

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux électriques et Haute tension

THÈME

**Diagnostic des Isolateurs Haute Tension sous Tension
Alternative à 50 HZ**

Préparé par :

-Hetatache Khier Eddine

- Khacha Rahma

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr. MOKHTARI. A	MAA	Président
M ^{me} . BEDOUI. M	MAA	Examineur
M ^{me} . BOURENANE. H	MAA	Encadreur

PROMOTION 2015 /2016

Dédicaces

D'abord je remercie *Allah* de m'avoir aidé pour terminer ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui se sont sacrifiés pour mes études.

A toute ma famille.

A mes amis et mes collègues.

A tous les enseignants de mon parcours scientifique.

« *hetatache khier eddine* »



Dédicaces

Je tien vivement à dédier ce travail en signe de respect et de reconnaissance à deux personnes très chères qui sont mes parents, qui ont partagé mes joies et mes peines, qui ont été toujours à mes cotés, qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Aussi je dédie ce mémoire :

*A mes deux frères **Abd Alkader** et **Abd Alhakim**.*

*A ma chère sœur **Meriem**.*

A mes cheres amies et toutes les personnes que j'aime.

KHACHA RAHMA

Remerciements

Nous remercions en premier lieu ALLAH le tout puissant de nous avoir accordés la volonté et la foi pour mener à bien nos études.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre reconnaissances à notre promoteur Hayet Bourenane de nous avoir guidés et conseillés pour accomplir ce modeste travail.

Nous aimerons remercier l'ensemble des enseignements qui ont contribué de près ou de loin à notre formation ; sans oublier notre collègues de Master réseaux Electriques et Haut Tension.

En fin, nous n'oublions pas tous ce que nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

Chapitre I : Travaux antérieurs sur les isolateurs pollués.

Tableau.I.1. Les bandes de fréquences des DWT composantes détaillées de courant de fuite [11].....	6
Tableau.I.2. Les valeurs de la conductivité de volume et de la surface [12].....	8
Tableau.I.3. Mesurer les propriétés diélectriques des barrières de caoutchouc de silicone et de verre testé [12].....	9

Chapitre III: dispositifs et méthodologies expérimentales.

tableau.III.1. Caractéristiques de l'isolateur réel (CEI 60305/2005).	26
tableau.III.2. Dimensions du modèle plan étudié.....	27

Chapitre IV: Résultats et interprétations.

Tableau.IV.1: Mesures de la tension de contournement avec 3 configurations de pulvérisation.....	32
Tableau.IV.2: Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres.....	33
Tableau.IV.3: mesure de la tension de contournement des types de pollution.....	36
Tableau.IV.4: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 1cm).....	40
Tableau.IV.5: Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 3cm).....	40
Tableau.IV.6: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 5cm).....	41
Tableau.IV.7: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 1,3,5cm).....	41
Tableau.IV.8: Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable du sol).....	42
Tableau.IV.9: Mesures du courant de fuites (pollution avec le sable des dunes).....	43
Tableau.IV.10: Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable de la mer).....	43

Sommaire des tableaux

Chapitre I : Travaux antérieurs sur les isolateurs pollués.

Tableau.I.1. Les bandes de fréquences des DWT composantes détaillées de courant de fuite [11].....	6
Tableau.I.2. Les valeurs de la conductivité de volume et de la surface [12].....	8
Tableau.I.3. Mesurer les propriétés diélectriques des barrières de caoutchouc de silicone et de verre testé [12].....	9

Chapitre III: dispositifs et méthodologies expérimentales.

tableau.III.1. Caractéristiques de l'isolateur réel (CEI 60305/2005).	26
tableau.III.2. Dimensions du modèle plan étudié.....	27

Chapitre IV: Résultats et interprétations.

Tableau.IV.1: Mesures de la tension de contournement avec 3 configurations de pulvérisation.....	32
Tableau.IV.2: Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres.....	33
Tableau.IV.3: mesure de la tension de contournement des types de pollution.....	36
Tableau.IV.4: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 1cm).....	40
Tableau.IV.5: Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 3cm).....	40
Tableau.IV.6: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 5cm).....	41
Tableau.IV.7: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 1,3,5cm).....	41
Tableau.IV.8: Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable du sol).....	42
Tableau.IV.9: Mesures du courant de fuites (pollution avec le sable des dunes).....	43

Tableau.IV.10: Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable de la mer).....43

SOMMAIRE

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Travaux antérieurs sur les isolateurs pollués

INTRODUCTION.....	3
--------------------------	----------

I.1. Caractérisation de courant de fuite d'un Isolateur en porcelaine pollué.....	3
---	---

I.2. Performances des barrière isolantes en silicone et en verre sous tension alternative dans un atmosphère propre et pollué.....	8
--	---

I.3. Utilisation de la technique RP pour l'analyse du signal du courant de fuite sur des isolateurs composites givrés-glacés.....	13
---	----

Chapitre II : Théories du traitement du signal.

GENERALITES SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL	15
--	-----------

II.1.CATEGORIES DES SIGNAUX.....	16
---	-----------

II.1.1. Signaux déterministes.....	16
------------------------------------	----

II.1.2. Signaux aléatoires.....	17
---------------------------------	----

II.2. TRANSFORMEE DE FOURIER	18
---	-----------

II.2.1. Propriétés de la transformée de Fourier d'un signal continu.....	18
--	----

II.2.2. Transformée de Fourier à temps discret	19
--	----

II.2.2.1. Définitions	20
-----------------------------	----

II.2.3. Transformée de Fourier rapide (FFT ou TFR)	20
--	----

II.2.4. L'opération d'Echantillonnage	20
---	----

II.2.5. Estimation de spectre.....	21
------------------------------------	----

II.2.5.1. Périodogramme.....	22
------------------------------	----

II.2.5.2. Périodogramme moyenné	22
---------------------------------------	----

II.2.5.3. Periodogramme de Welch.....	22
---------------------------------------	----

II.2.6. Utilisation des fenêtres	23
--	----

CONCLUSION.....	24
------------------------	-----------

Chapitre III: dispositifs et méthodologies expérimentales.

INTRODUCTION	25
III.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	25
III.1.1. Circuit d'essais du Laboratoire de Haute Tension :.....	25
III.1.2. Objet d'essai :.....	26
III.2. NETTOYAGE DU PLAN	27
III.3. TYPES DE POLLUTION DES ISOLATEURS	28
III.4. METHODE DE PULVERISATION :	28
III.4.1. Pollution non-uniforme :.....	29
III.5. MESURE DU COURANT DE FUITE	29
Conclusion	29

Chapitre IV: Résultats et interprétations.

INTRODUCTION	31
IV.1. TENSION DE CONTOURNEMENT	31
IV.1.1. Influence du nombre de pulvérisation :.....	31
IV.1.2. Influence de la largeur des bandes propres :.....	32
IV.1.3. Influence du type de pollution:	36
IV.2. COURANT DE FUITE	39
IV.2.1. Définition de courant de fuite :	39
IV.2.2. Courant de fuite critique :	39
IV.2.3. Mesure de courant de fuite.....	39
IV.2.3.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le courant de fuite	39
IV.2.3.2. Influence de différents types de pollution sur le courant de fuite.....	42
IV.3. ANALYSE L'ENERGIE DES HARMONIQUES	44
IV.4. LES DIFFERENTES FENETRES DE SPECTRE DE WELCH	44
IV.5. ETUDE D'HARMONIQUES POUR LA POLLUTION NON-UNIFORME EN FONCTION DE LA LARGEUR DES BANDES PROPRES	47

IV.5.1. Tension appliquée 10 kV	47
IV.5.2. Tension appliquée 30 kV	48
IV.5.2. Tension appliquée 50 kV	50
IV.6. ETUDE D'HARMONIQUES POUR LA POLLUTION NON-UNIFORME EN FONCTION DE TYPES DE SABLE	52
IV.6.1. Tension appliquée 10 kV	52
IV.6.2. Tension appliquée 15 kV	53
IV.6.3. Tension appliquée 20 kV	55
CONCLUSION	56
CONCLUSION GENERALE	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

INTRODUCTION GENERALE

Le transport de l'énergie électrique nécessite, pour les raisons techniques et économiques l'utilisation de tensions élevées (lignes HT et THT).

Ceci requiert une conception et réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et supporter des champs électrique intenses : leur dimensionnement doit par conséquent être scrupuleusement étudié[1].

On peut citer le développement des lignes de haute tension, dont l'utilisation réduit les pertes en énergie et les coûts de transport. Mais en contrepartie, les lignes de haute tension sont sujet à des avaries qui peuvent les mettre hors service ; parmi ces avaries, on peut citer le contournement des chaines d'isolateurs. A proximité des régions industrielles, agricoles et côtières, la pollution est la cause principale du contournement des chaines d'isolateurs, pouvant engendrer de longues interruptions de service. Les entreprises chargées de l'entretien des réseaux, déboursent d'importantes sommes d'argent pour effectuer des opérations de lavages et de nettoyages avant la remise en marche de la ligne. Les recherches et les tests industriels ont montré que la pollution et l'humidification sont des paramètres qui favorisent l'occurrence du contournement ce dernier est précédé par l'apparition des arcs aux bornes des bandes sèches, ces arcs se prolongent sur les surfaces de l'isolateur jusqu'au contournement. Ce phénomène modifie d'une manière significative l'amplitude et la forme du courant de fuite [2].

En raison de la complexité des phénomènes de décharges électriques sur les surfaces isolantes, plusieurs travaux aussi bien théoriques [3- 6] qu'expérimentaux [7-9], ont été entrepris depuis plusieurs décennies, en vue d'étudier leur comportement sous pollution. Ces travaux de recherche ont permis de développer des modèles statiques et dynamiques, établissant ainsi, les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces polluées des isolateurs, et ce, jusqu'au contournement. Néanmoins, ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause d'un grand nombre de facteurs difficiles à cerner, qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges.

Le présent travail consiste à étudier la sévérité de pollution sur un modèle d'isolateur plan (**modèle de J.Danis**) [10] avec différentes configurations de pollution afin de comprendre l'impact de celle-ci sur les performances électriques de l'isolateur en exploitant le signal de courant de fuite puis celui de la tension appliquée.

Dans le premier chapitre, nous présentons d'une manière succincte, les principaux travaux antérieurs dans le domaine de l'étude de la pollution des isolateurs.

Le deuxième chapitre présente de manière brève l'environnement du traitement du signal par la transformée de Fourier. Nous insistons sur le concept d'énergie qui va nous permettre d'évaluer son importance dans le courant de fuite pendant la décharge électrique.

Nous exposons dans le troisième chapitre les techniques expérimentales utilisées dans notre étude.

Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats expérimentaux et au traitement de signale de courant de fuite et de la tension appliquée en utilisant le périodogramme de Welch.

En dernier lieu, nous terminons par une conclusion générale et perspective.

CHAPITRE I

Travaux Antérieurs sur les Isolateurs Pollués

INTRODUCTION

Dans cette partie, nous présentons des travaux et des recherches récemment effectués dans le domaine de la pollution des isolateurs ainsi que l'étude des phénomènes liés au contournement. Une partie essentielle de ces études est fondée sur l'analyse du courant de fuite qui fournit les informations nécessaires sur l'état de surface des isolateurs. L'analyse de ce signal est effectuée avec plusieurs méthodes dont le raisonnement par les ondelettes, transformée de Fourier et technique graphique « Récurrent Plot ».

I.1. Caractérisation de courant de fuite d'un Isolateur en porcelaine pollué

H Terrab, A El-Hag et A Bayadi[11] ont effectué des essais sur un isolateur en porcelaine sous pollution artificielle en se basant sur l'étude des signaux du courant de fuite. La figure I.1 montre l'isolateur de test utilisé et La figure I.2 montre le dispositif expérimental.



Figure. I.1: isolateur de test [11].

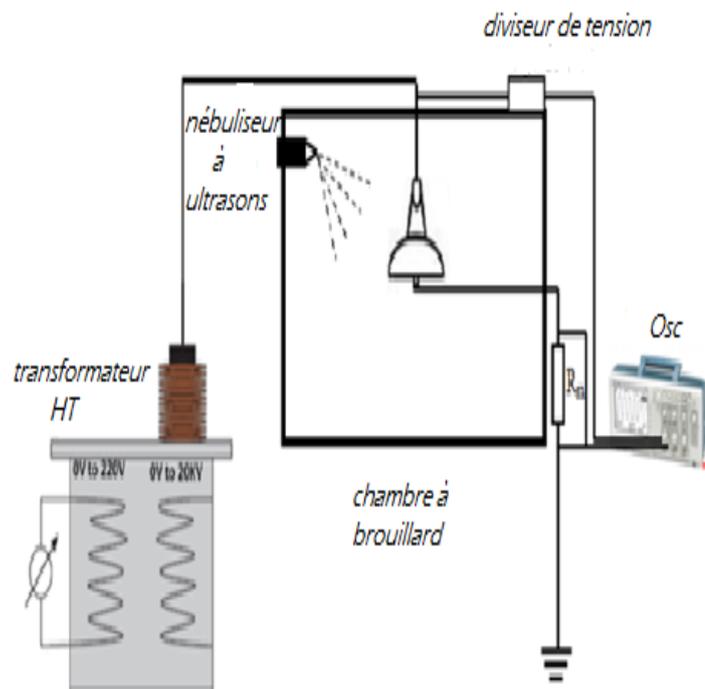


Figure. I.2: dispositif expérimental [11].

La préparation de la pollution artificielle est faite en se basant sur les recommandations de la CEI 60507, cette pollution est composée de 40g de kaolin mélangé avec 1 litre d'eau déminéralisé et une quantité de Na cl pour obtenir une conductivité de 10mS/cm.

La pollution a été appliquée par trempage de l'isolateur dans le mélange, puis il a été séché naturellement pendant 24 h, ensuite il est installé verticalement à l'intérieur de la chambre de brouillard. Lors de l'essai une tension alternative de 5 kV a été appliquée.

Quand l'isolateur est humide, l'angle de déphasage entre courant de fuite et la tension appliquée diminue à 18° c avec un accroissement considérable de courant de fuite ceci peut être expliqué par la réduction importante de la résistance de la surface, cet angle de phase reste à peu près constant lors de l'augmentation de mouillage comme indique figure I.3.

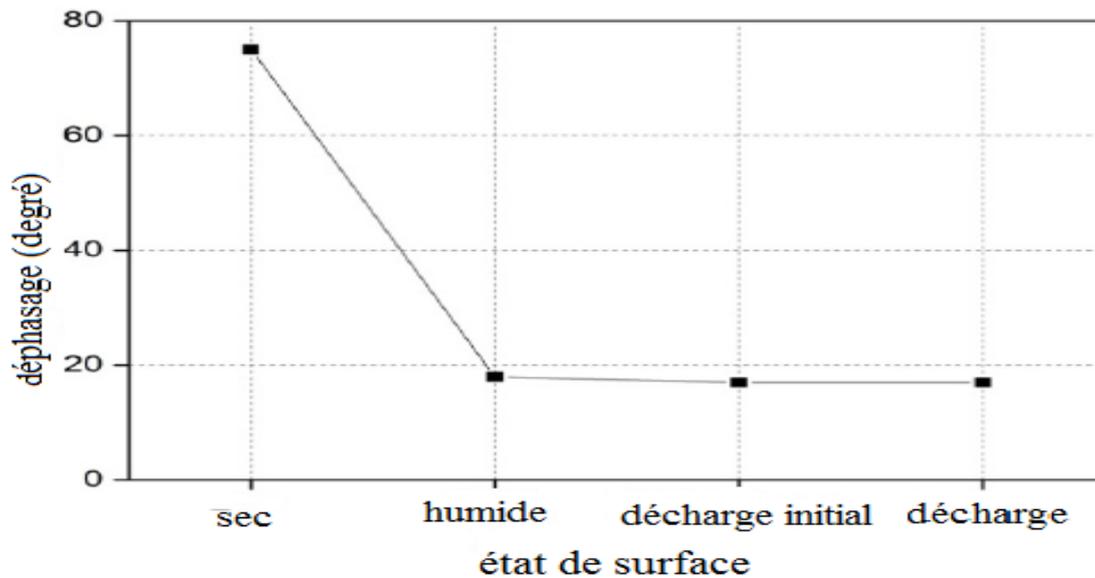


Figure. I.3: Variations de déphasage sous différent pollution [11].

Les auteures de ce travail ont tracé le courant de fuite en fonction de temps pour 4 étapes d'isolateur pollué (sec, humidifié, décharge initial et décharge) figure I.4.

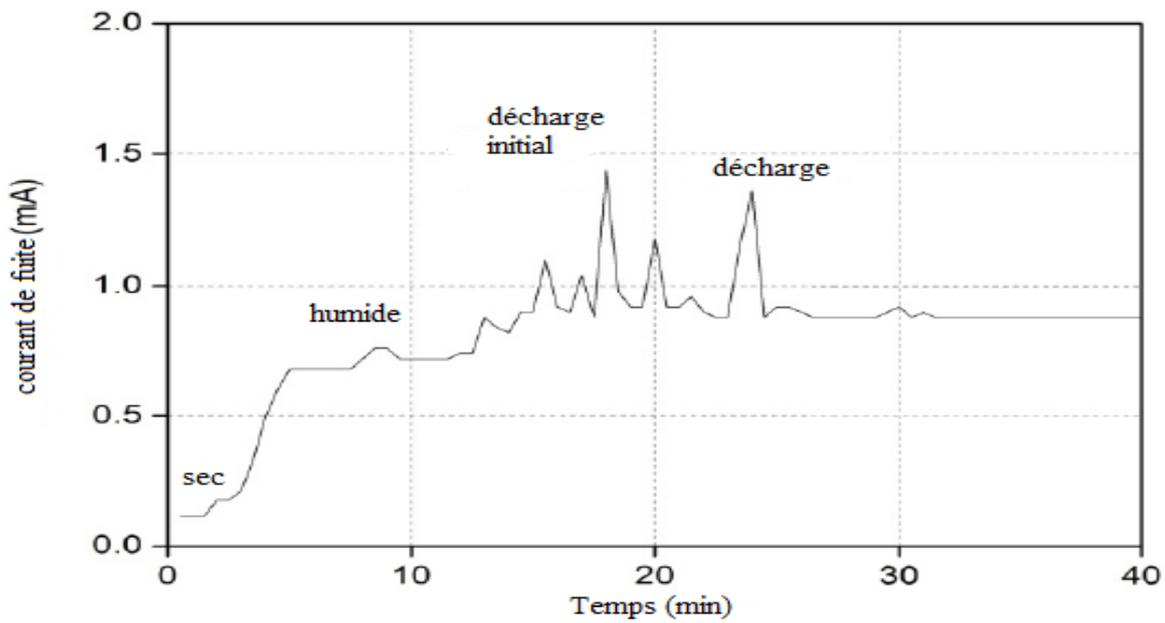


Figure. I.4: courant de fuite en fonction de temps pour 4 étapes d'isolateur pollué [11].

H, Terrab, A El-Hag et A ,Bayadi ,ont utilisé la FFT (Faste Fourier Transform) . figure I.5 et DWT (Discret wavelet transform) pour la décomposition de courant de fuite pour identifier toute transition du signal Tableau I.1 et figure I.6.

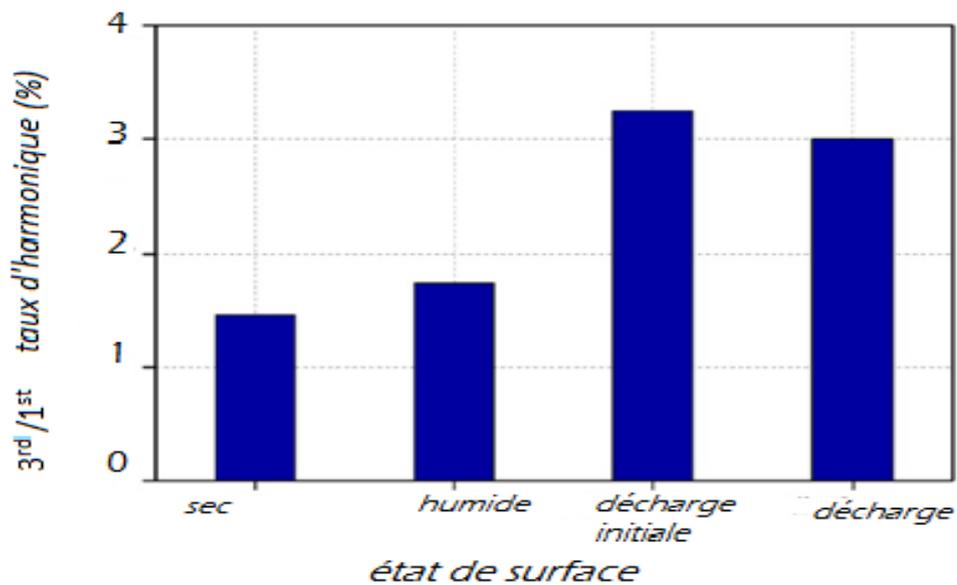


Figure. I.5: rapport harmonique de 3^{ème} / fondamentale [11].

Composants DWT détaillés	Bande de fréquence kHz
D1	6,25_12.5
D2	3,125_6 ,225
D3	1,5625_3,1125
D4	0 ,78125_1,5625
D5	0,390625_0,78225
D6	0,1953125_0,390625
D7	0,0765625_0,1953125
D8	0,0488281_0,0765625
D9	0,0244140_0 ,0488281
D10	0,012207_0 ,0244140

Tableau.I.1. Les bandes de fréquences des DWT composantes détaillées de courant de fuite [11].

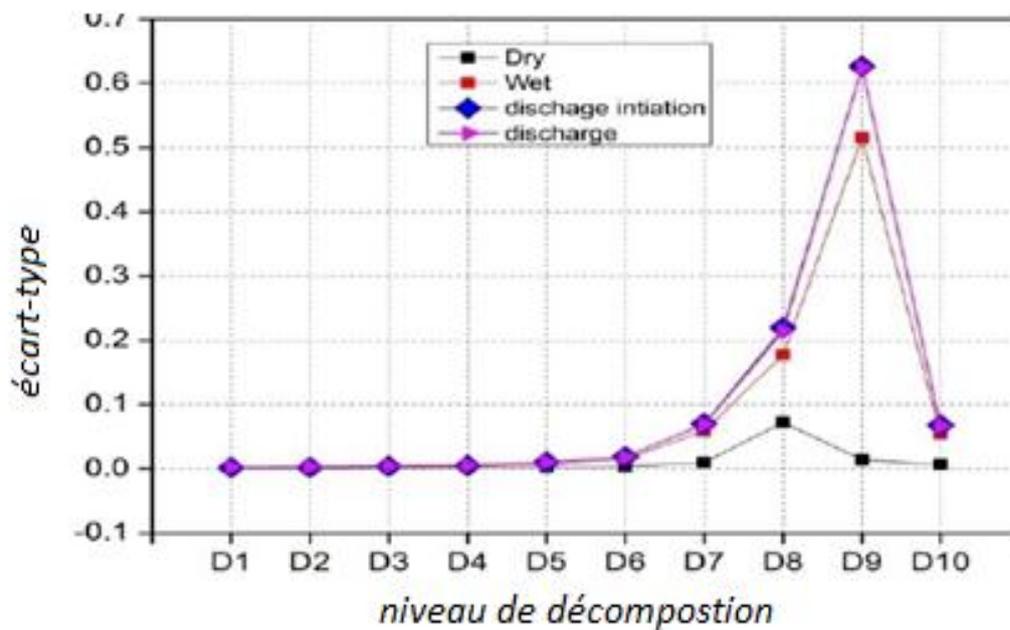


Figure. I.6: représentation de déviation standard pour les détails de courant de fuite [11].

Les résultats obtenus à partir de cette investigation, ont permis aux auteurs:

- De comprendre l'évolution de courant de fuite d'un isolateur pollué en fonction du temps.
- De conclure que le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliqué est un indicateur de prédiction de l'état de surface d'isolateur.
- La variation des harmoniques de courant de fuite est en corrélation avec l'évolution de décharge sur la surface d'isolateur.
- La décomposition du signal de courant de fuite par la DWT est un bon moyen de prédiction d'apparition des arcs électriques dans les bandes sèches.

I.2. Performances des barrières isolantes en silicone et en verre sous tension alternative dans une atmosphère propre et pollué

Les barrières isolantes sont utilisées dans plusieurs domaines industriels tels que les disjoncteurs à gaz, interrupteurs, douilles, transformateurs, armoire de distribution basse tension figure 1.7



Figure I.7. Barrière entre 3phases basse tension [12].

R. Boudissa A. Bayadi R. Baersch[12], ont effectués des essais sur deux barrières isolantes l'une en verre et l'autre en silicone de caoutchouc qui sont introduites dans un système pointe-plan. La figure I.7 montre le dispositif expérimental.

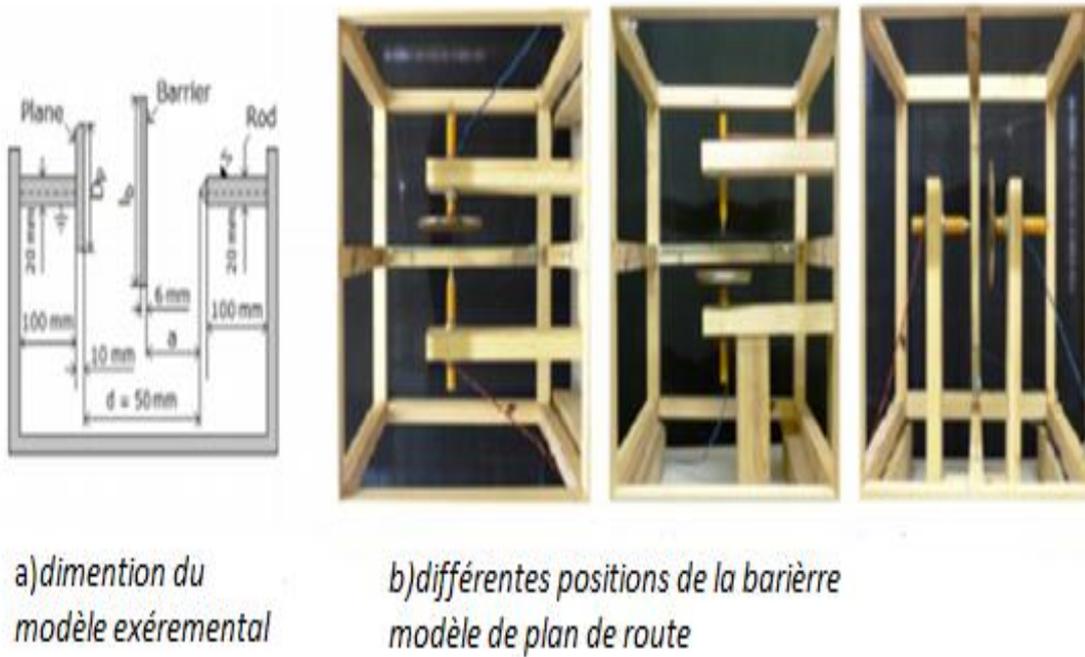


Figure. I.8: construction et la dimension du modèle expérimental [12].

L'étude est effectuée sous une tension alternative dans une atmosphère propre et polluée, La conductivité volumique σ_v de la solution polluante était mesurée directement par un conductimètre de volume de la sonde mobile et la conductivité de la surface de la barrière isolante est polluée obtenue au moyen de mobiles conductimètre de surface de la sonde[13].

Les tableaux I.2 et I.3 montre différentes conductivité et les propriétés diélectrique des barrières de testes

σ_v (mS/cm)	0.5	2.5	5	10	15	20
σ_s (μS)	0.5	3	5	8	11.5	16

Tableau.I.2. Les valeurs de la conductivité de volume et de la surface [12].

paramètre Matériau	Tgδ	ϵ_r	$R_v(\Omega m)$	$R_s(\Omega)$
Silicone	0.01	3.2	6.8×10^{11}	4×10^{10}
Verre	0.11	9.6	2.25×10^9	1.6×10^9

Tableau.I.3. Mesurer les propriétés diélectriques des barrières de caoutchouc de silicone et de verre testé [12].

Les auteurs de cette étude ont mesurés l’efficacité du système de barrières propres en fonction du diamètre de l’électrode plane (a/d=0%) figure I.9.

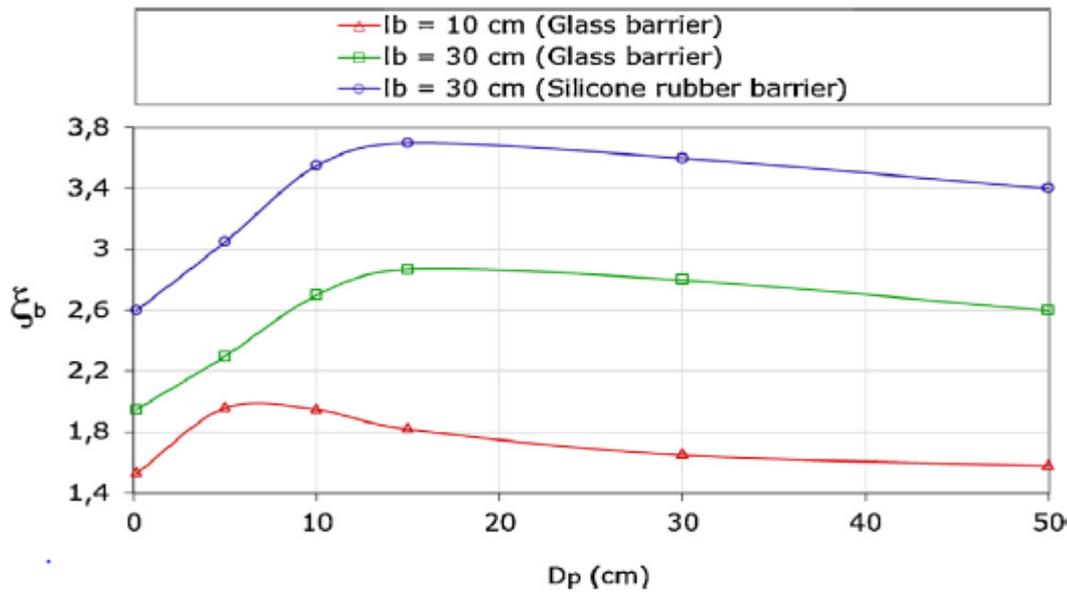


Figure. I.9: l’efficacité du système de barrières propres en fonction du diamètre de l’électrode plane(a/d=0%) [12].

Ils ont mesuré le champ de claquage avec isolation de la barrière au sol par air et par plexiglace Figure I.10

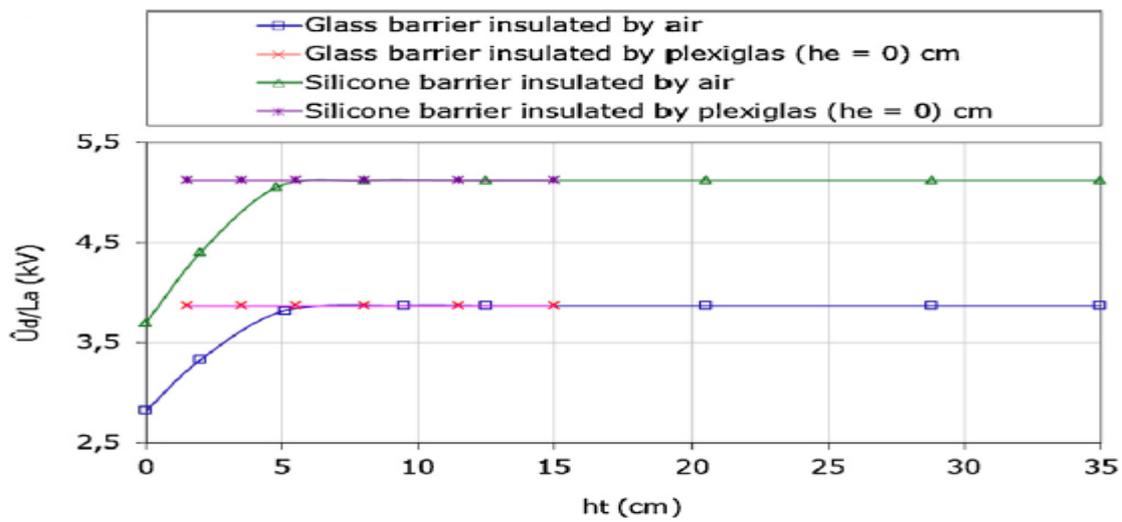


Figure. I.10: champ de claquage avec isolation de la barrière au sol par air et par plexi glace [12].

Les décharges en fonction de types des barrières isolante sont représentées par la figure I.11

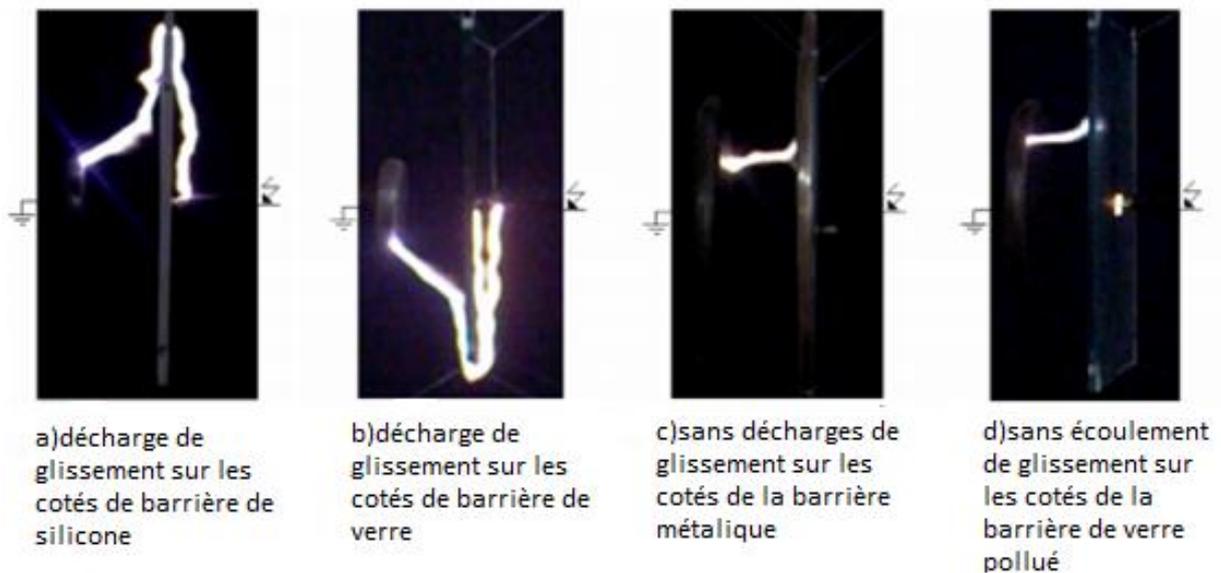


Figure. I.11: chemin de contournement du système en fonction du type de barrière isolante ($a / d = 0\%$, $I_b = 300 \text{ mm}$; $D_p = 150 \text{ mm}$) [12].

Les phases de développement des décharges de système pointe-plan est illustré par la figure I.12.

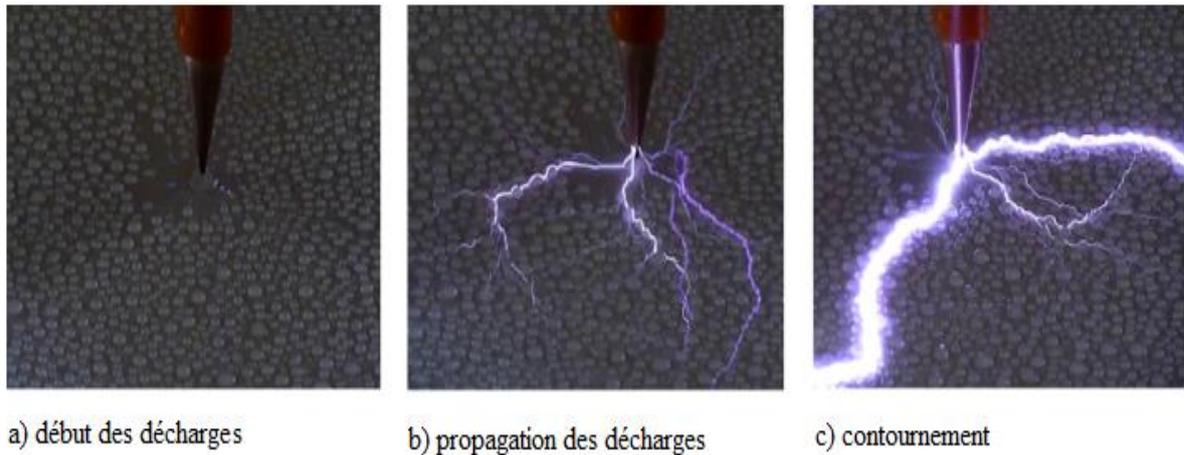


Figure. I.12: Les phases de développement des décharges de système pointe-plan [12].

Les résultats obtenus à partir de cette investigation ont permis aux auteurs de conclure que :

- L'efficacité du système est optimisée par un choix judicieux d'une barrière isolante à surface sèche propre et isolé de la terre. Sa largeur doit être d'environ deux fois la hauteur entre la barrière et sol.
- Sous l'influence des gouttelettes d'eau, le système à barrière de silicone hydrophobe vertical ou horizontal, flottant au-dessus de l'électrode à haute tension, a une rigidité diélectrique de 18% supérieure à celle de la même barrière horizontale sous l'électrode à haute tension.
- Dans une atmosphère propre et sèche, l'efficacité du système avec la barrière en silicone est plus élevée de 25% que celle de la barrière en verre.
- Dans une atmosphère polluée, l'efficacité du système avec barrière en silicone est plus élevée de 26% que celle de la barrière en verre.
- Un matériau en silicone peut être utilisé comme une barrière protectrice contre les perturbations des systèmes d'électrode pointe-plane quelle que soit la nature de l'environnement.

I.3. Utilisation de la technique RP pour l'analyse du signal du courant de fuite sur des isolateurs composites givrés-glacés

Actuellement, l'isolateur composite s'impose grâce à sa légèreté, longévité et faible coût [14-15]. Yong Liu et B. X. Du[16] ont eu l'idée d'utiliser une technique graphique « Recurrent Plot » appliquée au signal du courant de fuite, pour étudier le contournement d'un isolateur composite givré-glacé.

Ainsi, ils ont maintenu une température de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un brouillard salin a été injecté (ESDD=0.1 mS/cm) dans une chambre d'expérimentation, comme le montre la figure I.13.

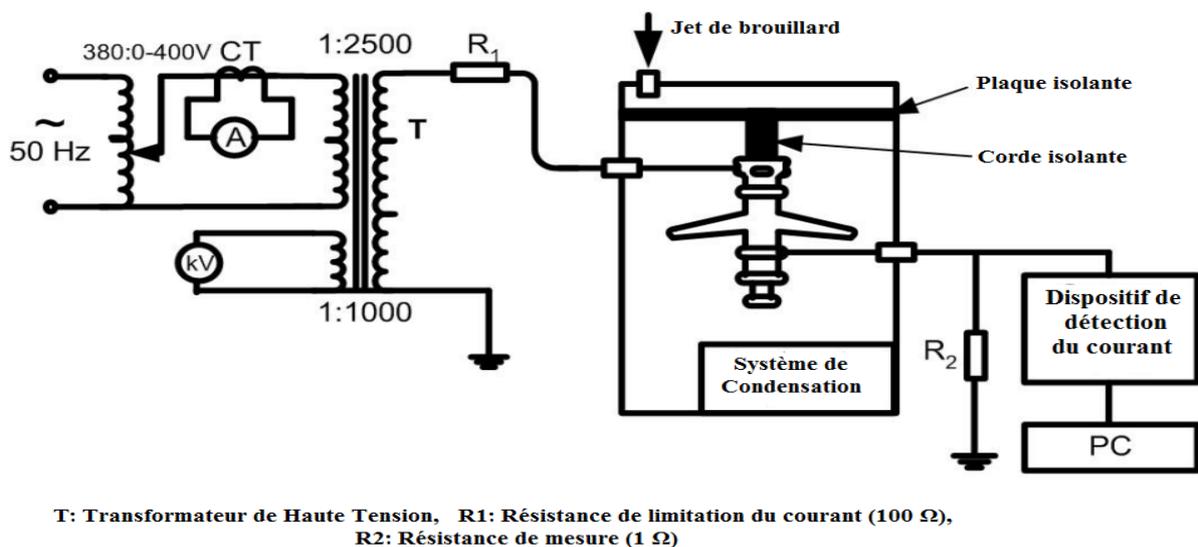


Figure. I.13:Dispositif expérimental [16].

Selon l'observation visuelle, les auteurs ont identifié 6 étapes durant le processus de contournement sur un isolateur givré-glacé figure I.14 :

- formation d'une couche conductrice sur la surface de l'isolateur ;
- apparition de faibles décharges sur le bord de l'isolateur ;
- apparition de fortes décharges autour de l'électrode haute tension ;
- phénomènes aléatoires des décharges locales de coupure sur la surface de l'isolateur ;
- présence d'arc de décharge dans l'air ;
- expansion de l'arc local jusqu'au contournement.

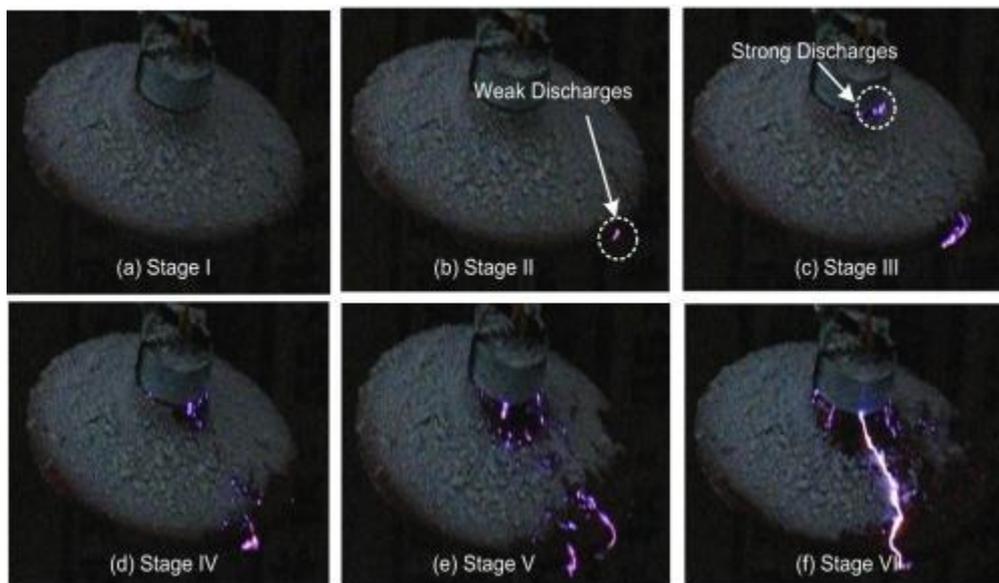


Figure. I.14: Processus de contournement sur un isolateur givré-glacé [16].

Les auteurs ont pu différencier 3 principales étapes : l'étape initiale (l'étape 1 et 2), l'étape intermédiaire (étape 3) et l'étape avant le contournement (étape 4 et 5). L'analyse du signal de courant de fuite montrera que durant la première étape, la forme d'onde du courant est presque sinusoïdale, avec de faibles amplitudes dues à l'absence de charge apparente. Puis, durant les étapes suivantes, sa forme est de moins en moins sinusoïdale, avec des amplitudes de plus en plus grandes jusqu'au contournement figure I.15.

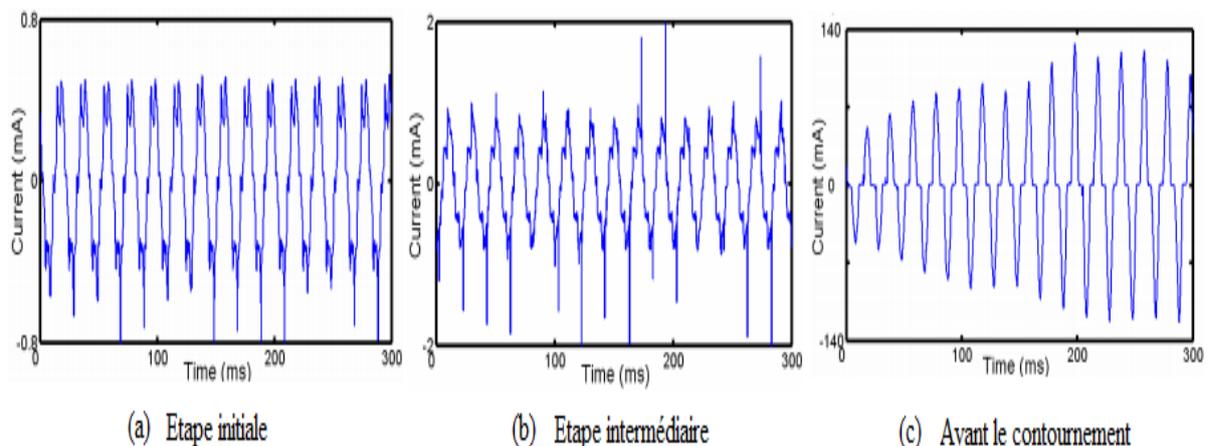


Figure. I.15:Forme d'ondes du courant de fuite [16].

Après extraction des hautes fréquences (1.25-2.5 kHz), l'application de la technique RP indique la caractéristique non-linéaire du signal de courant de fuite, ainsi que deux propriétés différentes :

l'une est caractérisée par des points récurrents formant des lignes, qui sont parallèles à la principale diagonale figure I.16.a et I.16.b ; l'autre se caractérise par l'alternance des points de concentration récurrente et des segments spatiaux blancs figure I.16.c.

Le nombre croissant de points récurrents peut refléter le changement dans l'activité des décharges sur la surface de l'isolateur. Les points denses indiquent l'état stationnaire des décharges intenses dans les bandes sèches. Le segment vierge indique l'état de transition.

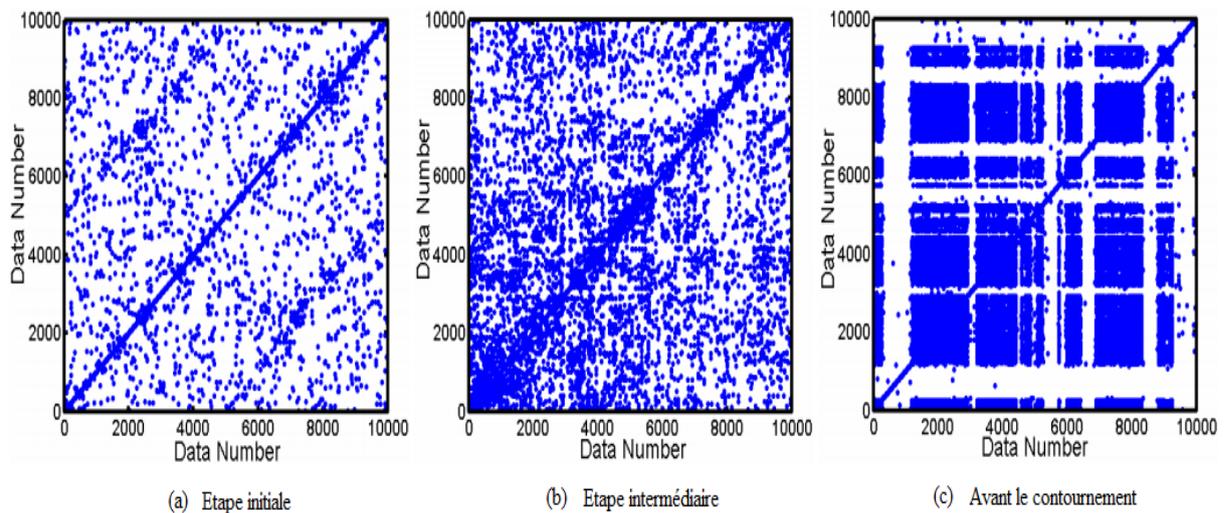


Figure. I.16: RP des composantes hautes fréquences durant le contournement [16].

Les indicateurs quantitatifs, le RR (Récurrent Rate) et le DET (Déterminisme), ont été calculés, et viennent confirmer les résultats graphiques de la technique RP. Ainsi, la diminution du RR indique une diminution de la performance de l'isolateur due à l'augmentation des faibles décharges puis de charges locales, et finalement un arc de décharge intense. Alors que la diminution du DET reflète la diminution des éléments déterministes dans le courant.

CHAPITRE II

Théories de Traitement de Signal

Généralités sur le traitement du signal

Nous appellerons signal toute grandeur physique susceptible de contenir de l'information. La représentation temporelle d'un signal est définie par une fonction $x(t)$, réelle ou complexe, de la variable réelle temps t qui doit approcher «au mieux» les informations contenues dans le signal.

La dénomination fonction est prise au sens le plus général du terme, i.e., $x(t)$ peut être une suite discrète, une fonction de la variable continue ou une distribution. Cette fonction peut être une fonction au sens classique et dans ce cas, on dira qu'elle représente un signal déterministe. Elle peut aussi être une «fonction aléatoire» et dans ce cas elle représente un signal dit aléatoire ou stochastique. Signalons que tout signal physique est forcément perturbé par un bruit plus ou moins important (bruit de mesure, influence des appareils utilisés etc....). Un signal physique est donc un signal aléatoire. La figure II.1 montre l'effet du bruit : signal non bruité (réalisation 1), signal bruité (réalisations 2 et 3).

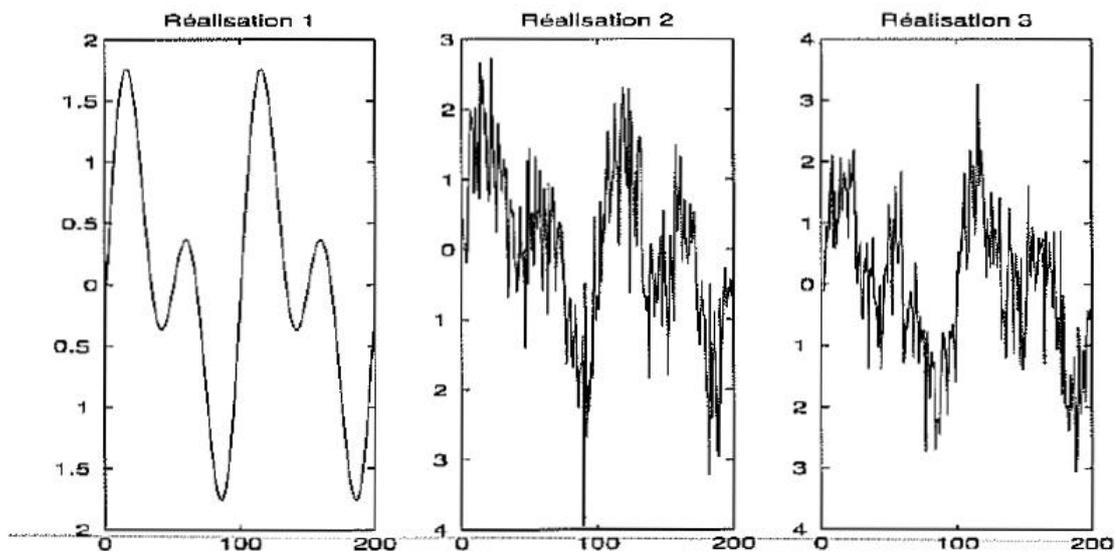


Figure.II.1: Trois réalisations d'un signal montrant l'effet du bruit.

Le signal peut aussi être représenté par une relation de récurrence entre les valeurs prises par le signal à des instants différents.

Un signal $x(t)$ est dit causal s'il vérifie $x(t) = 0$ pour $t < t_0$ où t_0 est un instant fixé (en général $t_0 = 0$). Un signal qui vérifie $x(t) = 0$ pour $t > t_0$ est dit anti causal. D'après le principe suivant l'effet ne peut précéder la cause, tout signal physique est causal.[17]

II.1. Catégories des 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.[18]

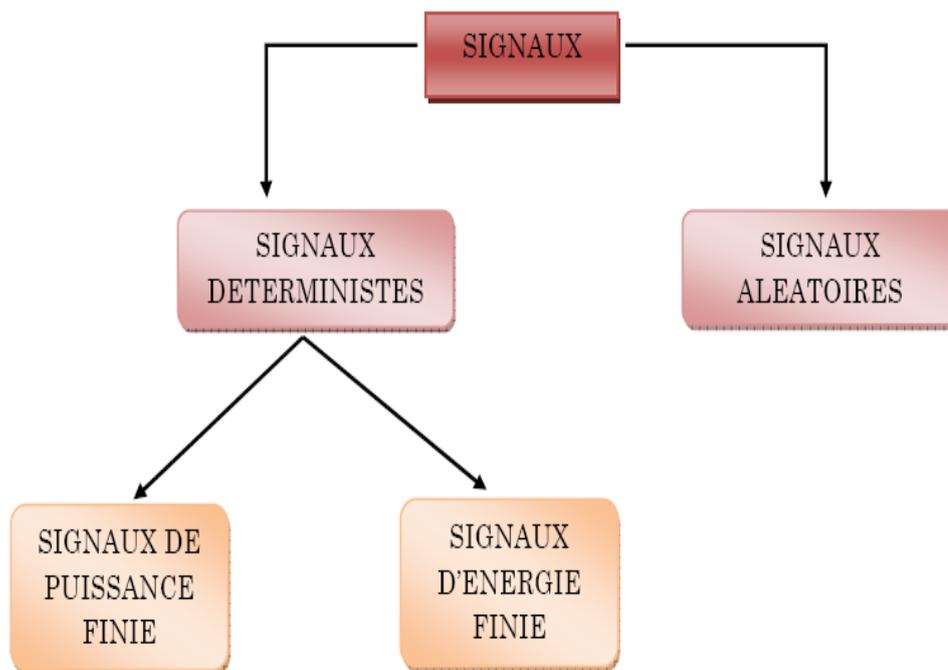


Figure.II.2: Différents types de signaux.

II.1.1. Signaux déterministes

Un signal déterministe est un signal dont l'évolution en fonction du temps peut être modélisée par une fonction mathématique dite certaine. Un tel signal est parfaitement déterminé à chaque instant par cette fonction : c'est un signal déterministe. Ils peuvent être classés en deux groupes selon qu'ils soient d'énergie finie ou de puissance finie.[19]

- 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*

Ce sont des signaux à temps continu, c'est-à-dire définis pour toute valeurs de la variable temps.

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

➤ *Signal à temps discret*

La variable de la fonction f considérée ne peut prendre que des valeurs entières $k \in \mathbb{Z}$. dans le cas particulier de la variable temps, k représente un multiple d'une durée t_0 qui permet de numériser les signaux (échantillonnage et quantification).

$$p = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |x(k)|^2 < \infty \quad (\text{II.5})$$

II.1.2. 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 apparait 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 a mené à classier le signal numérique comme une suite de variables aléatoires.

II.2. Transformée de Fourier

De nos jours, la transformée de Fourier est devenue un outil puissant en traitement du signal et joue un rôle considérable en électronique, et d'une manière générale dans l'étude des systèmes dynamiques. Son intérêt provient de l'interprétation physique que l'on peut avoir du théorème de Fourier : cela conduit à la notion fondamentale de spectre. Le spectre est la représentation graphique d'un signal non plus dans le domaine temporel, mais dans le domaine fréquentiel. L'équivalence entre représentation temporelle et représentation fréquentielle est essentielle pour l'étude du traitement du signal, puisqu'elle localise toutes les composante fréquentielles d'un signal quelconque. Cependant son application est liée à la nature du signal qu'il soit continu ou discret.[18]

II.2.1. Propriétés de la transformée de Fourier d'un signal continu

Soit $x(t)$ un signal complexe déterministe. La transformée de Fourier est une fonction complexe de la variable réelle $\omega = 2\pi f$ définie par :

$$F\{X(t)\} = X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{II.6})$$

La transformée inverse est donnée par :

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{II.7})$$

Le signal est dit stable ou à module intégrable si :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |X_a(t)| dt < \infty \quad (\text{II.8})$$

La symétrie de ces formulations montre l'existence d'une dualité temps-fréquence Convolution en temps est équivalent d'un produit en domaine Fourier :

$$y(t) = x(t) * f(t) \Leftrightarrow Y(\omega) = X(t) F(t) \quad (\text{II.9})$$

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.[20]

Condition d'existence :

Pour qu'une fonction $x(t)$ possède une transformée de Fourier il faut et il suffit que:

- la fonction $x(t)$ soit bornée.
- l'intégrale de $x(t)$ entre $-\infty$ et $+\infty$ ait une valeur bornée.
- les discontinuités de $x(t)$ soient en nombre fini.

II.2.2. Transformée de Fourier à temps discret

II.2.2.1. Définitions

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

L'observation d'un signal pendant une durée limitée revient à le multiplier par une fenêtre rectangulaire (Figure II.3) qui vaut 1 sur un intervalle et 0 si non. L'expression mathématique de la TFTD est :

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

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 $[-1/2, +1/2]$. [21]

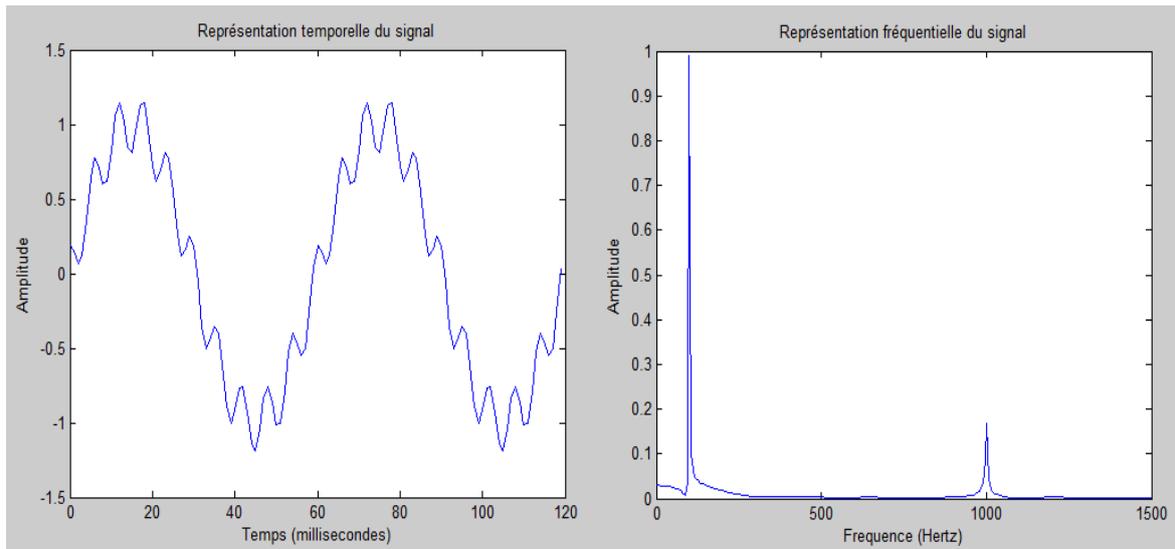


Figure.II.3: Représentation le domaine temporel (à gauche) et le domaine fréquentiel (à droite).

II.2.3. Transformée de Fourier rapide (FFT ou TFR)

La transformée de Fourier rapide TFR ou FFT (*fast fourier transform*) est simplement un algorithme permettant de réduire le nombre d'opérations, en particulier le nombre de multiplications, pour calculer la TFD ce temps de calcul est en effet primordial pour réaliser des système numériques en «temps réel».[22]

II.2.4. L'opération d'Echantillonnage

L'échantillonnage consiste à représenter un signal fonction du temps $s(t)$ par ses valeurs $s(nT_e)$ à des instants multiples entiers d'une durée T_e , appelée période d'échantillonnage.

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

$$s_e(t) = S(n.T_e) \quad (\text{II.13})$$

Avec n : entier.
 T_e : période d'échantillonnage.

Cette opération est réalisée par un échantillonneur souvent symbolisé par un interrupteur. En général, on échantillonne dans l'intervalle compris entre 0 et la *fréquence de Nyquist*, c'est-à-dire la moitié de la fréquence d'échantillonnage.

Le théorème inclut aussi des possibilités moins souvent mises en pratique, comme l'échantillonnage d'un signal à bande de fréquences étroite à moins du double de la fréquence

maximale. Il montre aussi que d'autres types d'échantillonnage, par exemple avec des échantillons groupés par deux, ou un échantillonnage de la valeur et de sa dérivée un point sur deux, peuvent décrire le signal. Dans tous ces cas, le même nombre total d'échantillons est nécessaire.

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.

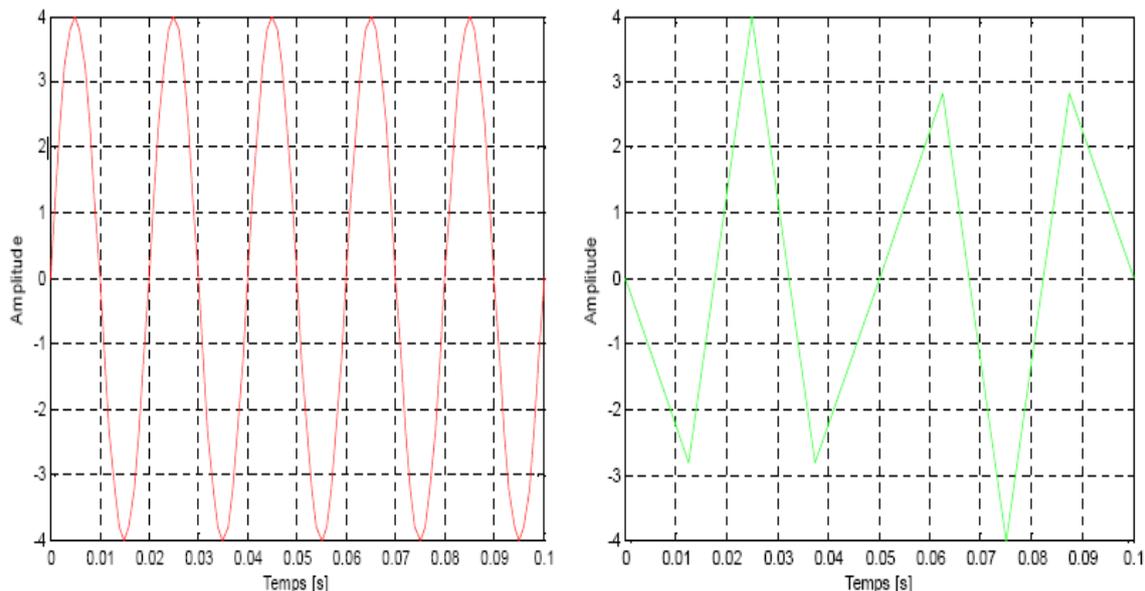


Figure.II.4:Allure de la sinusoïde échantillonnée pour $F_e=80$ Hz (à droite en vert) et pour $F_e= 1$ kHz (à gauche en rouge).

II.2.5. 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 $S_{dB}(f)$ 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.[23]

II.2.5.1. Périodogramme

Le périodogramme est une méthode d'estimation de la densité spectrale de puissance d'un signal. La méthode directe de calcul du périodogramme utilise la transformée de Fourier rapide (*FFT*) du signal.[24]

$$P = \frac{|fft(s)|^2}{N} \quad (\text{II.14})$$

Cette méthode permet de calculer rapidement la densité spectrale de puissance d'un signal échantillonné de durée finie, même s'il est périodique. Cet estimateur est biaisé et présente une variance non nulle qui est défini par l'expression mathématique:

$$I_n(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (\text{II.15})$$

II.2.5.2. Périodogramme moyenné

Pour améliorer les performances de l'estimateur précédent on calcule plusieurs périodogrammes sur des signaux indépendants. La sinusoïde est la même pour les différents signaux mais le bruit est indépendant pour chaque réalisation. On calcule ensuite la moyenne des différents périodogrammes.[24]

Cette méthode réduit la variance d'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:

$$I_m(f) = \frac{1}{L} \sum_{s=0}^{L-1} \left(\frac{1}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} X(sM + m) e^{-j2\pi f m} \right|^2 \right) \quad (\text{II.16})$$

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, toute fois cette opération réduit considérablement l'amplitude des fluctuations.

II.2.5.3. 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.2.6. 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 $x(n)$ par une fonction de fenêtrage $w(n)$. La résolution fréquentielle est inversement proportionnelle au nombre d'échantillons et dépend de la fenêtre utilisée.

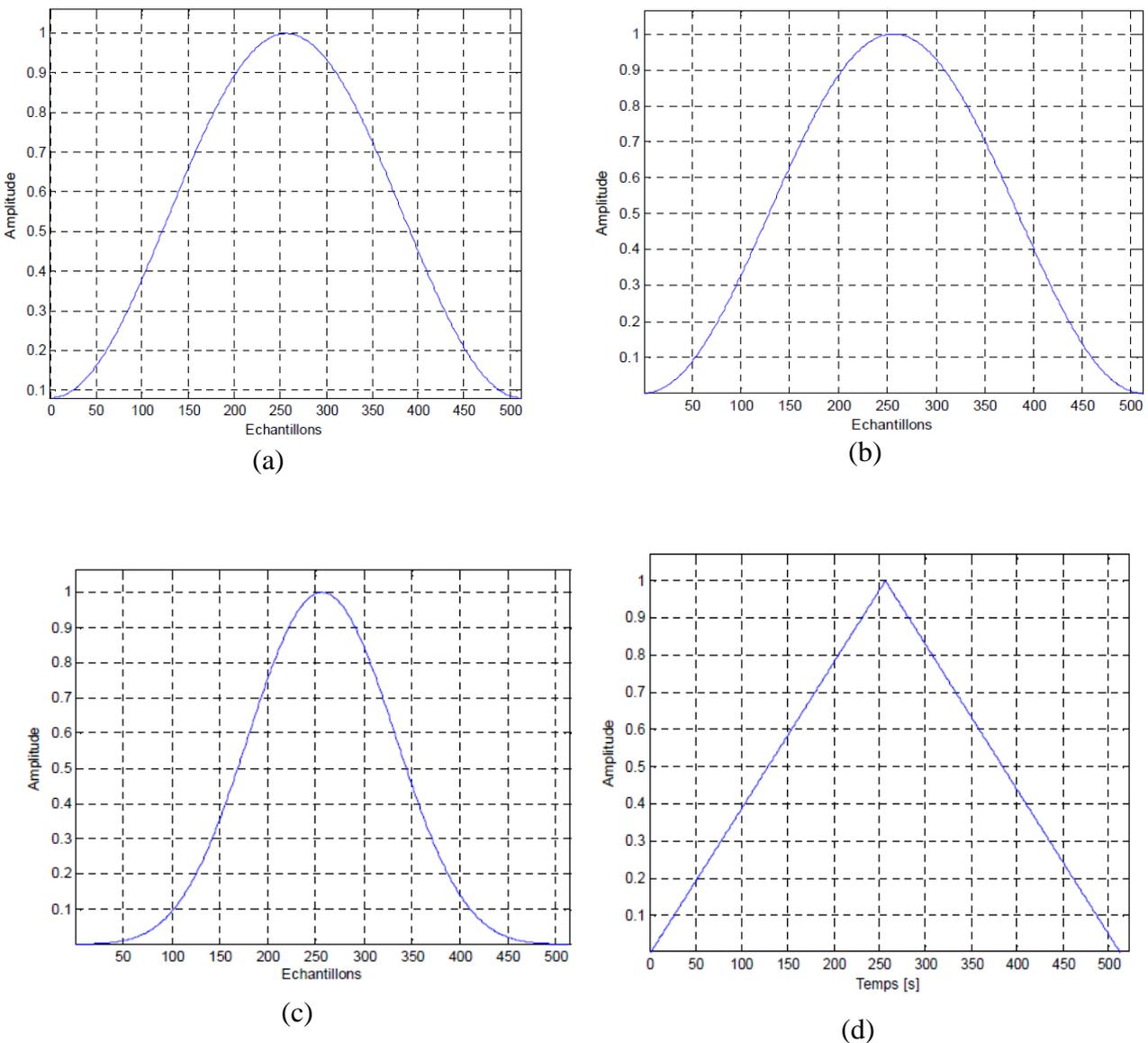


Figure.II.5: Différents types de fenêtres ; (a) Fenêtre de Hamming, (b) Fenêtre de Hanning, (c) Fenêtre de Blackman, (d) Fenêtre de Bartlett.

Conclusion

Dans cette 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 recel.

L'estimation spectrale aboutit à de meilleurs résultats avec le periodogramme 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.

CHAPITRE III

Dispositifs et

Méthodologies

Expérimentales

Introduction

Afin d'étudier le comportement du modèle plan de l'**isolateur plat F160D/146 DC** dans le cas d'une pollution non-uniforme, nous avons effectuée des expériences au laboratoire de Haute Tension de l'Université de Tiaret. On a choisi ce type d'isolateur car il est utilisé en Algérie par la SONELGAZ pour les lignes de haute tension (400 kV) entre Bechar et Naama.

Pour la pollution non-uniforme, nous nous sommes intéressés à l'influence de la largeur des bandes propres et le type de pollution, sur la tension de contournement et le courant de fuite pour plusieurs niveaux de tension appliquées.

III.1. Dispositif expérimental

III.1.1. Circuit d'essais du Laboratoire de Haute Tension :

La station d'essai à fréquence industrielle du Laboratoire de Haute Tension de Tiaret est de marque "**Messwandler-Bau**". Cette station contient les équipements suivants (Figure III.1) :

- Un transformateur d'essai : 220V/200kV, 50 Hz
- Des appareils de mesures et de protection.
- Un oscilloscope numérique « GWINSTEK GDS-2062 » de bande passante 200 MHz permet l'acquisition des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée de notre modèle.
- Une camera numérique SONY DCR-SX34 sert à suivre le phénomène des décharges.

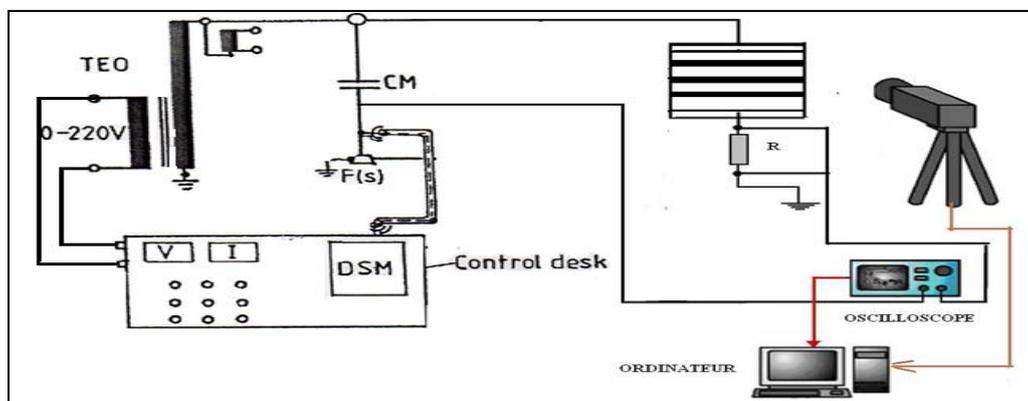


Figure.III.1: circuit d'essai.

III.1.2. Objet d'essai :

Nous avons proposé un modèle plan de laboratoire pour simuler le comportement de l'isolateur standard **F160D/146 DC** (Figure III.2).

On a utilisé deux bandes conductrices en aluminium ; qu'on a découpée de manière à ne pas avoir de pointes à leurs extrémités et on les a collé sur notre modèle plan à l'aide du gasoil de manière à éviter les couches d'air qui ont tendance à se former entre le plan et les bandes conductrices, pouvant engendrer des petites décharges, ce qui risque d'erreur nos mesures pendant les expériences (Figure III.4)

Le modèle est posé à une hauteur de 175 cm du sol (Figure III.3), afin de limiter l'effet des capacités parasites qui peuvent altérer la mesure de la tension appliquée et du courant de fuite.

Les principales dimensions du modèle plan étudié et de l'isolateur réel **F 160 D/146 DC** sont données dans les tableaux III.1 et III.2 après avoir mesuré les différentes grandeurs à l'aide d'un mètre ruban.

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

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

Dimensions du modèle plan	Longueurs (mm)
Longueur de la plaque	435 mm
Largeur de la plaque	435 mm
Epaisseur de la plaque	5 mm
Distance inter-électrode	375 mm

tableau.III.2. Dimensions du modèle plan étudié.

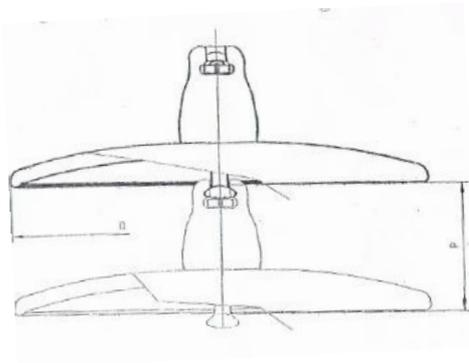


Figure.III.2: Profil de l'isolateur réel.



Figure.III.3: modèle plan à droite et hauteur du modèle plan par rapport au sol à gauche.

III.2. Nettoyage du plan

Le nettoyage du plan est tout d'abord fait avec de l'eau du robinet ; puis il est séché avec des serviettes en papier pour éliminer le maximum d'impuretés déposées. Un deuxième

nettoyage est effectué à l'aide d'un bout de coton trempé d'alcool chirurgical à 70° afin d'assurer une propreté quasi-totale du modèle plan.

III.3. Types de Pollution des Isolateurs

- **Type 1**

La pollution artificielle est appliquée en pulvérisant le modèle par une solution saline (NaCl mélangé avec l'eau distillée) de conductivité volumique 1mS/cm.

- **Type 2**

La pollution est réalisée en couvrant le modèle par le sable relevé de sol de Ain Safra à proximité de la zone où notre modèle d'isolateur réel **d'isolateur standard F 160 D/146 DC** est installé. Le sable du sol est uniformément réparti sur le modèle plan avec une quantité de 10g dans chaque couche polluée, ensuite la pulvérisation est effectuée avec l'eau distillée.

- **Type 3**

La même procédure est répétée avec le sable des dunes provenant de la même région.

- **Type 4**

la pollution artificielle est faite de la même manière précédente en utilisant le sable de la mer de Bordj Elkifane (Alger).

III.4. Méthode de pulvérisation :

La pulvérisation a été choisie pour la pollution artificielle de la surface du modèle plan pour le cas non-uniforme. La longueur de fuite du modèle est gardée constante.

La méthode de pulvérisation doit être la même pour les différents essais à fin de minimiser les erreurs de mesure.

L'humidification de la surface est obtenue après six pulvérisations de chaque côté de l'isolateur à une distance de 0.5m qui est gardée constante pendant toutes l'expérimentation.(Figure III.4)

Dans l'intention de déterminer l'influence de nombre de pulvérisation sur la tension de contournement, les essais sont effectués en variant le nombre de pulvérisation d'une manière régulière 3, 6 et 9 pulvérisation de chaque coté du modèle.

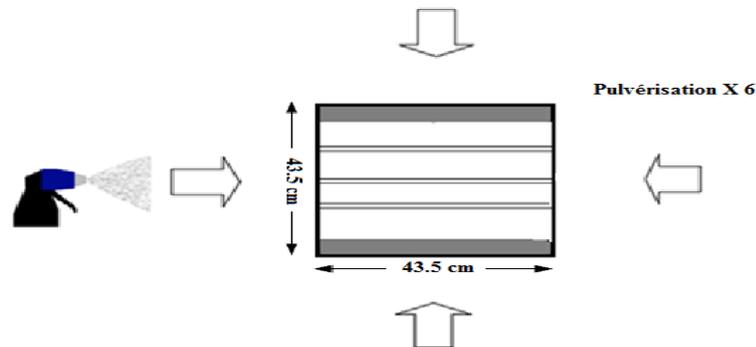


Figure.III.4: technique de pulvérisation.

III.4.1. Pollution non-uniforme :

Dans l'intention de déterminer l'influence de la pollution non-uniforme sur le comportement du modèle plan du laboratoire, les essais sont effectués en variant la largeur des couches propres et le type de pollution de façon régulière.

Pour ce cas de figure, l'humidification de la surface est faite en cachant les parties qu'on veut garder sèche avec du nylon (Figure III.4).

III.5. Mesure du courant de fuite

Pour toutes les configurations de pollution étudiées, les mesures du courant de fuite ont été réalisées via un oscilloscope numérique de marque « **GWINSTEK GDS-2204** ». Pour évaluer le courant de fuite, nous récupérons le signal de la tension aux bornes d'une résistance de $1k\Omega$ insérée en série entre l'objet d'essai et le retour de la terre. Le signal ainsi récupéré représente l'image du courant de fuite. Tous les signaux ont été enregistrés sous forme de vecteurs de 500 éléments afin de s'en servir dans l'analyse spectrale.

Conclusion

Afin de bien réussir notre étude, nos essais sont effectués sur le modèle plan pour simuler l'isolateur réel **F 160 D/146 DC** dans le cas d'une pollution non uniforme, le modèle plan a été choisi pour plusieurs raisons :

- Ce modèle donne des résultats très proches du modèle réel.

- L'utilisation d'une plaque isolante transparente nous permet de bien visualiser l'activité des décharges parallèles sur la surface.
- L'application de la couche de pollution non-uniforme est facile et plus précis que sur l'isolateur réel.
- Le nettoyage de la plaque est simple.

CHAPITRE IV

Résultats et Interprétations

Introduction

Dans cette partie, nous montrons une analyse des résultats obtenus durant nos essais dans le cas de la pollution non uniforme pour les différentes configurations de pollution, de conductivité, et de la largeur des couches salines qu'on a déjà présenté dans la partie des techniques expérimentales.

Après l'interprétation des résultats des essais de contournement effectués sur le modèle plan au laboratoire, on s'intéresse à l'évolution de la tension appliquée et du courant de fuite. Pour cela nous calculons l'énergie des harmoniques les plus significatifs (1er, 3ème, 5ème, 7ème et 9ème), à l'aide de l'analyse spectrale avec le périodogramme de Welch.

Cela a pour but de diagnostiquer la sévérité de pollution en fonction des harmoniques de courant fuite ayant une énergie significative.

IV.1. Tension de contournement

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur, elle permet de définir la rigidité diélectrique du système. Dans notre cas, avant de procéder aux enregistrements du courant de fuite nous avons mesuré la tension de contournement pour les différentes configurations de conductivité et de pollution.

IV.1.1. Influence du nombre de pulvérisation :

Dans cette partie nous analysons l'influence du nombre de pulvérisation sur la tension de contournement du modèle plan, pour une conductivité 1mS/cm et largeur de chaque bande propre $L_{bp} = 1\text{cm}$. Les résultats d'essais sont donnés dans le tableau IV.1.

D'après la figure IV.1 Nous constatons que la tension de contournement est inversement proportionnelle au nombre de pulvérisation, ce qui peut justifier les conséquences majeurs de la sévérité de pollution sur le comportement des isolateurs.

N° d'essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyenne
Uc (KV _{eff})	3 pulvérisation	144	148	134	142
	6 pulvérisation	124	112	110	115,33
	9 pulvérisation	77	90	86	84,33

Tableau.IV.1: Mesures de la tension de contournement avec 3 configurations de pulvérisation.

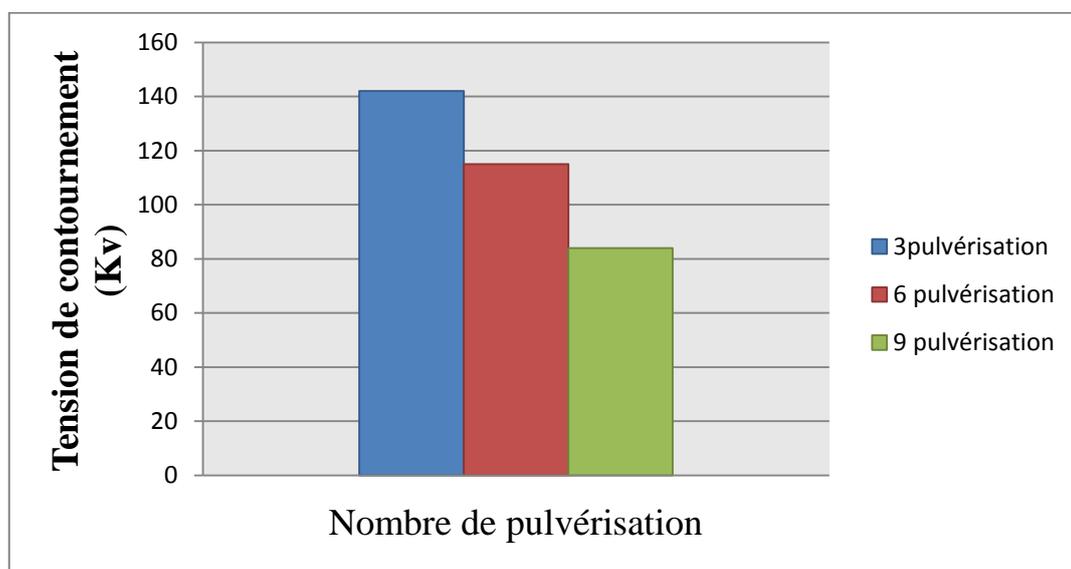


Figure. IV.1: Influence du nombre de pulvérisation sur la tension de contournement.

IV.1.2. Influence de la largeur des bandes propres :

Dans cette partie nous analysons l'influence de la largeur des bandes propres sur la tension de contournement du modèle plan après six pulvérisations et pour conductivité 1mS/cm. Les résultats d'essais sont donnés dans tableau IV.2.

D'après la figure IV.2 Nous constatons que la tension de contournement est importante pour la largeur de bande propre 3cm et faible pour le cas des largeurs des bandes propres 1, 3, 5 cm successives. La tension de contournement pour le cas de la largeur des bandes propres 1 cm dispersées est plus importante que celle trouvée pour la largeur des bandes propres 1 cm adjacentes (3 cm coté HT), ce qui justifie la dispersion des nervures dans l'isolateur réel.

N° d'essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyenne
Uc (KV _{eff})	1cm	124	112	110	115,33
	3cm	128	124	132	128
	3cm coté HT	104	113	108	108,33
	5cm	114	108	116	112,66
	1,3 et 5cm	104	108	100	104

Tableau.IV.2: Mesures de la tension de contournement avec différentes largeurs des bandes propres.

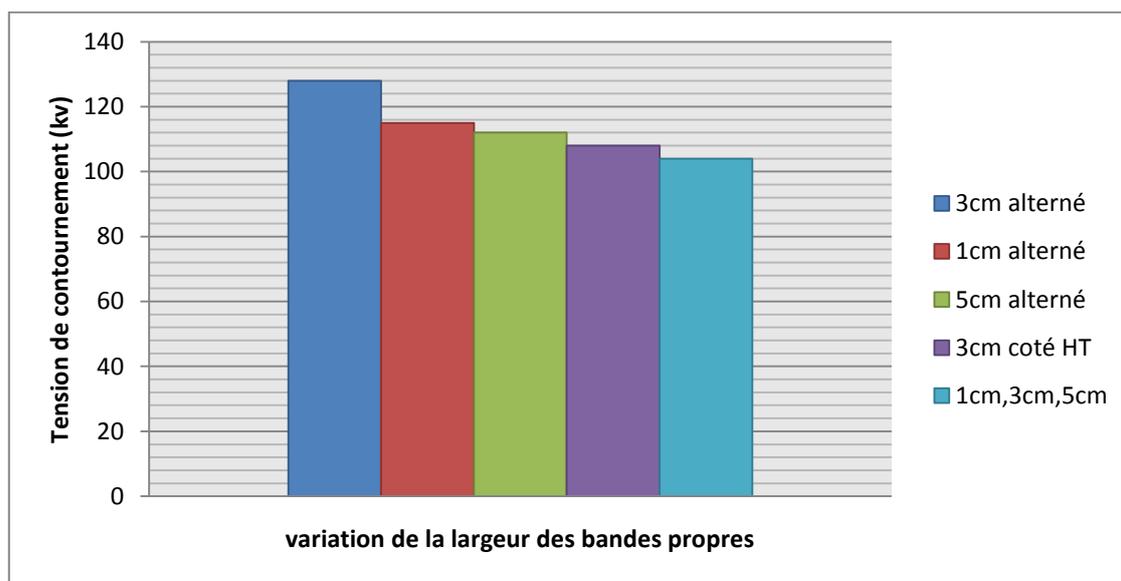
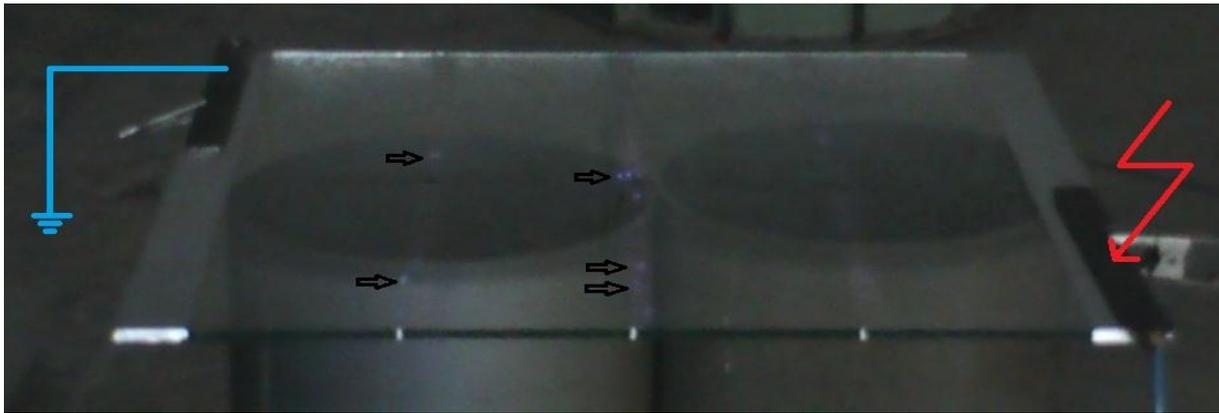


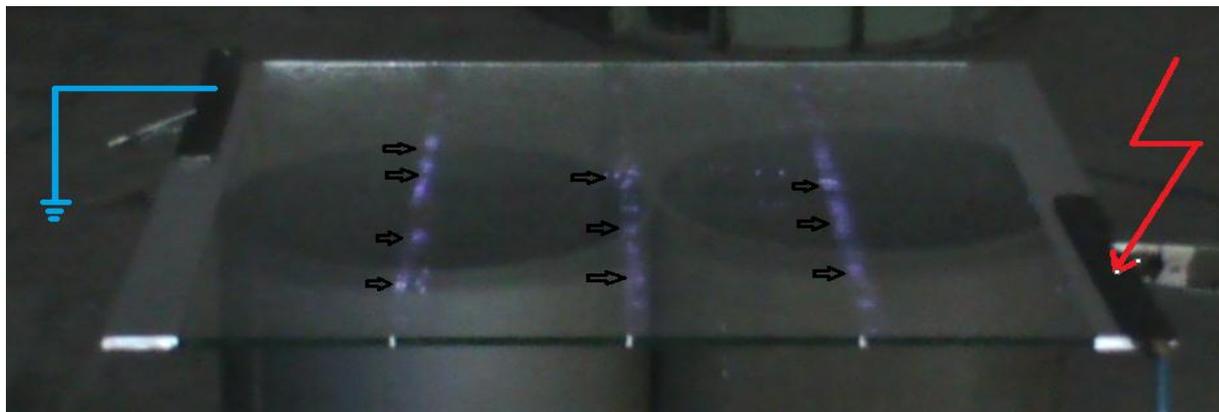
Figure. IV.2: Evolution de la tension de contournement en fonction de la largeur des bandes propres.

➤ **Déroulement de contournement pour lbp 1cm :**

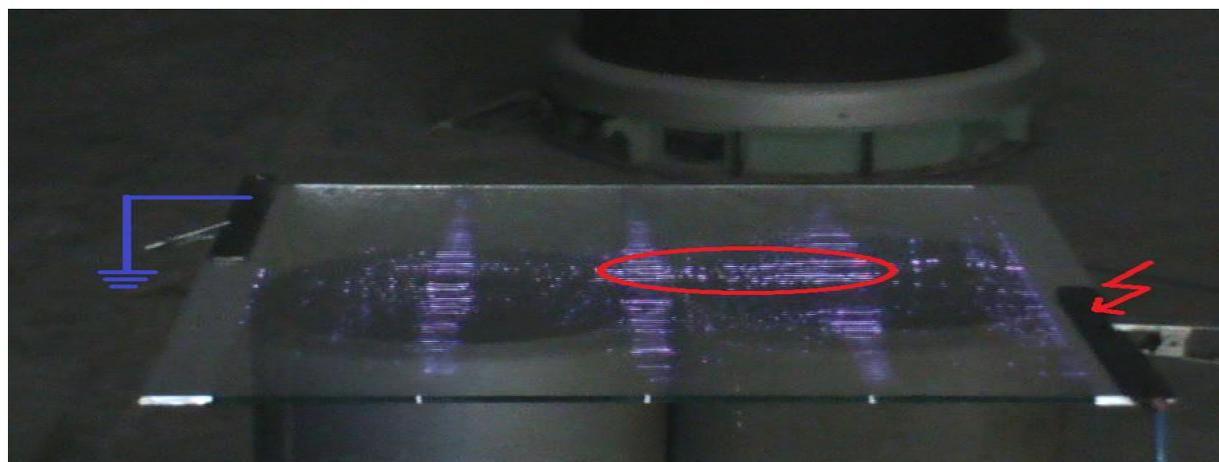
La figure IV.3 représente les étapes de déroulement de contournement : (a,b) l'apparition des arcs électriques à 30 kV et 62 kV (c) progression des arcs et apparition des décharges électrique au niveau des bandes polluées 90 kV,(d) saut final (contournement) 112kV.



(a)



(b)



(c)

Figure. IV.3: Les phases de contournement du modèle pollué pour $L_{bp}=1\text{cm}$, (a) 30 kV, (b) 62 kV (c) 90 kV.



(a)

Figure. IV.4: Les phases de contournement du modèle pollué pour $L_{bp}=1\text{cm}$, (a) 112 kV.

➤ **Déroulement de contournement pour L_{bp} 5cm :**

La figure IV.4 montre les étapes de déroulement de contournement pour L_{bp} est 5cm : (a) l'absence des arcs électrique à 50 kV, (b) Apparition des légers arcs électrique à 90 kV, (c) saut final c'est à dire un contournement direct car ($3 \times 5 > 1/3$ Ligne de fuite) [26].



(a)



(b)

Figure. IV.5: Contournement direct sans apparition de décharges préliminaires ($L_{bp}= 5\text{cm}$).(a) 50kV, (b) 90kV.



(a)

Figure. IV.6: Contournement direct sans apparition de décharges préliminaires ($L_{bp} = 5\text{cm}$). (a) 116 kV.

IV.1.3. Influence du type de pollution:

Le tableau IV.3 montre les résultats obtenus pour les essais sur le modèle plan pour largeur des bandes propres 1cm, et six pulvérisations.

D’après la figure IV.5, nous constatons que la tension de contournement est plus importante pour le sable des dunes et plus faible pour le sable de la mer.

N° d’essai		Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyenne
	Sable de sol	124	130	126	126,66
U_c (KV_{eff})	Sable des dunes	126	134	140	133,33
	Sable de mer	61	55	60	58,66

Tableau.IV.3: mesure de la tension de contournement des types de pollution.

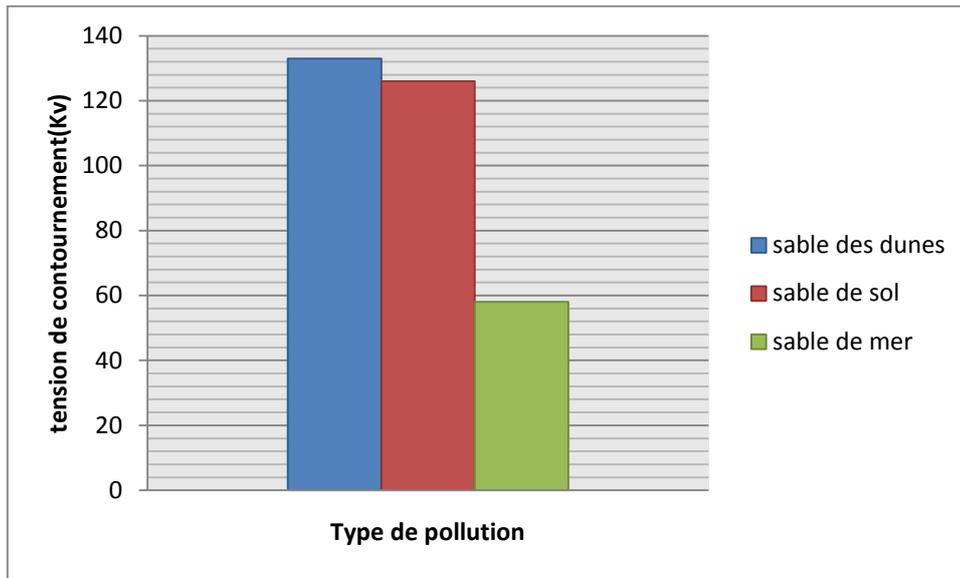
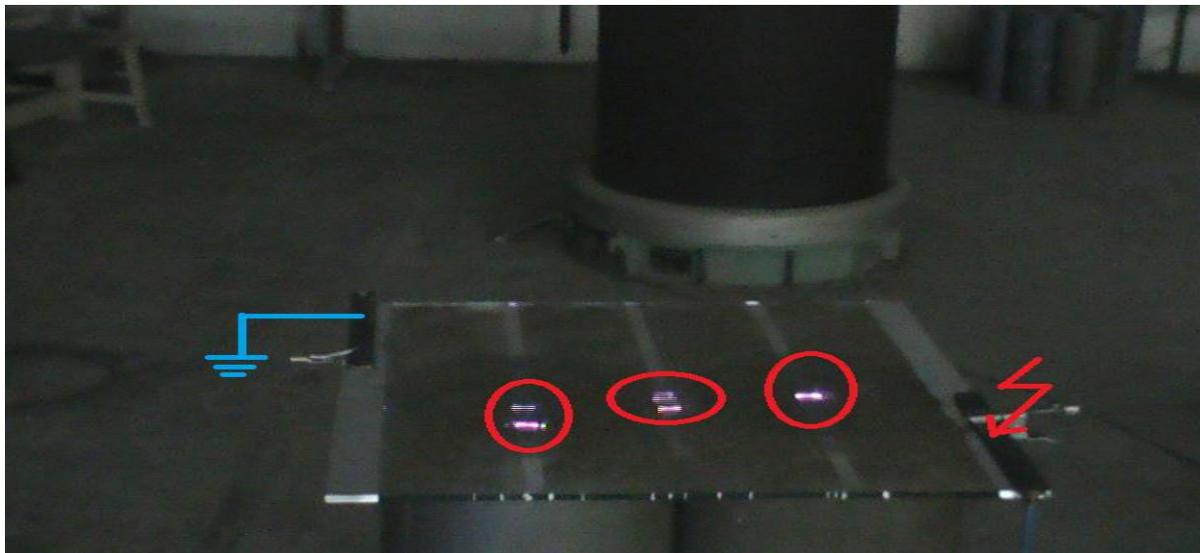


Figure. IV.7: Variation de la tension de contournement en fonction du type de pollution.

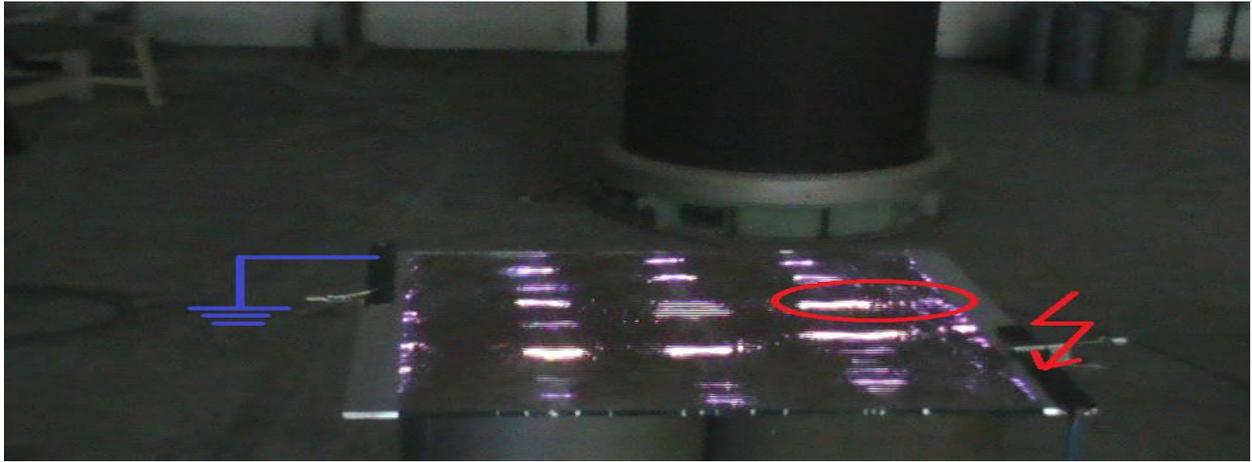
➤ **Déroulement de contournement pour le sable de mer:**

La figure IV.6 représente les étapes de déroulement de contournement : (a,b) l'apparition des arcs électriques à 25 KV et 35 KV, (c) progression des arcs et apparition des décharges électrique au niveau des bandes polluées 48 kV,(d) saut final (contournement) 55kV.



(a)

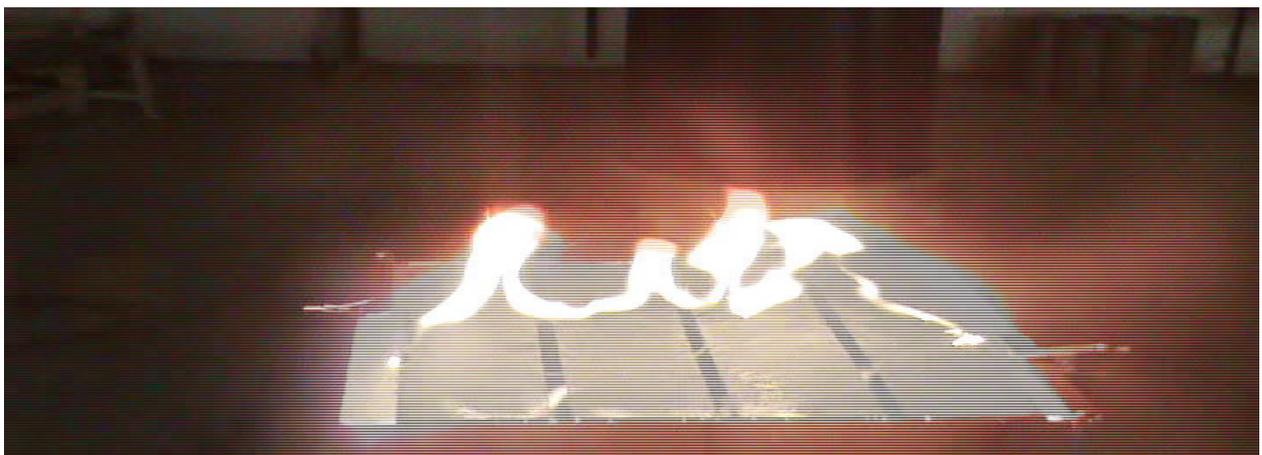
Figure. IV.8: Les phases de contournement du modèle pollué avec le sable du mer, (a) 25 kV.



(a)



(b)



(c)

Figure. IV.9: Les phases de contournement du modèle pollué avec le sable du mer,(a) 35 kV, (b) 48 kV, (c) 55kV.

IV.2. Courant de fuite

IV.2.1. Définition de courant de fuite :

C'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humide le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre.[24]

IV.2.2. Courant de fuite critique :

Le courant de fuite critique I_{max} est le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement. Sa valeur est obtenue dans la dernière demi-période avant le contournement.[27]

IV.2.3. Mesure de courant de fuite

La mesure du courant de fuite est effectuée à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, relié à une résistance, ce dispositif permet également de visualiser simultanément le signal de la tension appliquée et celui du courant de fuite sur l'oscilloscope, Un ordinateur sert à l'acquisition des données de la tension appliquée et du courant de fuite qui traverse la surface du modèle.

IV.2.3.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le courant de fuite

les tableaux IV.4, IV.5, IV.6, IV.7 montrent les courants de fuites mesurés pour différentes tensions appliquées, pour différentes largeurs des bandes propres et une conductivité de 1mS/cm.

D'après la figure IV.7, nous concluons que le courant de fuite augmente lentement en fonction de la tension appliquée sauf pour le cas où la largeur de bande propre est 1 cm et à partir de 35 kV, le courant augmente brusquement.

a) Largeur des trois bandes propres 1cm:

N° d'essai V _{app} (kv)	1	2	3	4	Moyenne (μ A)
10	48	38	45.1	64.2	48.825
15	82	88	89.9	85.6	86.375
20	100	129	108	121	114.5
30	235	174	214	207	207.5
40	382	359	383	357	370.25
50	1190	1150	1150	1220	1177.5

Tableau.IV.4: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3bandes de 1cm).

b) Largeur des bandes propres 3cm

N° d'essai V _{app} (kv)	1	2	3	4	Moyenne (μ A)
10	45.3	43.2	41.1	41.7	42.825
20	64.6	64.6	72.8	64.2	66.55
30	82	89	84	89.7	86.175
40	112	118	118	115	115.75
50	145	144	142	142	143.25

Tableau.IV.5: Evolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 3cm).

c) Largeur des bandes propres de 5 cm

N° d'essai V _{app} (kv)	1	2	3	4	Moyenne (μ A)
10	28	33.5	29	33.6	31.025
20	56.1	51.3	53.9	62	55.825
30	115	119	108	119	115.25
40	147	148	155	140	147.5
50	221	226	221	208	219

Tableau.IV.6: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 5cm).

d) Largeur des bandes propres de 1,3,5 cm

N° d'essai V _{app} (kv)	1	2	3	4	Moyenne (μ A)
10	50	53	56	55	53.5
20	116	109	113	118	114
30	197	206	205	206	203.5
40	242	241	248	236	241.75
50	379	375	373	377	376

Tableau.IV.7: évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (3 bandes de 1,3,5cm).

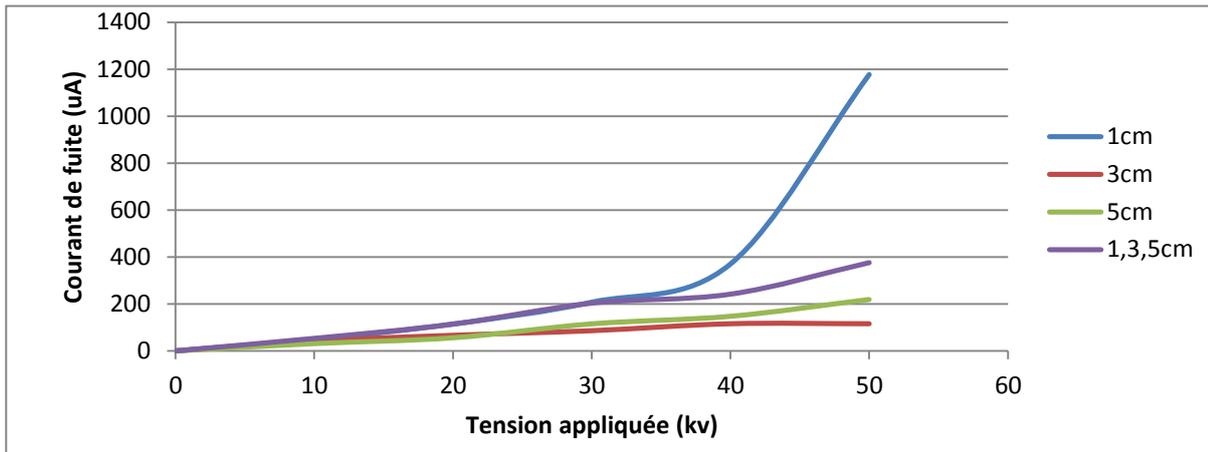


Figure. IV.10: Evolution du courant en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs des zones propres.

IV.2.3.2. Influence de différents types de pollution sur le courant de fuite

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

D'après la figure IV.8 nous remarquons que le courant de fuite pour les trois types de sable augmente lentement sauf pour le sable de la mer où le courant augmente brusquement à partir de 11kV.

N° d'essai V _{app} (kv)	N° d'essai				Moyenne (μA)
	1	2	3	4	
10	120	114	109	118	115.25
15	111	123	120	123	119.25
20	134	137	134	127	133

Tableau.IV.8: Mesures du courant de fuite (pollution avec le sable du sol).

N° d'essai V _{app} (kv)	1	2	3	4	Moyenne (μ A)
10	61	54	58	61.8	58.7
15	69.1	64.3	65.3	69.9	67.15
20	125	124	119	111	119.75

Tableau.IV.9: Mesures du courant de fuites (pollution avec le sable des dunes).

N° d'essai V _{app} (kv)	1	2	3	4	Moyenne (μ A)
10	117	121	121	108	116.75
15	227	291	224	268	252.5
20	741	716	735	618	702.5

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

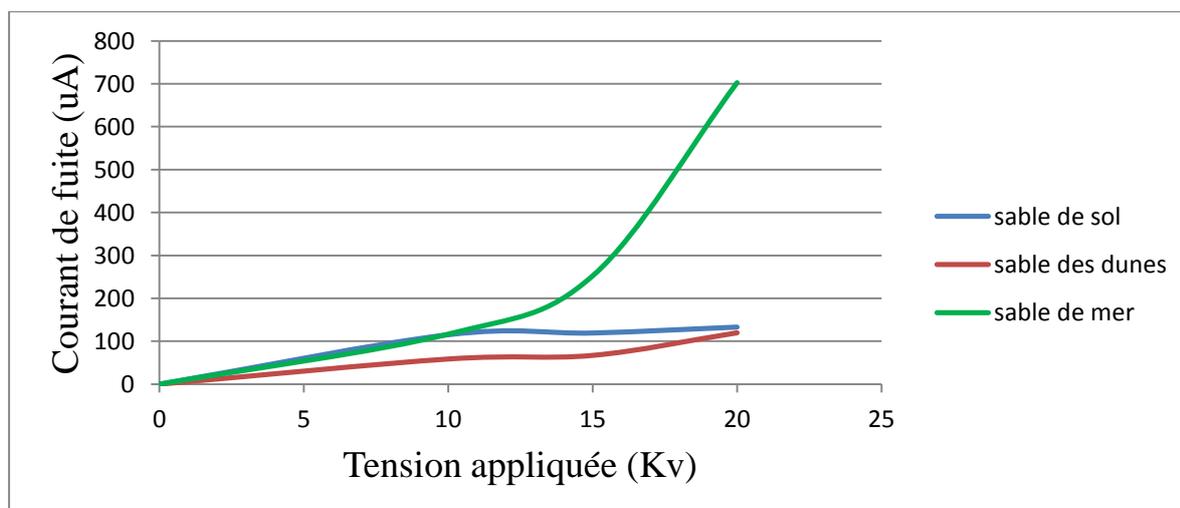


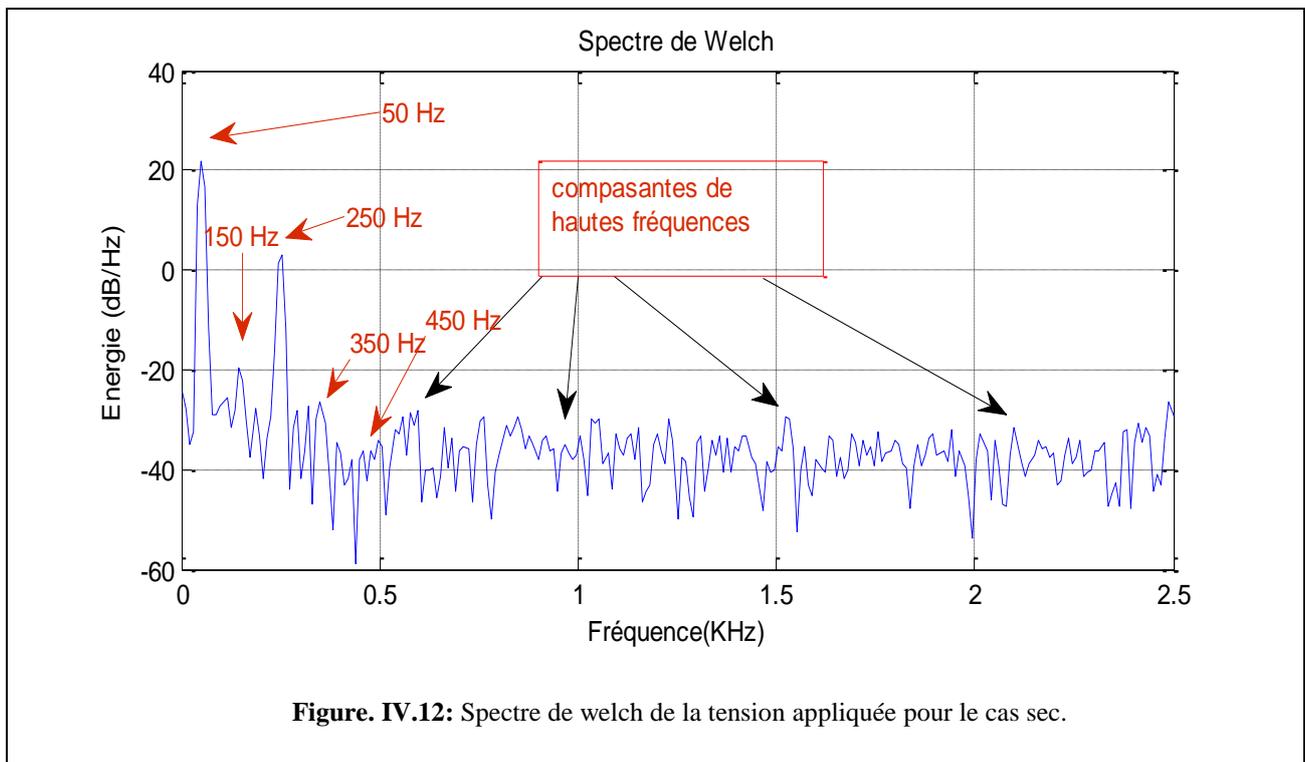
Figure. IV.11: Variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différents types de sable.

IV.3. Analyse l'énergie des harmoniques

Le calcul de l'énergie des harmoniques de tension et ceux du courant de fuite sont effectués à l'aide d'un programme écrit sous MATLAB® pour la pollution non-uniforme avec les différentes largeurs des bandes propres et différentes types de sable pour une conductivité volumique 1mS/cm.

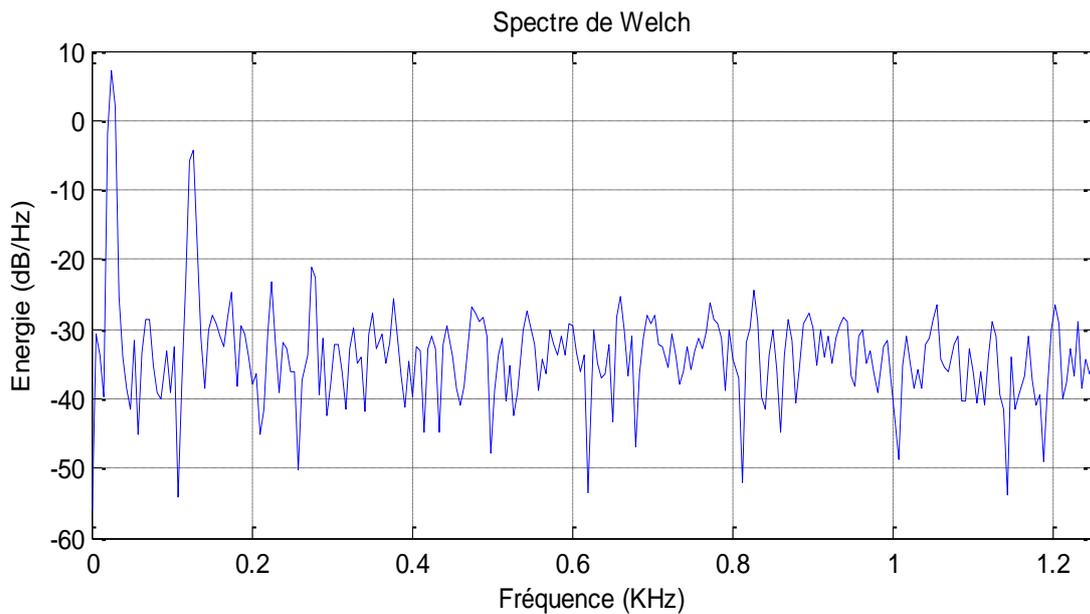
L'objectif de cette étude est de comprendre d'une part, la cause des distorsions observées sur le courant de fuite et la tension appliquée et d'autre part, d'évaluer la quantité d'énergie du courant de fuite qui est responsable de l'évaporation de l'eau en présence des décharges électrique à la surface du plan.

Cela a pour but de diagnostiquer la sévérité de pollution en fonction des harmoniques de courant ayant une énergie significative.

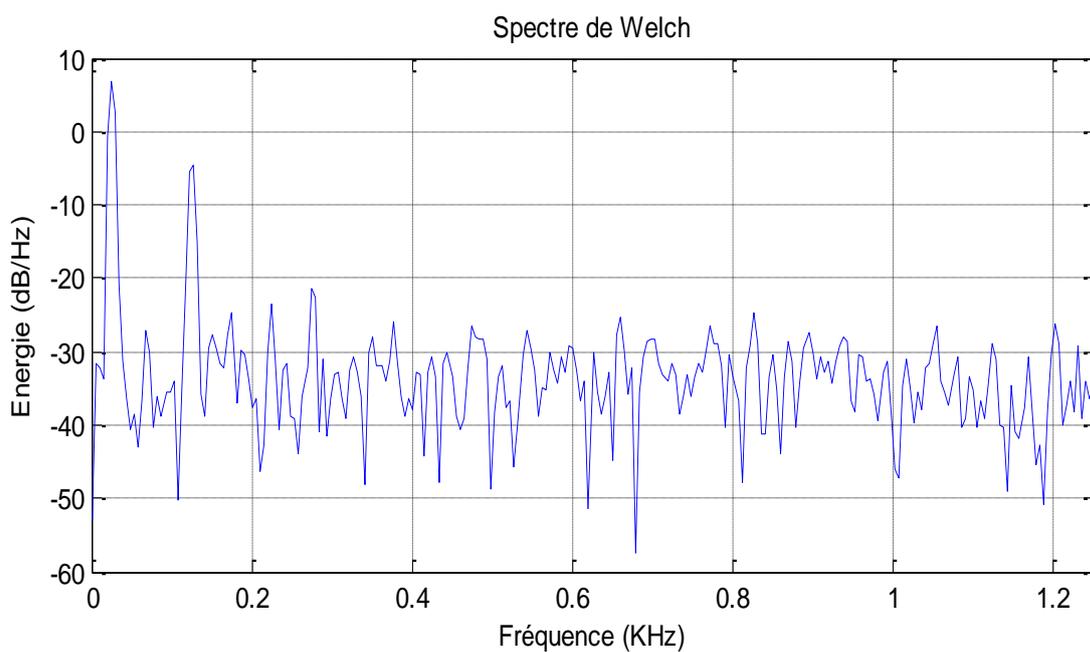


IV.4. Les différentes fenêtres de spectre de welch

Les figures suivantes montrent l'effet des différentes fenêtres exposées sur le spectre de Welch des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée pour un isolateur sec, dans le but de choisir la plus adéquate pour chaque signal.

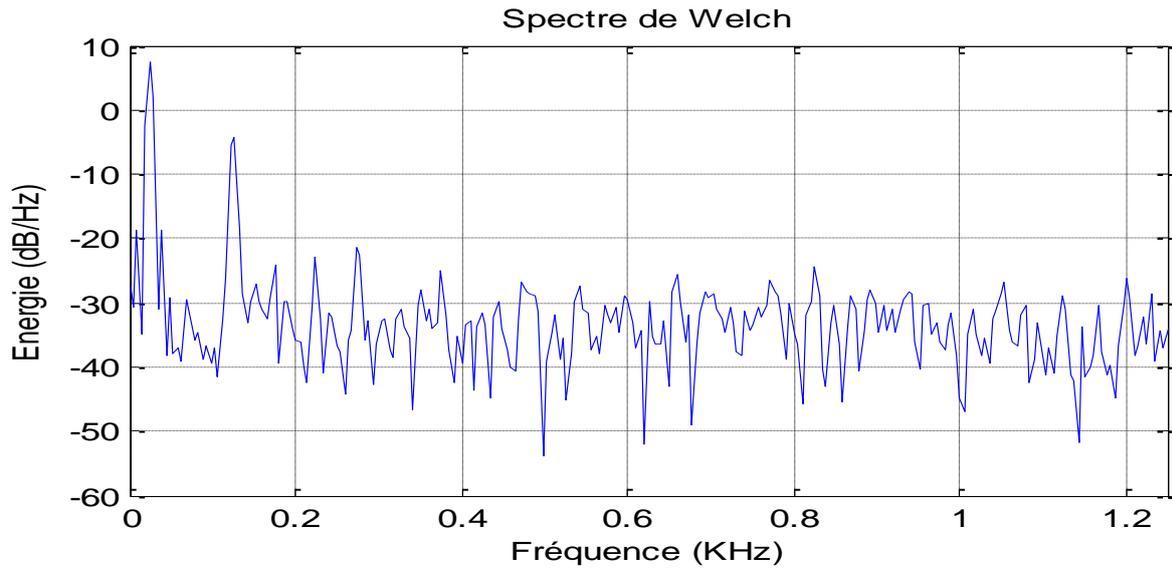


(a)

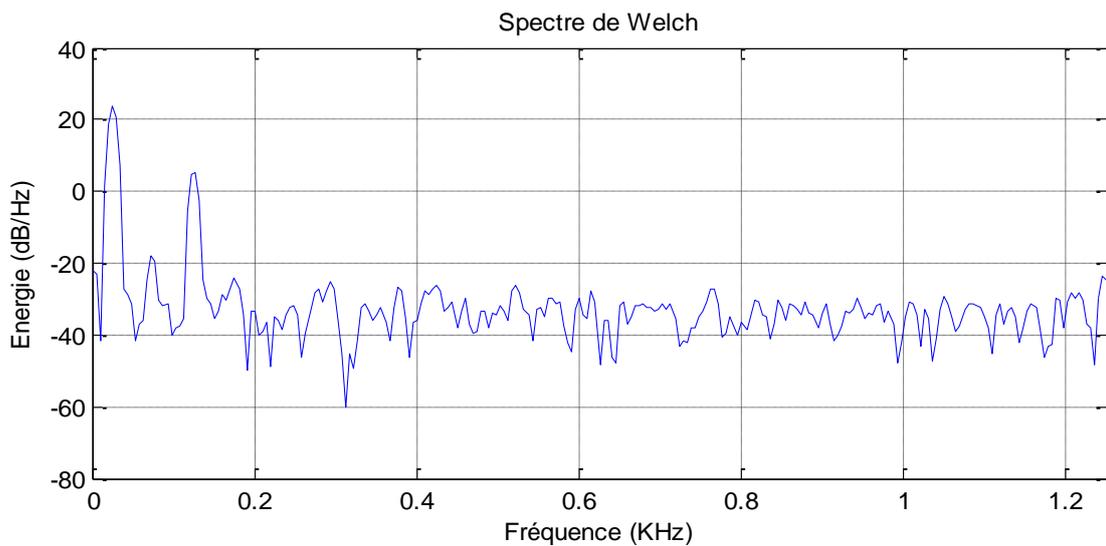


(b)

Figure. IV.13: Spectre de Welch de la tension appliquée: (a) Fenêtre de Hamming, (b) Fenêtre de Hanning.



(a)



(b)

Figure. IV.14: Spectre de Welch de la tension appliquée: (a) Fenêtre de Blackman, (b) Fenêtre de Bartlett.

Nous constatons que la fenêtre de Blackman procure une très mauvaise résolution fréquentielle comparativement aux trois autres fenêtres. Les fenêtres de Bartlett et Hanning permettent de distinguer les lobes des harmoniques principaux mais offrent une mauvaise résolution à partir de 1 kHz. C'est pourquoi la fenêtre de Hamming est encore une fois choisie pour l'analyse spectrale, puisqu'elle fournit plus d'informations sur les composantes fréquentielles présentes dans le signal du courant de fuite.

IV.5. Etude d'harmoniques pour la pollution non-uniforme en fonction de la largeur des bandes propres

IV.5.1. Tension appliquée 10 kV

Dans ce cas et pour les harmoniques de tension, nous remarquons que l'énergie du fondamental varie en fonction des différentes largeurs des bandes propres et que l'énergie des autres harmoniques varie aléatoirement pour différentes largeurs des bandes propres.

Pour les harmoniques de courant fuite, nous remarquons que l'énergie des harmoniques pour le cas de trois bandes propres de largeur 1cm et trois bandes propres de largeur 1cm, 3cm et 5cm sont très importantes par rapport aux autres bandes propres sauf pour le 7^{ème} harmonique où l'énergie pour trois bandes propres de 3cm affiche une augmentation comme celle de la tension appliquée, nous remarquons aussi que l'énergie de 5^{ème} harmonique possède la plus grande énergie comparativement aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème}.

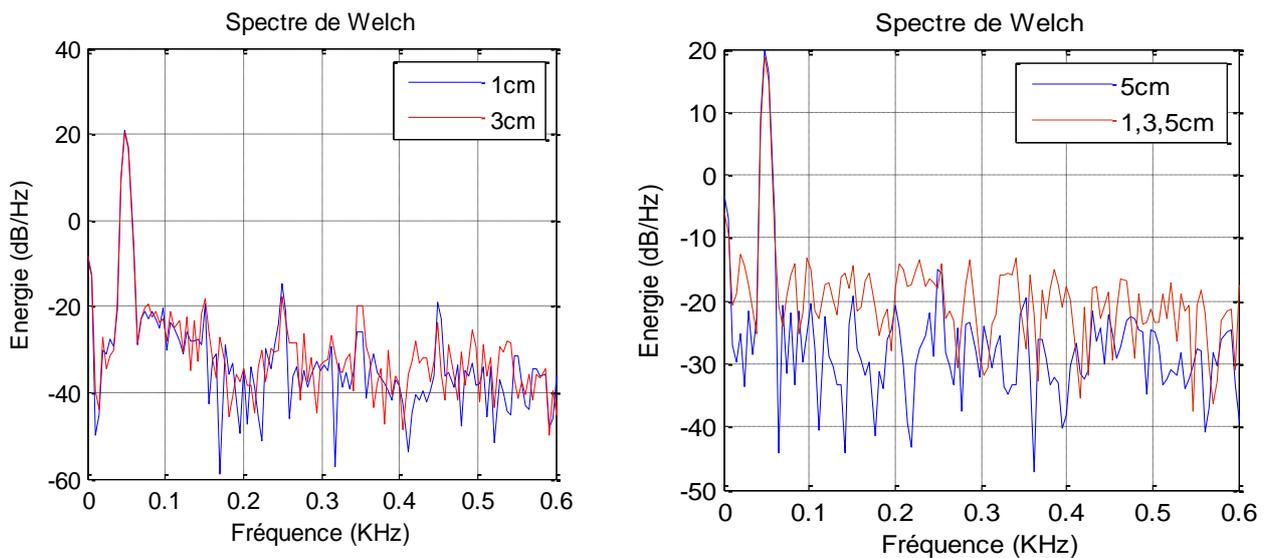


Figure. IV.15: Spectre de Welch de tension appliquée à 10 kV.

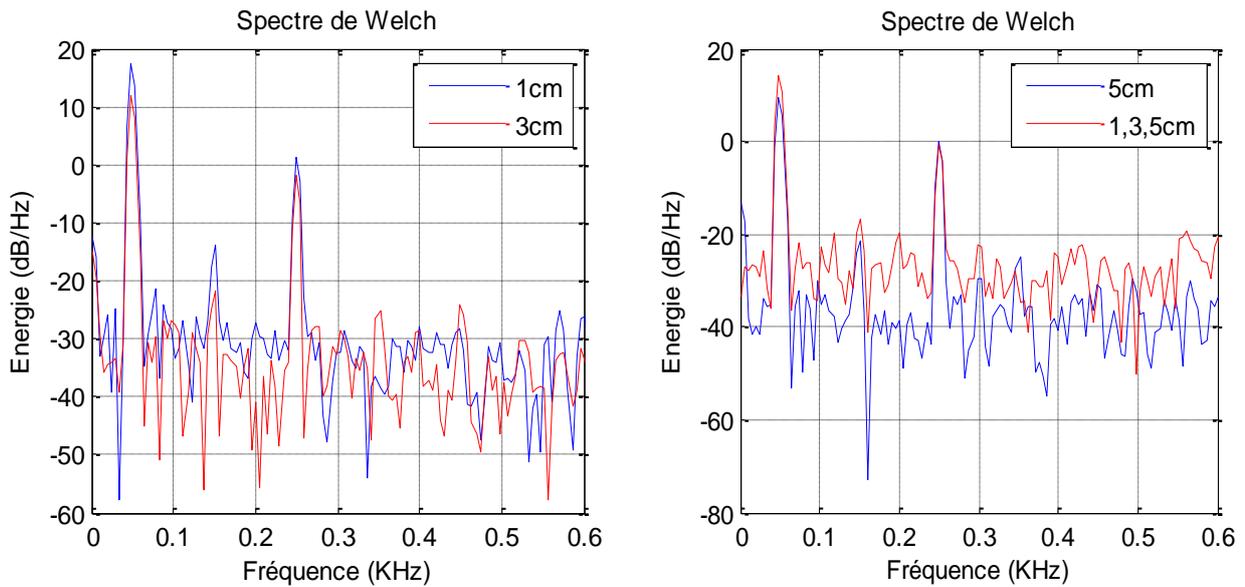


Figure. IV.16: Spectre de Welch du courant de fuite à 10 kV.

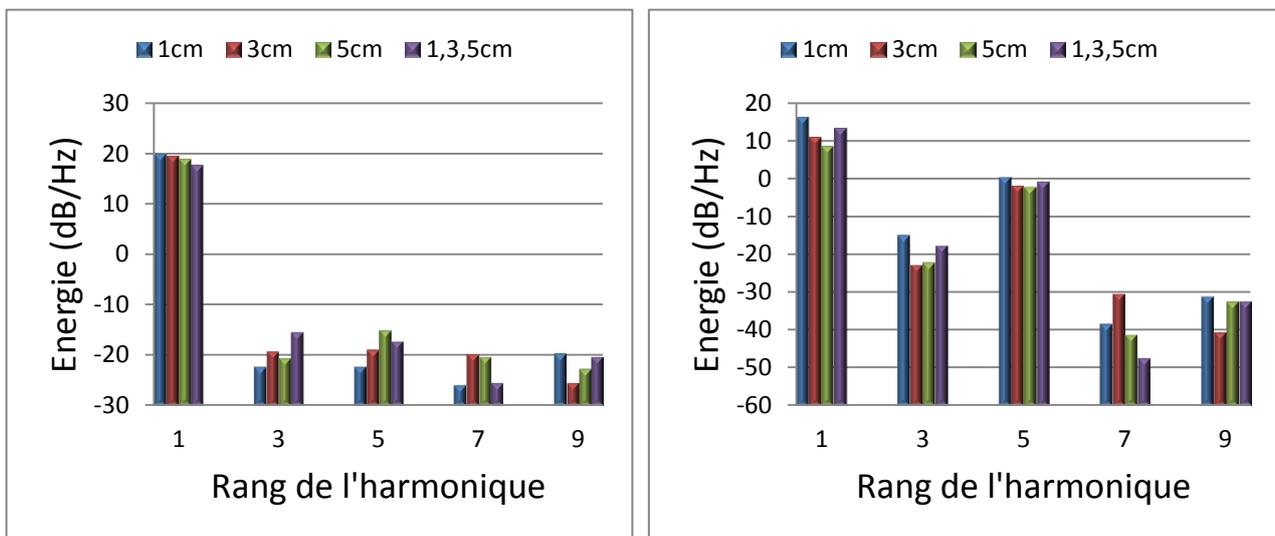


Figure. IV.17: Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à 10 kV.

IV.5.2. Tension appliquée 30 kV

Dans ce cas et pour les harmoniques de tension, nous remarquons que l'énergie du fondamental est constante pour toutes les bande propres, Le 5^{ème} harmonique possède la plus grande énergie comparativement aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème}, Le 9^{ème} harmonique a une énergie constante pour trois bande propres de 1cm, 3cm, et 5cm.

Pour les harmoniques de courant, nous remarquons que l'énergie des harmonique pour le cas de trois bandes propres 1cm et trois bandes propres 1cm,3cm et 5cm sont les plus grande par rapport ou les autres bandes propres sauf pour le 7^{ème} harmonique ou l'énergie de harmonique pour trois bandes propres de 1cm affiche une légère baisse brutale comme celle de l'harmonique de tension appliquée.

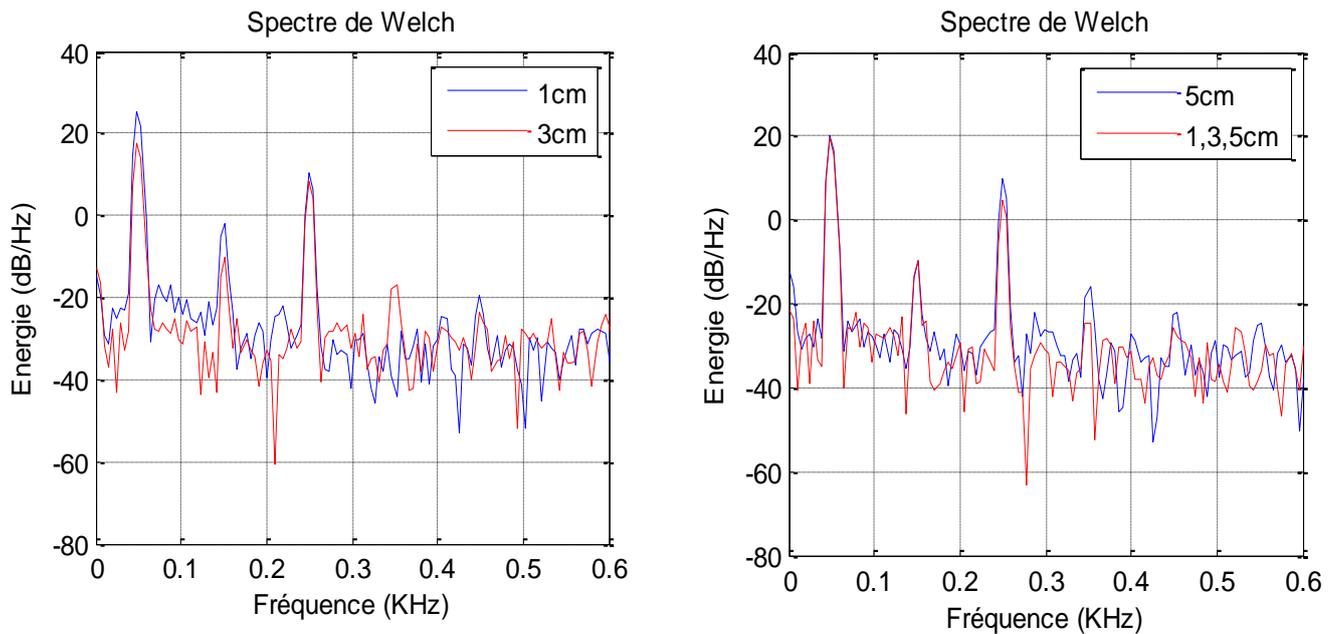


Figure. IV.18: Spectre de Welch du courant de fuite à 30 KV.

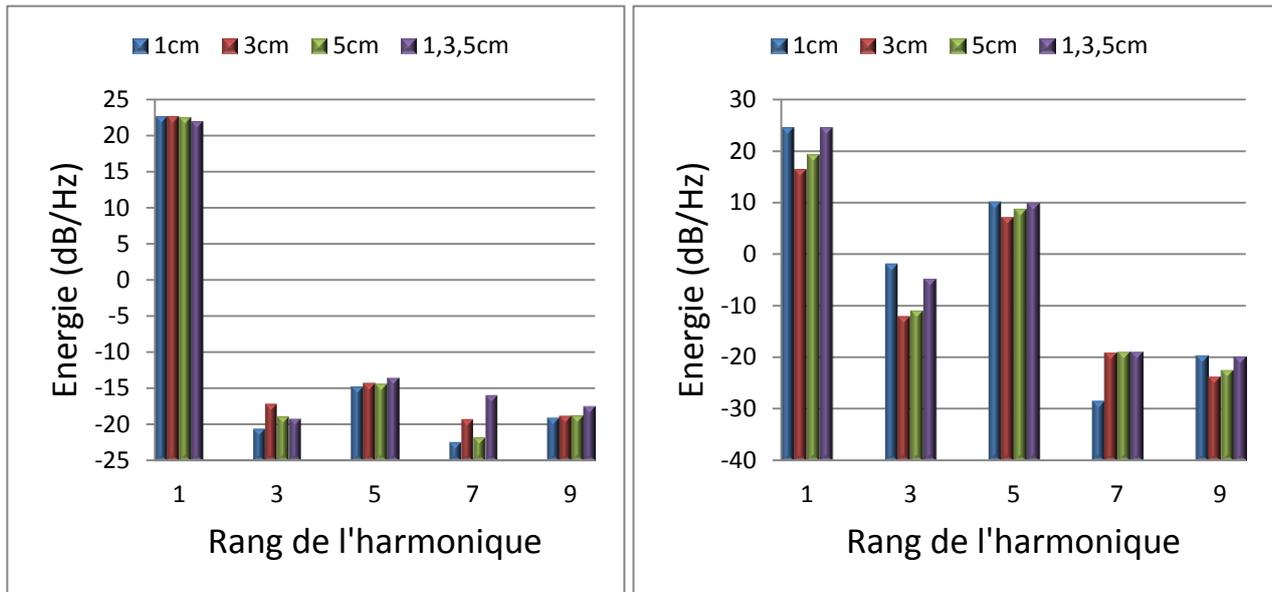


Figure. IV.19: Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) et à 30 kV.

IV.5.2. Tension appliquée 50 kV

Dans ce cas et pour les harmoniques de tension, nous remarquons que l'énergie du fondamental est constante pour toutes les bande propres, nous remarquons aussi que l'énergie des autres harmoniques varie aléatoirement pour différentes largeur des bandes propres.

Pour ce dernier palier et pour les harmoniques de courant de fuite Nous remarquons que l'énergies de 3^{ème} harmonique pour trois bandes de largeur 1cm sont pratiquement supérieures à celles des 5^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} harmoniques pour toutes les bandes propres indiquant la présence des décharges électrique à la surface de l'isolateur plan.

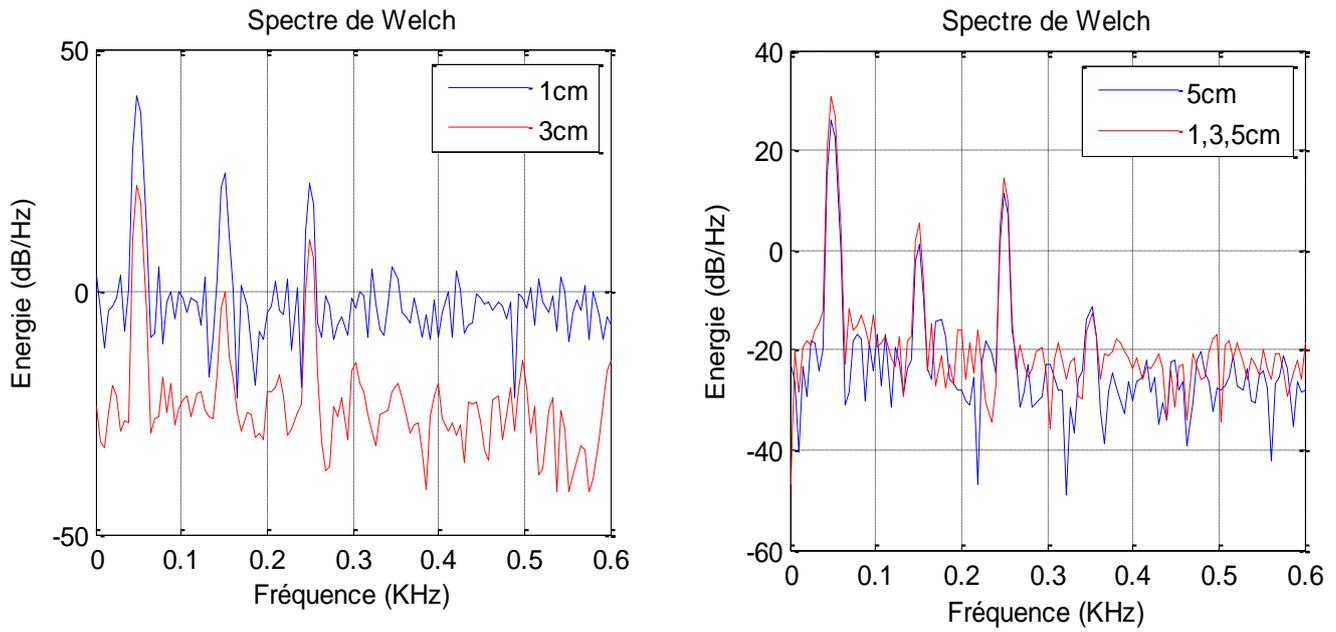


Figure. IV.20: Spectre de Welch du courant de fuite à 50 kV.

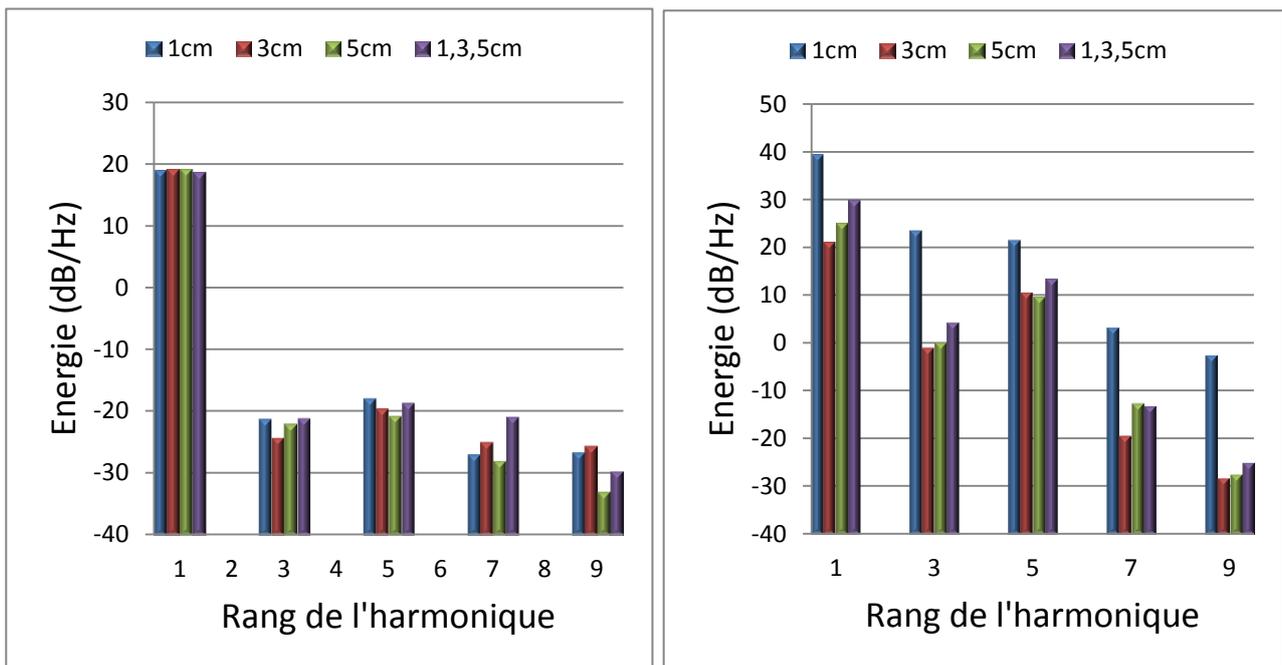


Figure. IV.21: Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à 50 kV.

IV.6. Etude d'harmoniques pour la pollution non-uniforme en fonction de types de sable

IV.6.1. Tension appliquée 10 kV

Dans ce cas et pour les harmoniques de tension, nous remarquons que l'énergie du fondamental est constante pour toutes les types de sable, les harmoniques du sable de sol affichent les plus grande énergie pour 5^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} harmonique, Le 5^{ème} harmonique possède la plus grande énergie comparativement aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème}.

Pour le courant de fuite, nous remarquons que l'énergie du fondamental est élevée pour le sable de mer et le sable de sol, La 5^{ème} harmonique affiche la plus grande énergie par rapport aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} ce qui explique les distorsions observées sur le signal du courant, l'énergie des 7^{ème} et 9^{ème} harmoniques sont plus grande pour le sable de sol et avec le sable de mer et faible avec le sable des dunes.

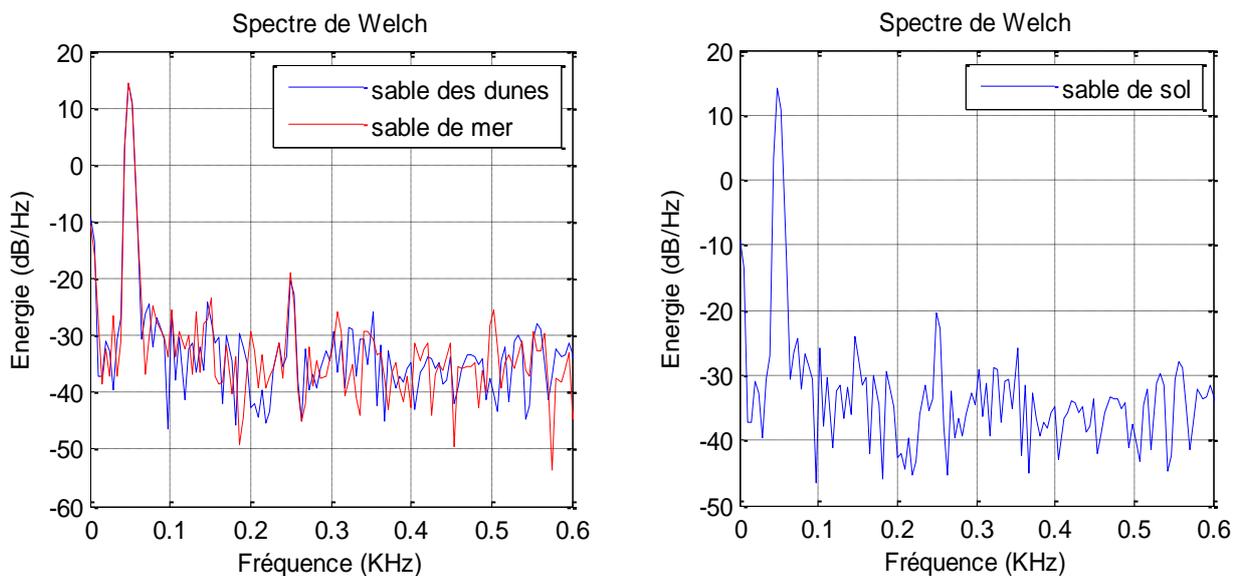


Figure. IV.22: Spectre de Welch de la tension à 10 kV.

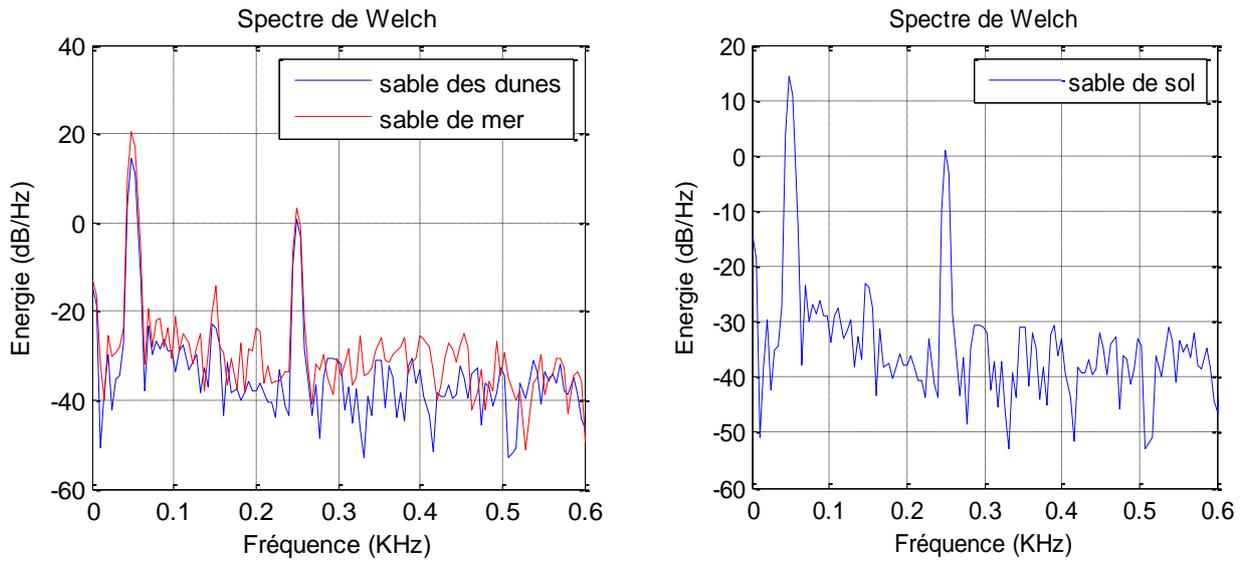


Figure. IV.23: Spectre de Welch du courant de fuite à 10kV.

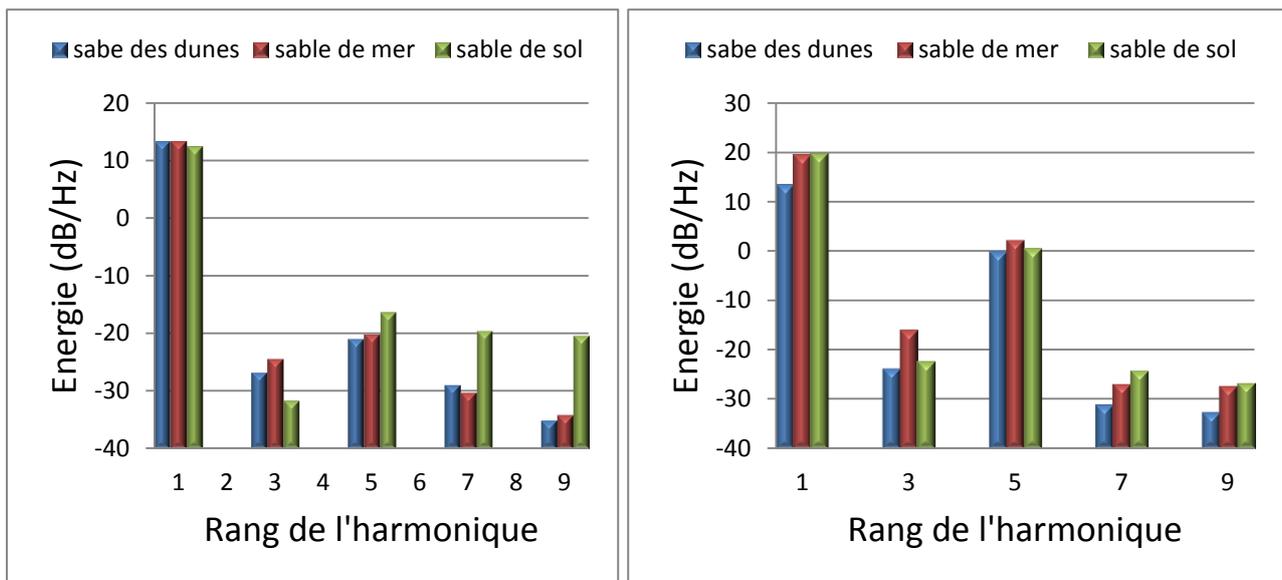


Figure. IV.24: Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à 10 kV.

IV.6.2. Tension appliquée 15 kV

Pour la tension, nous remarquons que l'énergie du fondamental est constante pour tous les types de sable, pour les autres rangs des harmoniques, nous remarquons que l'énergie pour le sable de mer plus grande par rapport aux autres types de sable sauf pour le 7^{ème} harmonique. La 5^{ème} harmonique est toujours dominant par rapport aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} harmoniques.

Pour le courant de fuite, nous remarquons que l'énergie des harmoniques pour le sable de la mer est toujours élevée pour tout les rangs des harmoniques, les énergies pour le sable de sol et le sable des dunes sont toujours faible, la 5^{ème} harmonique est toujours dominant par rapport aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} harmoniques.

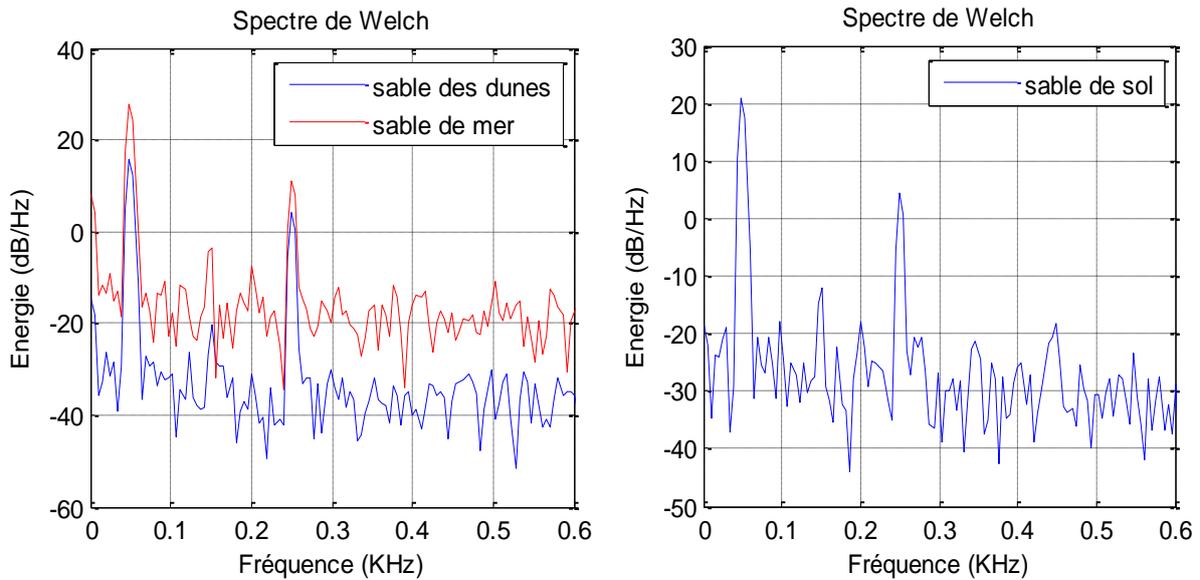


Figure. IV.25: Spectre de Welch du courant de fuite à 15 kV.

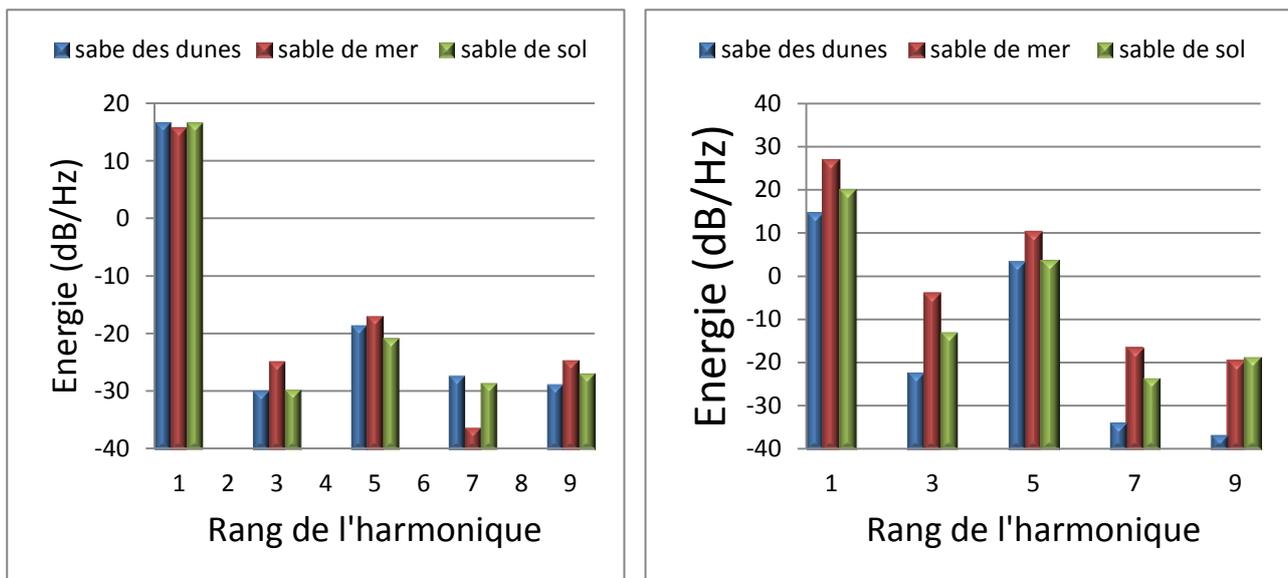


Figure. IV.26: Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) et à 15 kV.

IV.6.3. Tension appliquée 20 kV

Pour ce cas de figure et pour l'énergie des harmoniques de tension, nous constatons que l'énergie du fondamental est constante pour les type de sable, pour les autres rangs des harmoniques nous remarquons que l'énergie pour le sable de mer et le sable des dunes varie aléatoirement et l'énergie pour pollution avec le sable de sol est toujours faibles.

Pour le courant de fuite, nous remarquons que l'énergie des harmoniques pour le sable de la mer est toujours élevée pour tout les rangs des harmoniques, cette élévation est marquée par l'amorçage des décharges parallèles sur la surface d'isolateur. Les énergies pour le sable de sol et des dunes sont toujours faibles. La 5^{ème} harmonique est toujours dominant par rapport aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} harmoniques.

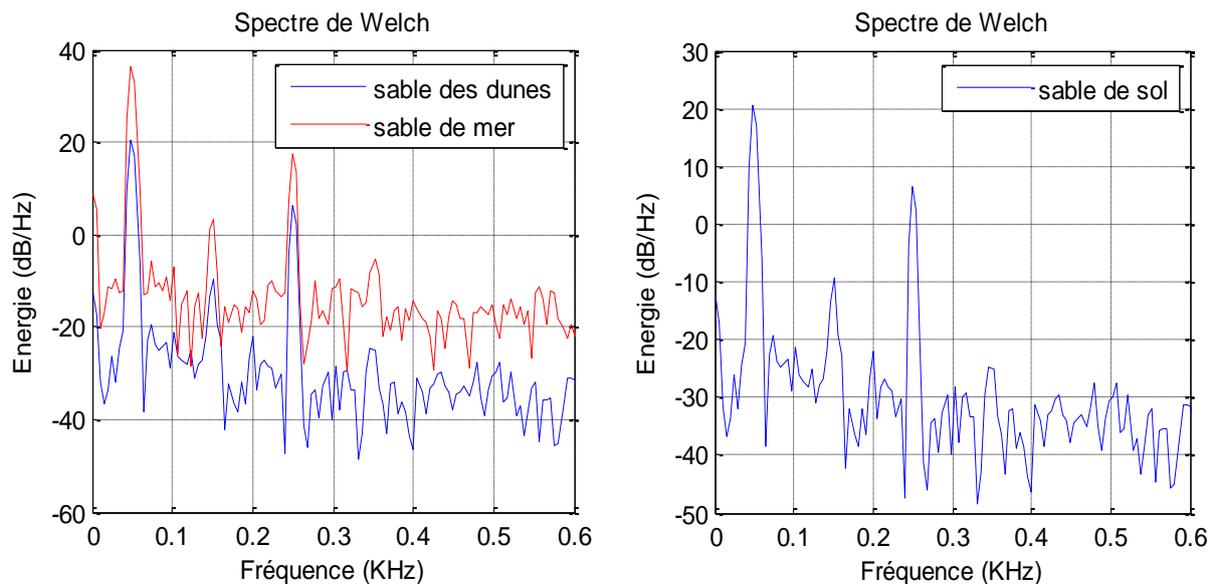


Figure. IV.27: Spectre de Welch du courant de fuite à 20kV.

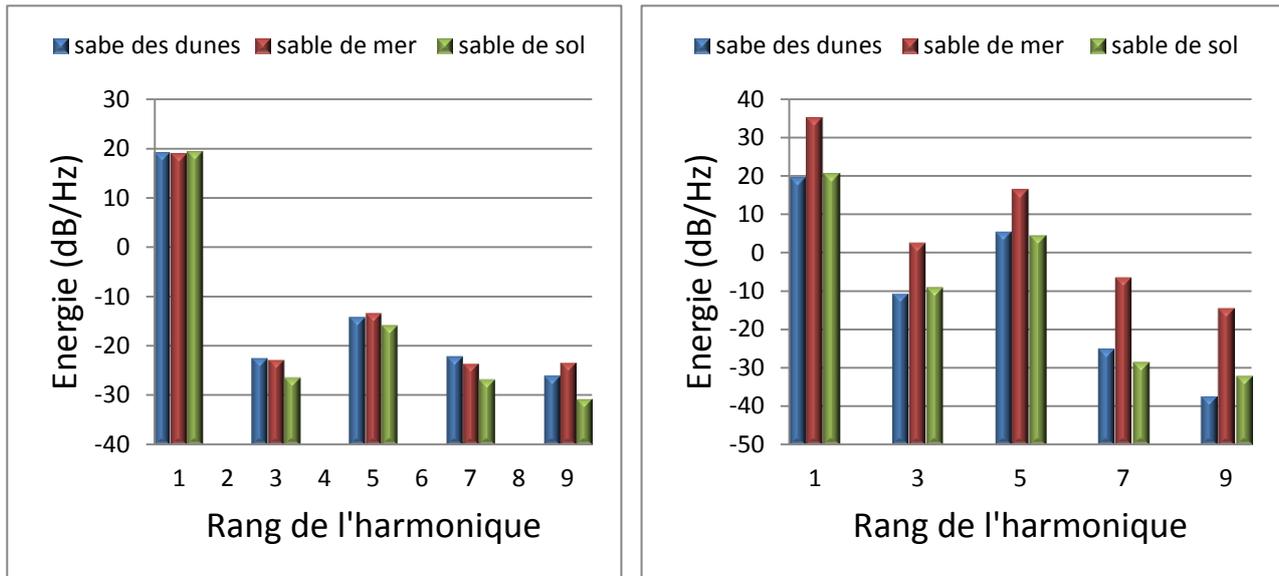


Figure. IV.28: Energie des harmoniques de tension (à gauche) et du courant de fuite (à droite) à 20 kV.

Conclusion

La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité de surface contaminée (augmentation du nombre de pulvérisation), et avec l'élargissement des couches polluées ou bien la réduction de la largeur des bandes propres.

La formation d'arcs contournant dans la zone sèche a eu lieu avant le contournement pour les largeurs de la couche sèche inférieures au tiers de la ligne de fuite, au-delà de cette grandeur, le contournement se fait directement.

L'occurrence des décharges électriques dans les zones sèches à la surface de l'isolateur, est détectée par l'augmentation des énergies du 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques par rapport à ceux de rang supérieur.

Nous avons aussi pu constater que l'occurrence des décharges électriques accentue la distorsion de courant de fuite, 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'amorçage des décharges électriques pour les grands niveaux de tension cause une augmentation brusque de l'amplitude du courant de fuite qui a pour effet d'amplifier de façon significative l'énergie du 3^{ème} et 5^{ème} harmoniques.

La 5^{ème} harmonique est toujours dominante par rapport aux 3^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème}, lorsque l'énergie du 3^{ème} harmonique est très élevée et proche de celle du fondamental le contournement de l'isolateur est imminent.

A partir de cette étude, nous avons conclu que le modèle plan avec trois bandes propres de largeur 3cm est le plus rigide par rapport aux autres modèles. Le modèle d'isolateur réel **F 160D/146 DC** est formellement déconseillé dans les régions littorales.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Dans le but de diagnostic l'état de surface d'un isolateur à partir du signal de courant de fuite, nous avons effectué des travaux expérimentaux sur un modèle plan inspiré de la forme géométrique du même isolateur réel type «**F 160D/146 DC**».

Dans un premier temps, l'étude de la tension de contournement pour le nombre de pulvérisation révèle que l'augmentation de nombre de pulvérisation fait diminuer la tension de contournement. La tension de contournement est importante pour la largeur de bande propre 3cm et faible pour le cas de largeur des bandes propres 1, 3 ,5 cm successives. et en fin nous constatons que la tension de contournement est plus importante pour le sable des dunes et plus faible pour le sable de la mer.

Les observations des décharges parallèles par le caméscope permettent de constater que leur nombre augmente jusqu'à certain seuil de tension puis diminue par la suite, laissant une seule décharge qui se progresse jusqu'au contournement total.

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 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques.

L'amorçage des décharges parallèles contribue à l'assèchement de la couche conductrice à cause d'une élévation significative de l'énergie de la 1ère, 3ème et 5ème harmonique. 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.

Nous avons aussi pu constater que l'occurrence des décharges électriques accentue la distorsion de courant de fuite, 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.

A partir de cette étude, nous avons conclu que le modèle plan avec trois bandes propres de largeur 3cm est le plus rigide par rapport aux autres modèles. Le modèle d'isolateur réel

F 160D/146 DC est formellement déconseillé dans les régions littorales.

Le travail élaboré dans notre étude, laisse les portes ouvertes devant d'éventuel recherche future. Ainsi, nous proposons nos perspectives de recherche sure :

- ✚ Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée par les ondelettes.
- ✚ Modélisation de courant de fuite et tension de contournement par la méthode de régression multiple.

Références

Bibliographiques

- [1] M. Soufi and M. Zemirline, *Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz*. Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique , ENP-2004.
- [2] George G. Karady, *Electric Transmission Line Flashover Prediction System*. Ph.D, Thesis and Final Report. 2001.
- [3] M.Teguar, *Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Electrique sur des Isolateurs Installé en Régions Polluées*. Thèse de Magister Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juillet 1993.
- [4] J.L.Rafnoumanana, *Modélisation par la Méthode des Equations Intégrales de Frontière de Phénomènes de Conduction Surfaiques sur les Isolateurs Pollués*. Thèse de Doctorat d'état, Ecole Centrale de Lyon, Mai 1992.
- [5] F. Rizk, *Mathematical Models for Pollution Flashover*. Electra, Vol. 78, pp. 71.
- [6] A.S.A.Farag, F.M.Zedan T.Cheng, *Analytical Studies of HV Insulators in Saudi Arabia Theoretical Aspects*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28 N°3, pp. 379-392, June 1993.
- [7] A.Mekhaldi, *Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electriquesur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz*, Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 1999.
- [8] M.Teguar, *Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres électrogéométriques*, Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Avril 2003.
- [9] A.K.Mujundar, N.Vasudev, K.N.Ravi Channakeshava, *Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber*, Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout –1 September 1995.
- [10] J.Danis, *A stohastic pollution Flashover model*. rapport 46-12-ATHnes-grece, 1986

- [11] H. Terrab, A. El-Hag, and A. Bayadi, *Characterization of leakage current on the surface of porcelain insulator under contaminated conditions*. in Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2015 4th International Conference on, 2015, pp. 1–4.
- [12] R. Boudissa, A. Bayadi, and R. Baersch, AC performance of silicone and glass barriers in clean and polluted atmosphere, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 108, pp. 170–177, 2014.
- [13] A. J. Phillips, D. J. Childs, and H. M. Schneider, Aging of nonceramic insulators due to corona from water drops, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 14, no. 3, pp. 1081–1089, 1999.
- [14] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao, K. Izumi, Y. Kubota and M.Sakata, *Survey on the use of no-ceramic composite insulators*. IEEE Trans. on Dielec. And Electr. Insul., Vol. 6, No. 5, pp. 548-556, October 1999.
- [15] R. S. Gorur, H. M. Schneider, J. Cartwright, Y. Beausajour, K. Kondo, S. Gubanski, R. Hartings, M. Shah, J. McBride, C. de Turreil, Z. Szilagyi, *Surface resistance measurements on non-ceramic insulators*. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 5, pp. 801-805, October 2001.
- [16] Yong Liu, B. X. Du, *Recurrent plot analysis of leakage current on flashover performance of rime-iced composite insulator*, IEEE Trans. on Dielec. And Electr. Insul., Vol. 17, No. 2, pp. 465–472, April 2010.
- [17] M. Benidir, *Théorie et traitement du signal*, Dunod, 2004.
- [18] Tahar NEFFATI, *TRAITEMENT DU SIGNAL ANALOGIQUE*. 32 rue bargue, paris, 1999.
- [19] Olivier Sentieys, *Signaux et Systèmes Discrets*. ENSSAT-Université de Rennes 1, 22 février 2006.
- [20] James L. Crowley et Antoine Roueff, *Filtrage et traitement du signal*. 2001.
- [21] G. Dauphin, *Notes de cours Traitement du signal*. paris, 2013.
- [22] Francis cottet et al, *AIDE-MEMOIRE TRAITEMENT DU SIGNAL*. dunod, paris, 2005.
- [23] A. I. zaye. John J. benedetto, *Applied and numerical harmonic analysis*. United states of america, 2003.

- [24] G. CHAGNON, *Cours de Génie Electrique*. Université Paris VI-Jussieu; CFA Mecavenir, 2001.
- [25] P.Brault, *traitement du signal*. Département mesures physique IUT d'Orsay, 1999.
- [26] B.M'hamdi, M.Teguar and A.Mekhaldi, *Potentiel and electric Field distribution on HV Insulators string Used in the 400Kv novel transmission line in algeria*. IEEE International conerence on solid dielectrics,Bologna, Italy, June 30-July4,2013.
- [27] M.PVERMA, H.NIKLASCH, HEISE, H.SCHREIBER et G.FLUXA, *critère de contournement par pollution et ses applications pour dimensionnement et le contrôle de l'isolation*.

