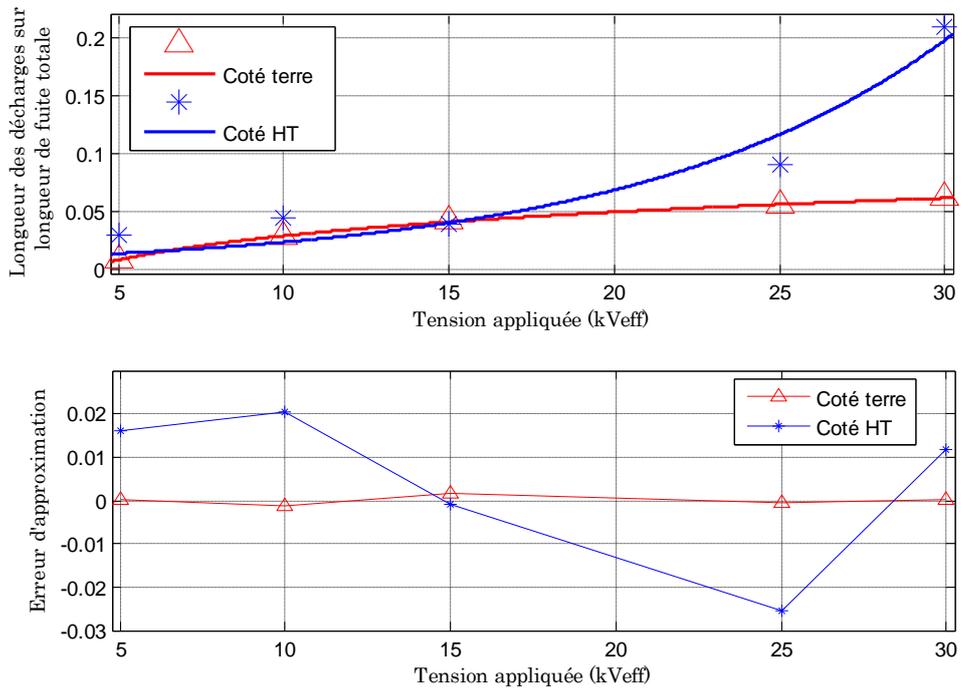


Figure VII.22 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle de la longueur des décharges parallèles en fonction de la tension pour 10.1 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
K	0.008296	-0.009711	0.0263	SSE	0.00147
λ	0.1056	0.02891	0.1823	R ²	0.9336
Coté HT				R ² ajusté	0.9114
				RMSE	0.02213
K_1	-3.377	-199.5	192.7	SSE	3.944e-006
ρ	-0.00898	-0.5421	0.5241	R ²	0.9979
τ	3.337	-192.8	199.5	R ² ajusté	0.9957
Coté terre				RMSE	0.001404

Tableau VII.XXII : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle de la longueur des décharges en fonction de la tension appliquée pour 10.1 mS/cm.*

VII-6-2-Modélisation du nombre de décharges parallèles :

Le but de cette modélisation est d'établir une expression empirique qui explique l'augmentation du nombre de décharges parallèles jusqu'à un certain seuil de tension et en même temps sa diminution juste avant la décharge de contournement. En réalité, ce nombre augmente différemment du côté HT et du côté terre.

Pour les faibles conductivités (0.01, 0.19 et 0.71 mS/cm) le modèle mathématique exprimant le nombre de décharges parallèles pour le côté HT est de la forme :

$$N_H(v) = \frac{\omega_1.v + \omega_2}{v^2 + \omega_3.v + \omega_4}$$

Pour les faibles conductivités et pour l'électrode mise à la terre, le modèle mathématique s'exprime par :

$$N_T(v) = \varepsilon_1.v^2 + \varepsilon_2.v + \varepsilon_3$$

Pour la conductivité 1.2 mS/cm, le modèle mathématique qui exprime le nombre de décharges parallèles du côté HT est similaire à celui pour les faibles conductivités. L'expression diffère pour le côté terre ; elle est telle que :

$$N_H(v) = \frac{\mu_1}{v^2 + \mu_2.v + \mu_3}$$

Pour la conductivité 10.1 mS/cm (très élevée), le modèle mathématique pour les côtés HT et terre est de forme polynomiale :

$$N(v) = \theta_1.v^3 + \theta_2.v^2 + \theta_3.v + \theta_4$$

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats pour les différentes conductivités et les deux électrodes du modèle plan.

VII-6-2-1-Conductivité 0.01 mS/cm :

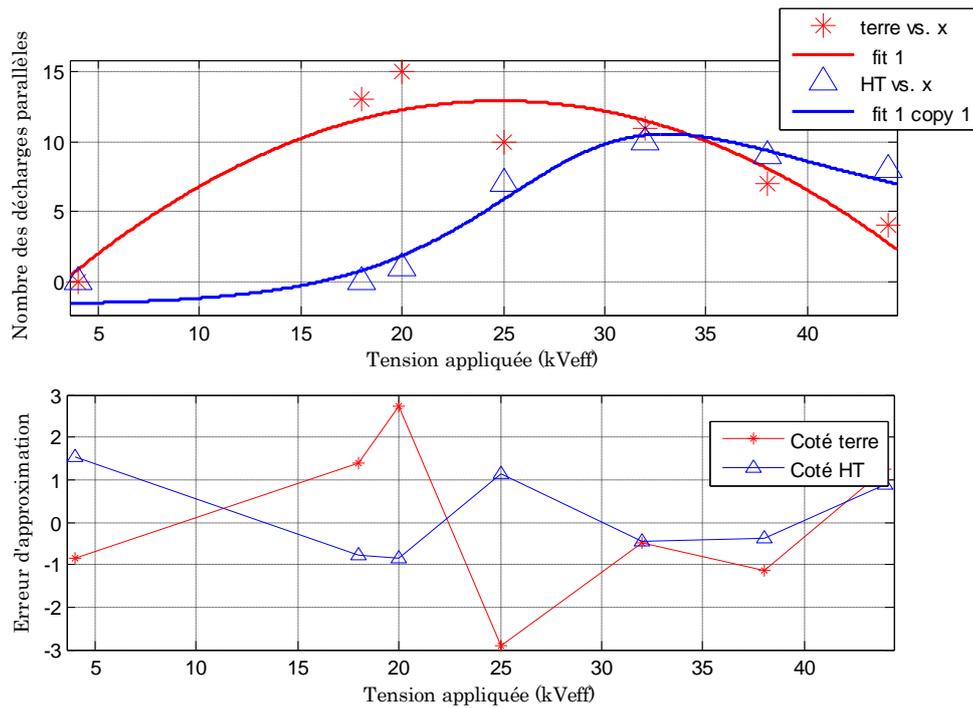


Figure VII.23 : Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 0.01 mS/cm.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
ω_1	94.19	-38.88	227.3	SSE	6.1
ω_2	-1501	-4182	1180	R ²	0.9492
ω_3	-57.16	-73.91	-40.42	R ² ajusté	0.8983
ω_4	949.8	495.2	1404	RMSE	1.426
Coté HT					
ε_1	-0.02774	-0.04272	-0.01275	SSE	21.72
ε_2	1.379	0.6211	0, 2.137	R ²	0.8689
ε_3	-4.225	-12.88	4.43	R ² ajusté	0.8034
				RMSE	2.33
Coté terre					

Tableau VII.XXIII : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 0.01 mS/cm.

VII-6-2-2-Conductivité 0.19 mS/cm :

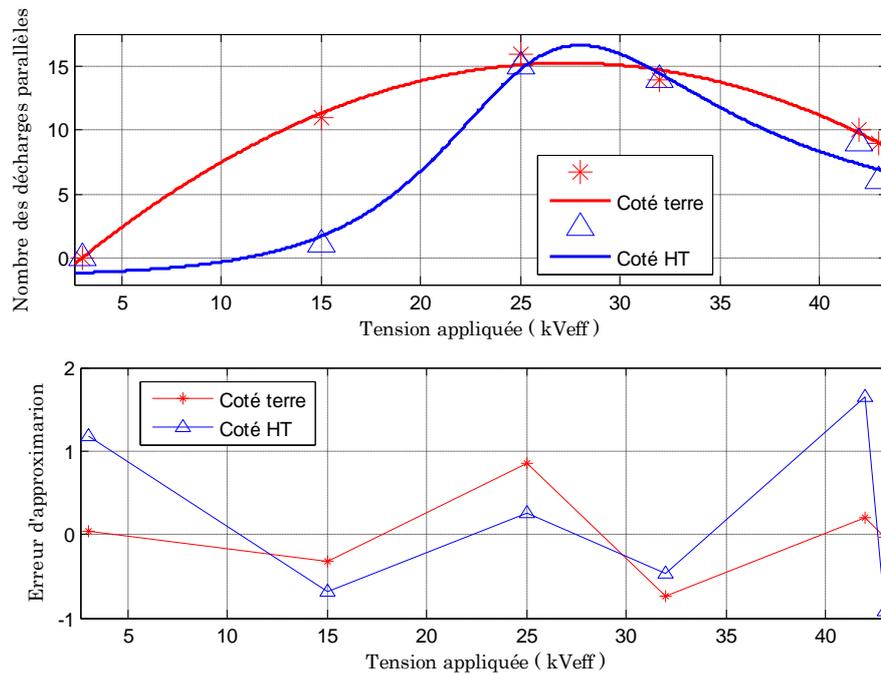


Figure VII.24 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 0.19 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
ω_1	83.82	-59.74	227.4	SSE	5.688
ω_2	-942.2	-3682	1798	R ²	0.9718
ω_3	-50.99	-67.82	-34.17	R ² ajusté	0.9294
ω_4	728.1	351.3	1105	RMSE	1.686
Coté HT					
ε_1	-0.02575	-0.03109	-0.02041	SSE	1.443
ε_2	1.411	1.148	1.674	R ²	0.9906
ε_3	-4.045	-6.752	-1.337	R ² ajusté	0.9844
				RMSE	0.6935
Coté terre					

Tableau VII.XXIV : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 0.19 mS/cm.*

VII-6-2-3-Conductivité 0.71 mS/cm :

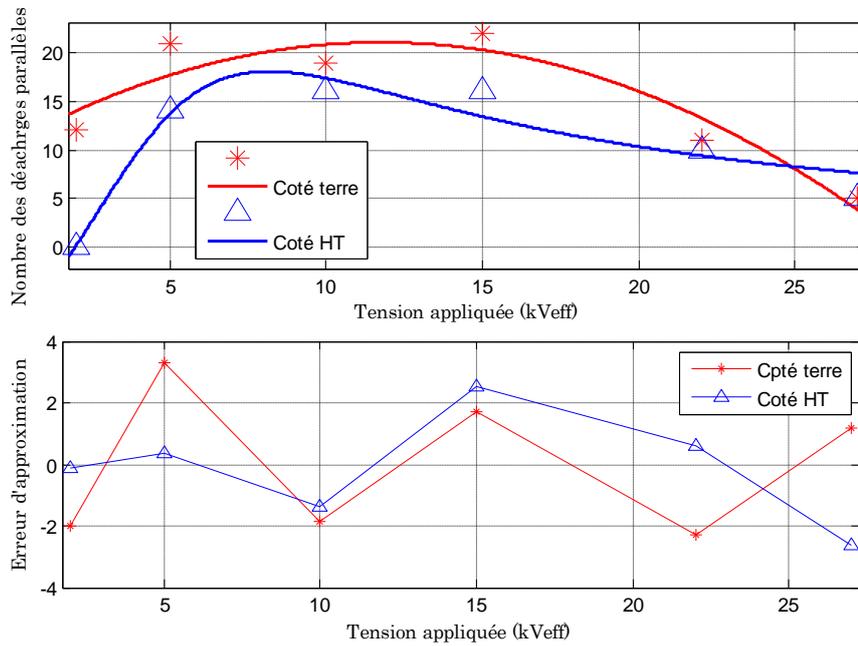


Figure VII.25 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 0.71 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
ω_1	187	-187.2	561.2	SSE	15.89
ω_2	-369.2	-1292	553.3	R ²	0.9253
ω_3	-6.029	-33.93	21.87	R ² ajusté	0.8133
ω_4	46.56	-57.11	150.2	RMSE	2.819
Coté HT					
ε_1	-0.07428	-0.1394	-0.009136	SSE	27.94
ε_2	1.748	-0.1873	3.683	R ²	0.8764
ε_3	10.81	-0.2676	21.88	R ² ajusté	0.794
				RMSE	3.052
Coté terre					

Tableau VII.XXV : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 0.71 mS/cm.*

VII-6-2-4-Conductivité 1.2 mS/cm :

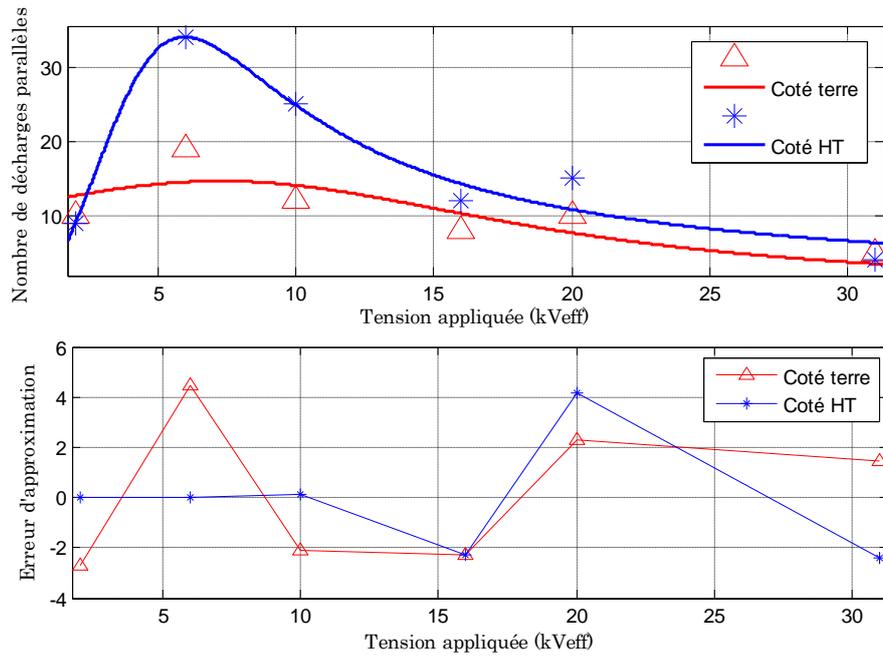


Figure VII.26 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 1.2 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
ω_1	163.2	-223.9	550.4	SSE	28.27
ω_2	-132.5	-1633	1368	R ²	0.9539
ω_3	-7.157	-31.48	17.16	R ² ajusté	0.8848
ω_4	31.85	-96.08	159.8	RMSE	3.76
Coté HT					
μ_1	2634	-5247	1.052e+004	SSE	44.2
μ_2	-14.55	-39.28	10.18	R ²	0.603
μ_3	232.4	-286.7	751.5	R ² ajusté	0.3384
				RMSE	3.838
Coté terre					

Tableau VII.XXVI : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 1.2 mS/cm.*

VII-6-2-5-Conductivité 10.1 mS/cm :

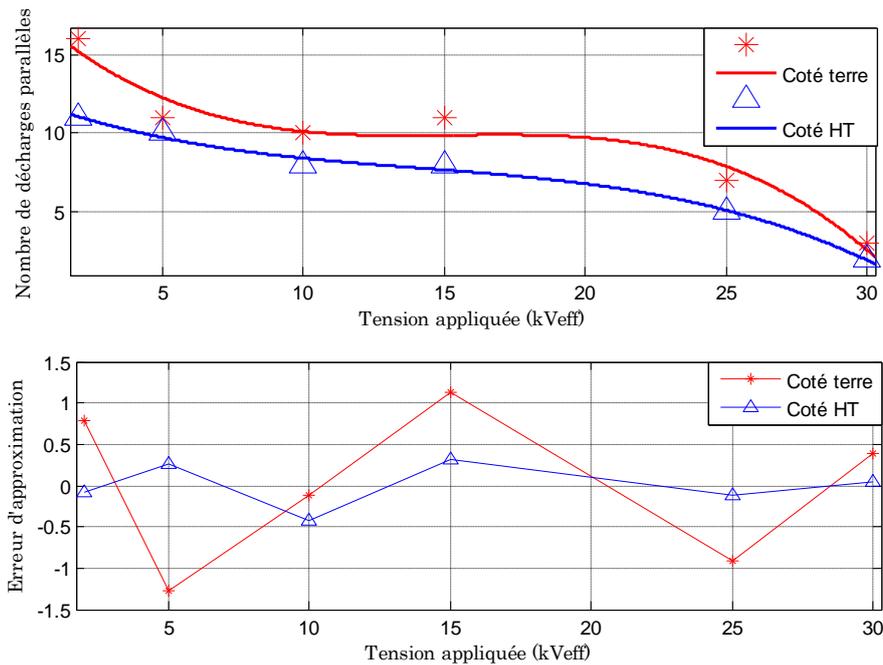


Figure VII.27 : *Courbes de tendance et erreurs d'approximation pour le modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 10.1 mS/cm.*

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
θ_1	-0.0009136	-0.002371	0.0005434	SSE	0.379
θ_2	0.03866	-0.03011	0.1074	R ²	0.9932
θ_3	-0.6824	-1.575	0.2102	R ² ajusté	0.9829
θ_4	12.3	9.336	15.26	RMSE	0.4353
Coté HT					
θ_1	-0.002394	-0.007409	0.00262	SSE	4.49
θ_2	0.1099	-0.1268	0.3466	R ²	0.9529
θ_3	-1.659	-4.731	1.413	R ² ajusté	0.8823
θ_4	18.12	7.927	28.31	RMSE	1.498
Coté terre					

Tableau VII.XXVII : *Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle du nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour 10.1 mS/cm.*

VII-6-3- Modélisation des longueurs critiques des décharges parallèles :

L'avantage de cette modélisation est de donner une expression empirique qui lie le ratio de la longueur critique de la décharge électrique et la longueur de fuite totale avant le contournement, avec la conductivité de la surface polluée. Le but est de prédire des contournements pour d'autres conductivités volumiques plus élevées.

L'expression mathématique donnant cette relation est de forme exponentielle décroissante telle que :

$$R_c(\sigma) = q_1 \cdot e^{-\sigma} + q_2$$

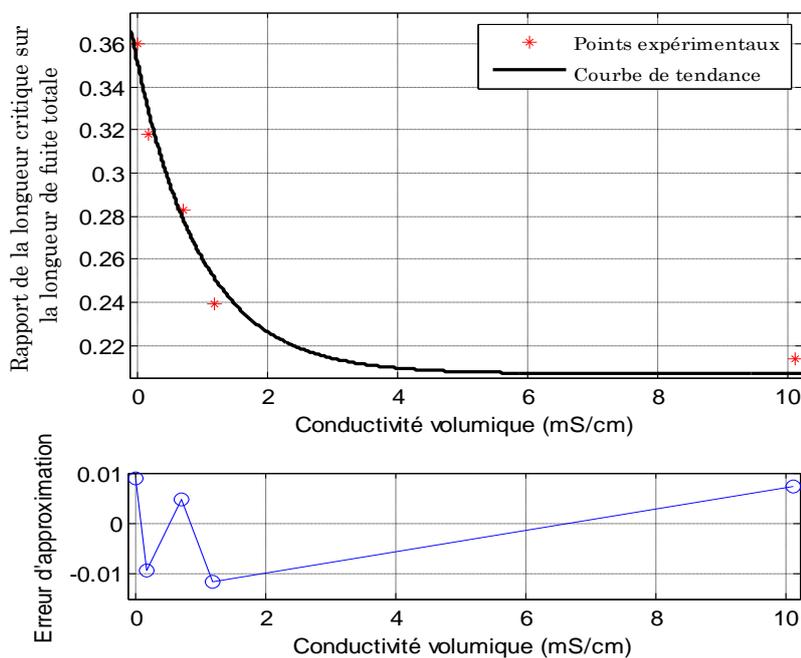


Figure VII.28 : Courbe de tendance et erreur d'approximation pour le modèle donnant le ratio R_c en fonction de la conductivité volumique du milieu pollué.

Coefficients		Intervalle de confiance		Evaluation du modèle	
		Limite inférieure	Limite supérieure		
q_1	0.1458	0.1011	0.1905	SSE	0.0003755
q_2	0.2067	0.1785	0.235	R^2	0.9729
				R^2 ajusté	0.9639
				RMSE	0.01119

Tableau VII.XXIII : Coefficients et paramètres d'évaluation du modèle donnant le ratio R_c en fonction de la conductivité volumique du milieu pollué.

VII-7-Conclusion sur la modélisation :

Cette dernière partie nous a permis de modéliser mathématiquement le comportement de l'isolateur plan en tenant compte des principales variantes électriques (Tension de contournement , courant de fuite) ainsi que les contraintes d'état de surface (pollution uniforme et non-uniforme).

Il est évident que la répartition de la pollution à la surface de l'isolateur et le niveau de tension appliquée modifient l'attitude de l'isolateur en particulier pour les décharges parallèles. Ces dernières ont un comportement qui dépend de la conductivité du milieu pour la configuration uniforme et de la largeur de la couche polluée pour la configuration non-uniforme.

Les paramètres statistiques d'évaluation ont été très utiles pour déterminer la meilleure représentation des données expérimentales en particulier le coefficient de détermination R^2 .

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de voir l'impact de la répartition de la couche polluée (uniforme et non-uniforme) sur le comportement d'un modèle plan de l'isolateur 1512 L, qui a été choisi pour faciliter l'étude du développement des décharges parallèles sur sa surface conductrice.

Dans un premier temps, l'étude de la tension de contournement pour la conductivité uniforme révèle que le modèle perd de sa rigidité diélectrique au fur et à mesure que la conductivité volumique du milieu augmente. Pour la conductivité non-uniforme, la tension de contournement diminue avec l'élargissement de la couche polluée. Le modèle est plus rigide lorsque la couche conductrice de conductivité volumique 1.2 mS/cm est située au centre de la plaque isolante. Cette tension présente un minimum lorsque 85,6% de la distance inter-électrode est conductrice.

L'étude du courant de fuite montre que son amplitude maximale croît avec l'augmentation de la conductivité du milieu (pollution uniforme), l'agrandissement de la largeur de la couche polluée (pollution non-uniforme) et l'augmentation de la tension appliquée. L'amorçage d'une décharge parallèle dans les intervalles d'air couche conductrice-électrode (terre ou HT) est réalisé pour des tensions élevées (27 kV_{eff} pour la pollution du côté HT et terre et 36 kV_{eff} pour une pollution au centre). Cet amorçage fait augmenter de manière exponentielle l'amplitude maximale du courant de fuite (signe de contournement très proche).

La détermination du déphasage courant de fuite-tension appliquée permet de comprendre le comportement du circuit équivalent du modèle d'isolateur. Pour la pollution uniforme, l'effet résistif est dominant au fur et mesure que la conductivité volumique de la solution électrolytique augmente. Pour la pollution non-uniforme, l'effet capacitif est dominant pour une petite largeur de la couche polluée (5 cm dans notre cas) mais diminue avec l'agrandissement de celle-ci. L'amorçage d'une décharge parallèle participe énormément à l'augmentation de l'effet résistif en court-circuitant les intervalles d'air entre la couche conductrice et l'électrode (terre ou HT) ; il diminue l'effet capacitif de l'isolateur et donc son impédance totale équivalente. L'augmentation du niveau de tension (cas sec) à partir d'un certain palier (30 kV_{eff} dans notre cas) participe à la diminution de son effet capacitif qui peut être due à l'augmentation de la température.

Les observations des décharges parallèles par le caméscope permettent de constater que leur nombre augmente jusqu'à un certain seuil de tension puis diminue par la suite, laissant une seule décharge progresser jusqu'au contournement total. La longueur critique de la décharge principale diminue avec l'augmentation de la conductivité volumique. Cette diminution peut être due à l'affaiblissement de la résistance de la couche polluée ainsi qu'à l'augmentation de l'intensité du champ électrique dans la triple jonction air-isolant-couche électrolytique ; ce champ fait apparaître des arcs sur toute la surface de l'isolateur, dus à l'assèchement de certaines zones. Ces arcs participent à la création d'un canal ionisé le long duquel aura lieu la décharge finale.

Dans un second temps, l'analyse de l'énergie des harmoniques du courant de fuite permet de conclure qu'un diagnostic de la sévérité de pollution est possible en se fiant aux 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques, que se soit pour la pollution uniforme ou pour la pollution non-uniforme. La distinction entre les deux pollutions est établie grâce au courant de fuite, par la domination des 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques dans le cas uniforme et la domination des 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques dans le cas non-uniforme. L'amorçage des décharges parallèles contribue à l'assèchement de la couche électrolytique à cause d'une élévation significative de l'énergie des 1^{er}, 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques en plus des harmoniques de rang supérieur au 11^{ème}. Cet assèchement est plus rapide dans le cas des conductivités volumiques élevées (1.2 et 10.1 mS/cm). Le niveau de tension influe également sur l'évaporation de la couche électrolytique ; en effet plus la tension augmente plus l'assèchement du plan est important. Toutefois, cet assèchement ne diminue pas pour autant la valeur maximale du courant de fuite pour les conductivités élevées, à cause de l'existence de décharges parallèles à la surface, créées par la grande intensité du champ électrique.

Le diagnostic de l'état de surface par la techniques des ondelettes nous a également permis de caractériser la sévérité de la pollution grâce au signal de la tension appliquée (conductivité uniforme) via la CWT et pendant l'activité des décharges parallèles. En effet, plus la conductivité volumique du milieu augmente plus les distorsions de la tension tendent vers les hautes fréquences. Cela signifie que la fréquence d'apparition des décharges électriques augmente en fonction de la conductivité du milieu. Pour la pollution non-uniforme, la DWT est plus utile pour estimer l'élargissement de la couche polluée de conductivité 1.2 mS/cm et différencier les trois cas de pollution. En effet l'analyse multi résolution permet de suivre l'évolution des composantes fréquentielles du courant de fuite, en se basant sur la représentation STD-MRA plot qui mesure qualitativement l'énergie du signal et permet de cibler le détail susceptible de caractériser la sévérité de la pollution pour chaque cas. Les détails D_{10} , D_8 et D_1 permettent d'identifier le positionnement de la couche polluée selon qu'elle est du côté de l'électrode HT, de l'électrode terre ou au centre du modèle plan.

Enfin, la modélisation du comportement du modèle plan nous a permis de constater que la répartition de la couche polluée, sa conductivité et le niveau de tension appliquée influencent l'attitude adoptée par la tension de contournement, la valeur maximale du courant de fuite, le déphasage courant de fuite-tension appliquée, la longueur et le nombre des décharges parallèles à la surface de l'isolateur considéré. En réalité cette modélisation permet de prédire le contournement de l'isolateur pour les cas de figures étudiés.

La confirmation de ces conclusions concernant la caractérisation de l'état de surface pourrait être obtenue en effectuant d'avantage d'essais sur le modèle plan proposé.

Nous espérons, par cette modeste contribution, avoir apporté quelque éclairage aux hypothèses émises récemment par des chercheurs du monde entier, dont les publications ont été notre référence de départ.

*Références
bibliographiques*

- [1] N.Dhahbi-Megrache, A.Beroual, L.Krahenbuhl, « *A New Proposal Model for Flashover of Polluted Insulators* », J. Phys. D. Appl. Phys. pp 889–894, 1997.
- [2] M.T.Gencoglu, M.Cebeci, « *The pollution flashover on high voltage insulators* », Electric Power Systems Research 78, pp 1914–1921, 2008.
- [3] N. Dhahbi-Megrache, A. Beroual, « *Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage* », IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul, Vol.2, No 7, pp 283–289, 2000.
- [4] A.M. Rahal, C. Huraux, « *Flashover mechanism of high voltage insulators* », IEEE Trans. Power Apparatus Syst.Vol.6, No.98 ,pp 2223–2231, 1979.
- [5] M.Teguar, « *Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électroGéométriques* », thèse de doctorat d'état à l'ENP, Alger 2003.
- [6] X.Jiang, J.Yuan, Z.Zhang, J.Hu, L.Shu, « *Study on Pollution Flashover Performance of Short Samples of Composite Insulators Intended for ±800 kV UHV DC* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 5; October 2007.
- [7] « *Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on d.c systems* », IEC Tech. Rep. 1245, 1993.
- [8] J.M.Seifert, W.Petrusch, H.Janssen, « *A Comparison of the Pollution Performance of Long Rod and Disc Type HVDC Insulators* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 1; February 2007.
- [9] « *Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on d.c Systems* », Technical Report IEC 61245, 1993.
- [10] R.Boudissa, S.Djafri, A.Haddad, R.Belaicha, R.Bearch, « *Effect of Insulator Shape on Surface Discharges and Flashover under Polluted Conditions* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 3; June 2005.
- [11] IEC Publication 507, « *Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on ac Systems* », 2nd Edition, 1991.
- [12] IEC-60-1:1989, « *Guide on High-Voltage Testing Techniques* », 1989.
- [13] IEEE Std 4-1995, « *IEEE Standard Techniques for high-voltage Testing* », 1995.
- [14] CIGRE WG 33.04, « *The Measurement of Site Pollution Severity and its Application to Insulator Dimensioning for ac Systems* », Electra, No. 64, pp.101_116, 1979.

- [15] CIGRE SC 33, TF 33.04.03, « *Insulator Pollution Monitoring* », Electra, No.152, pp. 78_90, 1994.
- [16] S. Djafri, R. Boudissa and R. Belaicha, « *Multiple Sparks and Shortening of the Rounding Spark of the High Voltage Polluted Insulators* », 10th Intern. Sympos. High Voltage Engineering, Vol. 3, pp. 329_332, Montreal, Canada, 1997
- [17] J.G.Wankowicz and L. Berndt, « *Effect of Non-Uniform Contaminating Layers on Insulators on Breakdown Voltage* », Elektrische, Vol. 46, No. 11, pp. 460_64, Germany, 1992.
- [18] Y.Zhu, K.Haji, H.Yamamoto, T.Miyake, M.Otsubo,C.Honda, « *Distribution of Leakage Current on Polluted Polymer Insulator Surface* », Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,2006.
- [19] M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O.Takenouchi,T.Sakoda, Y. Hashimoto, «*Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current* », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 10, pp. 1053-1060, 2003.
- [20] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda and S. Tanaka, « *Corona Discharge from Water Droplet on Electrically Stressed Polymer Surface* »,Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, pp. 234-238, 2006.
- [21] IEC Publication 507, pp. 1-37, 1975.
- [22] W.T.Starr, « *Polymeric outdoor insulation* », IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 25, pp. 125-136, 1990.
- [23] Aulia, F.David, E.P.Waldy, H.Hazmi «*The Leakage Current Analysis on 20kV Suspension Porcelain Insulator Contaminated by Salt Moisture and Cement Dust in Padang Area* »,8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, 2006.
- [24] Suwamo, H.Darmawan, « *Pengukuran ArusBocor Pada Isolator Dengan Sistem Pengukuran Berbasis Personal Komputer*»,FOSTU.ITB.Bandung.2001.
- [25] Suwamo, H.Darmawan. « *Studi Bentuk Gelombang Arus Bocor Pada Isolator Keramik POSPIN 20 kV dalam Berbagai Kondisi Lingkungan* », Vol. 7 No 1. ITB.Bandung. 2001.
- [26] D.Sedyadi, Tumiran, H.Berahir. « *Efek Kontaminan Terhadap Rugi Daya Isolator SaluranTransmisi Tenaga Listrik.* », FOSTU.ITB.Bandung. 2001.
- [27] Penny, Lindfield. « *Numerical Method Using Matlab* », Hartnolls Limited, Bodmin.Comwall England. 1997
- [28] R.S.Gorur, « *Outdoor Insulator*». Phoenix. Arizona 85044.USA. 1999.

- [29] R. Hackam, « *Outdoor HV composite polymeric insulators* », IEEE Transactions on DEI 6:262–9, 1999.
- [30] Y. Zhu et al, « *Change of polymeric material exposed to dry band arc discharge* », Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, 7B-13, p 655–8, 2004.
- [31] Y. Zhu et al. « *Erosion resistant characteristics of ATH-filled silicone rubber Exposed to dry band arc discharge* », Proceedings of 2005 international symposium on electrical insulating materials, vol. 1 No.B2-5,p. 115–8, Kitakyushu, Japan, 2005
- [32] K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, T. Sakoda, « *Studies on erosion of silicone rubber exposed to partial arc discharges* », Polymer Degradation and Stability, pp 2214–2221, 2008.
- [33] R. Sundararajan et al, « *Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage* », IEEE Transactions on Electrical Insulation, 28(2):209–18, April 1993.
- [34] F. Rizk, « *Mathematical models for pollution flashover* », pp 71-103, édition Electra, 1981.
- [35] S. Nishimura, « *Evaluation of the Flashover Voltage–Time Characteristics of Polluted Surface* ». IEEEJ Transactions on Power and Energy: 52-B86 November 1977; 97-B (11):45–52
- [36] Y. Zhu et al, « *Loss and Recovery in Hydrophobicity of Silicone Rubber Exposed to Corona Discharge* ». Polymer Degradation and Stability: 1–7, 2005.
- [37] K. Haji et al, « *Relation Between Dry Band Arc Discharge and Conductivity of the Pollution Liquid on the Polymer Material Surface* », Japan–Korea joint session JK2, JK2-3, p 18, August 2006.
- [38] T. Kubono, « *Theoretical Quantities of Some Parameters in the Cathode-fall region of a Copper Vacuum Arc* », Journal of Applied Physics, 52(6):3924–8, June 1981.
- [39] C. Brown Sanborn, « *Introduction to Electrical Discharge in Gases* », Massachusetts Institute of Technology. 211–5.
- [40] S. Nishimura, « *Features of Arc Discharge Having the Electrode Spots on a Surface of Electrolytic Solution* », Journal of the Institute of Electrostatics, 13(3):207–12, Japan 1989.
- [41] S. W. Jee, C. H. Lee, K. S. Lee, « *Signal Analysis Methods to Distinguish Tracking Process Using Time-frequency Analysis* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1; February 2009.

- [42] T. K. Abdel-Galil, A.H.El-Hag, M.M.A. Salama, R. Bartnikas, « *Enhanced partial discharge denoising technique using eigen decomposition* », IEEE Intern. Sympos. Electr. Insulation, pp. 294-297, 2006.
- [43] X.Song, C.Zhou, D.M.Hepburn, G.Zhang, « *Second Generation Wavelet Transform for Data Denoising in PD Measurement* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 6; December 2007.
- [44] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, « *An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising* », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [45] H.Zhang, T.Blackburn, B.Phung, D.Sen, « *A Novel Wavelet Transform Technique for on-line Partial Discharge Measurements part 1: Wavelet Denoising Algorithm* », IEEE Trans Dielectr. Electr Insul., Vol. 14, pp 3-14, 2007
- [46] W. Sweldens, « *The lifting Scheme: A Custom-Design Construction of Biorthogonal Wavelets* », Appl. Comput. Harmon. Anal, Vol. 3, pp. 186–200, 1996.
- [47] B. X. Du, Y.Liu, H. J. Liu, « *Recurrent Plot Analysis of Leakage Current for Monitoring Outdoor Insulator Performance* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1; February 2009.
- [48] A.H.El-Hag, S.H.Jayaram, E.A.Cherney, « *Fundamental and Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt-fog* », IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 10, No. 1, pp. 128–136, 2003.
- [49] T. Suda, « *Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulator* », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, pp. 481-487, 2005.
- [50] B.X. Du and D.S. Dong, « *Recurrence Plot Analysis of Discharge Current in Tracking Test of Gamma-ray Irradiated Polymer* », IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul, Vol. 15, pp. 974–981, 2008
- [51] H.S. Kim, R. Eykhol and J.D. Salas, « *Nonlinear Dynamics, Delay Times and Embedding Windows* », Physica D, Vol. 127, pp. 48-60, 1999.
- [52] A. Rawat, R. S. Gorur, « *Microstructure Based Evaluation of Field Aged and New Porcelain Suspension Insulators* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1, February 2009.
- [53] ANSI C29.1, « *American National Standards for Insulators: Wet Process and Toughened Glass- Suspension Type* », 1992.
- [54] W. M. Carty, « *Porcelain- Raw Materials, Processing, Phase Evolution and Mechanical Behavior* », J. Amer. Ceramic Soc., Vol.81, pp. 3-20, 1998

- [55] A.P. Mishra, R. S. Gorur, S. Venkataraman, « *Evaluation of Porcelain and Toughened Glass Suspension Insulators Removed from Service* », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 15, pp. 467-475, 2008.
- [56] E. A. Cherney and R. D. Hooton, « *Cement Growth Failure Mechanism in Porcelain Suspension Insulators* IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, pp. 249-255
- [57] A. Cavallini, S. Chandrasekar, G. C. Montanari, F. Puletti, « *Inferring Ceramic Insulator Pollution by an Innovative Approach Resorting to PD Detection* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 1; February 2007.
- [58] D. F. Kawa, M. J. Chavez, T. Orbeck and C. Lumb, « *Practical PCA-DA system for measurements of leakage current pulses on polymer insulators under wet contaminated conditions* », IEEE Electr. Insul. Mag, Vol. 8, No. 2, pp. 5-13, 1992.
- [59] M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O. Takenouchi, T. Sakoda and Y. Hashimoto, "Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 10, pp. 1053-1060, 2003.
- [60] Cigrè TF 33.01.01, « Polluted insulators », A Review of Current Knowledge, 2000.
- [61] B. Florkowska, P. Zydron, M. Florkowski, « Location and Identification of Corona Forms Based on Phase Resolved Images », Meas. Sci. Technol., Vol. 12, pp. 1304-1310, 2001
- [62] Report of Power System Relaying Committee (PSRC) Working Group D15, « *High Impedance Fault Detection Technology* », 1996.
- [63] L. Prikler, M. Kizilcay, G. Ban, P. Handl, « *Improved Secondary Arc Models Based on Identification of Arc Parameters from Staged Fault Test Records* », 14th Power System Computation Conference (PSCC), Séville, 2002.
- [64] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, A. H. Darwish, A. M. Izzularab, A. M. I. Taalab, « *Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2; April 2007.
- [65] A. M. Cassie, « *Théorie Nouvelle des Arcs de Rupture et de la Rigidité des Circuits* », Cigré, Report 102, pp. 588-608, 1939.
- [66] O. Mayr, « *Beitrag zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichthogens* », Archiv für Elektrotechnik, vol. Band 37, no. Heft 12, pp. 588-608, 1943.

- [67] M. Solanki, Y. Song, S. Potts and A. Perks, « *Transient Protection of Transmission Line Using Wavelet Transform* », 7th Intern. Conf. Developments in Power System Protection, (IEE), pp. 299–302, 2001.
- [68] M. Lehtonen, T. Hakola, « *Neutral Earthing and Power System Protection Earthing Solutions and Protective Relaying in Medium Voltage Distribution Networks* », ABB Transmit Oy, FIN-65101 Vassa, Finland, 1996.
- [69] G. Blanchet, M. Charbit, « *Traitement numérique du signal* », Techniques de l'ingénieur, traité électronique, E 3087.
- [70] S.V. Vaseghi, « *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction* », 2^{ème} édition, 2000.
- [71] R.J.E. Merry, « *Wavelet Theory and Applications: A literature study* », Control system technology group, Eindhoven, June 2007.
- [72] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi, « *Wavelets Toolbox Users Guide* ». Wavelet Toolbox for use with MATLAB®, 2000.
- [73] M.G.E. Schneiders. « *Wavelets in Control Engineering* ». Master's thesis, Eindhoven University of Technology, August 2001.
- [74] A. Bouzida, « *Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique d'ondelette* », Mémoire de Magister, ENP d'Alger 2008.
- [75] D. Percival, A. Walden, « *Wavelet Methods for Time Series Analysis* », Cambridge University Press, 2000.
- [76] J. Demaeyer, M. Bebronne, S. Forthomme, « *Les ondelettes* », Deuxième Candidature en Sciences Physiques, Université Libre de Bruxelles, 2003.
- [77] D.C. Sorensen, R.B. Lehoucq, C. Yang, K. Maschhoff, « *Five Easy Steps to a Continuous Wavelet Transform: A New Tool for Signal Analysis* », Wavelet Toolbox, Help of MATLAB®, the MathWorks, 2007.
- [78] L. Qarta, « *Une introduction (élémentaire) à la théorie des ondelettes* », Université de Mont Henold, Institut de mathématique, cahier pédagogique N° 22, Belgique, 22 novembre 2001.
- [79] M. Solanki, Y. Song, S. Potts, A. Perks, « *Transient Protection of Transmission Line Using Wavelet Transform* », 7th Intern. Conf. on Developments in Power System Protection, (IEE), pp. 299–302, 2001.
- [80] K. Dinesh, S. Ashwin, V. Harish, E. VarathKanth, C. Venkataseshaiyah, R. Sarathi, « *Understanding the surface condition of Insulation Material Using Wavelets* », CBIP – International Conference in Maintenance Technologies of EHV Transmission Lines, New Delhi, India, April 2002.

- [81] R.Sarathi, S.Chandrasekar, N. Yoshimura, « *Investigations into the Surface Condition of the Silicone Rubber Insulation Material using Multi-resolution Signal Decomposition* », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 21, pp.243-252, 2006.
- [82] R. Sarathi, S. Chandrasekar, « *Diagnostic study of the surface condition of the insulation structure using wavelet transform and neural networks* », Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 68, pp. 137-147, 2004.
- [83] S.Chandrasekar, C.Kalaivanan, A.Cavallini, G.C.Montanari, « *Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator under Contaminated Conditions* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 2, April 2009.
- [84] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « *Flashover and Leakage Current on Insulator model Under Non Uniform Pollution* », 6^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension Taghit/Béchar, 5,6 et 7 Novembre 2007.
- [85] M. Farsaneh, X.Cheng, J.Zhang, « *The Influence of the Applied Voltage on the Atmospheric Ice Deposited on Insulating Surfaces* », IEEE, ISEI, Montréal, Québec,Canada, June 1996.
- [86]A.Mekhaldi, D.Namane, S.Bouazabia, A.Bérroual, «*Flashover of Discontinuous Pollution Layer on HV Insulators* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.6, No.6, pp.900-906, 1999.
- [87] M.A.R.M. Fernando, S.M. Gubanski, « *Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces* », IEEE Trans. Electr. Insul. Vol. 6, pp. 688–694, 1999.
- [88] M.Aguet, « *Haute tension* », Traité d'électricité de l'EPF Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires. 1990.
- [89] S.Venkataraman, R.S.Gorur, « *Extending the applicability of insulator flashover models by regression analysis* », IEEE trans. Dielectr. Electr. Insul, pp.368-374, 2007.
- [90] J.Johnston, J.Dinardo, « *Méthode économétriques* », Edition Economica.1999.

ملخص:

في هذا العمل قمنا بدراسة شدة التلوث تحت تيار متناوب ذو توتر 50 هرتز على نموذج سطحي يمثل العازل L 1512 ولهذا الغرض أجريت عدة تجارب للتلوث المنتظم وغير المنتظم بالمخبر عالي التوتر للمدرسة الوطنية العليا المتعددة التقنيات لتمييز حالة سطح النموذج اعتمادا على إشارات كل من تيار التسرب و التوتر المطبق. أولا ركزنا على توتر الإحاطة، سعة تيار التسرب، فرق الصفحة بين التوتر و تيار التسرب وتطور عدد وطول التفريغات المتوازية. ثانيا قمنا بعرض نتائج معالجة إشارة كل من تيار التسرب والتوتر بواسطة المخطط الدوري لـ Welch لتقدير شدة التلوث. ثالثا طبقت تقنية التحليل بالموجيات على كل من إشارة التوتر وتيار التسرب باستعمال CWT و DWT على التسلسل لتشخيص حالة السطح. وأخيرا أنهينا هذا العمل بنمذجة تجريبية لسلوك العازل المستوي لتسهيل دراسة ظاهرة تلوث العوازل.

الكلمات المفتاحية: التلوث المنتظم، التلوث غير المنتظم، نموذج سطحي، تيار التسرب، توتر الإحاطة، فرق الصفحة، التفريغات المتوازية، التحويل بالموجيات، المخطط الدوري لـ Welch ، نمذجة.

Résumé :

Dans le présent travail, l'étude de la sévérité de pollution est effectuée en tension alternative 50 Hz sur un modèle plan qui simule l'isolateur 1512 L. Pour cela, plusieurs essais en pollution uniforme et non-uniforme sont accomplis au Laboratoire de Haute Tension de L'ENSP pour caractériser l'état de surface du modèle à travers les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. En premier lieu, nous nous intéressons à la tension de contournement, à l'amplitude du courant de fuite, au déphasage courant - tension et à l'évolution du nombre et de la longueur des décharges parallèles. En deuxième lieu, nous présentons les résultats du traitement des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée par le périodogramme de Welch pour évaluer la sévérité de pollution. En troisième lieu, la technique d'analyse par les ondelettes est employée sur la tension à travers la CWT et sur le courant de fuite en utilisant la DWT, afin d'estimer l'état de surface du modèle. Enfin, nous terminons par une modélisation empirique du comportement du modèle plan pour faciliter l'étude du phénomène de pollution des isolateurs.

Mots-clés : Pollution uniforme, pollution non-uniforme, modèle plan, courant de fuite, tension de contournement, déphasage, décharges parallèles, transformée en ondelette, périodogramme de Welch, modélisation.

Abstract:

In this work, pollution severity under 50 Hz applied voltage is studied on plan model which simulates 1512 L outdoor insulator. Many tests at High Voltage Laboratory of the ENSP are carried out in uniform and non-uniform pollution in order to characterize conditions of insulating surface, by using leakage current and applied voltage waveforms. First, we study flashover voltage, leakage current magnitude, phase angle between leakage current and applied voltage and parallel discharges length and number evolution according to applied voltage. Secondly, we present the signal processing results of leakage current and applied voltage waveforms by using Welch periodogram to evaluate pollution severity. Thirdly, Continuous Wavelet Transform is employed on voltage waveform and Discrete Wavelet Transform is adopted to analyze leakage current waveform for estimating the surface condition. Finally, modeling formulae of the plan model behaviour are proposed which make pollution insulator phenomenon easy to study.

Key-words : Uniform pollution, non-uniform pollution, plan model, leakage current, flashover voltage, phase angle, parallel discharges, wavelet transform, Welch periodogram, modeling.