

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche



Scientifique

Université d'El Oued

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Génie Electrique



# Mémoire de Master Académique

En Génie Electrique

Spécialité: Electrotechnique

Option: Réseaux électrique

## Thème

# Amélioration des performances d'isolation extérieure de l'isolateur composite

**Présenté par:**

BAHA Zakaria

BESSEI Abdedjabbar

**Encadré par:**

Dr.GUIATalal

Promotion:2022 /2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **REMERCIEMENTS**

C'est avec un réel plaisir que nous réservons ces lignes en signe de gratitude et de profonde reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à

la réalisation et à l'aboutissement de ce travail.

Avant tout, nous remercions **Dieu** tout puissant pour m'avoir aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tiens tout d'abord à remercier : **Dr. QUIA Talal** qui est eu

l'amabilité de nous encadrer pour la réalisation de ce travail

Et qui dirigé ce travail depuis les premiers instants .

Nous la remercions pour son sérieux et ses efforts Afin de nous aider, de nous conseiller et de nous orienter.

Je remercie de même tous les enseignants de notre département qui

ont énormément contribué à nous formation .

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont

participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



***Dédicaces***

**Je dédie ce modeste travail**

**A celle qui m'a ouvert les portails et m'a donné la  
tendresse et le courage**

**A celle qui endeuillée pour me rendre heureuse**

**A celle qui attend chaleureusement ce jour:**

**«Ma chère Mère»**

**A celui qui a fait des grands efforts pour mon bonheur**

**A celui qui a rêvé de voir cette journée**

**A celui qui m'a orienté et m'a pris les secrets de la vie**

**« Mon Père »**

**" A mes frères et A mes soeurs "**

**A tous les tantes et mon oncle dans la vie éternelle Aussi**

**A tous mes amis, mes merveilleux frères et sœurs**

**A tous ceux m'ont aidé de prêt ou de loin.**

**A tous les êtres chers**

**BAHA Zakaria**



## ***Dédicaces***

**En cet honorable lieu, d'un simple geste tracé par écrit, mais qui jaillie du profond**

**Sentiment de reconnaissance, permettez-moi de citer les noms comme un  
mémoire pour ceux**

**Quintuneplaceparticulière:**

**A mon très cher père A ma très chère mère**

**A mes frères et sœurs**

**A tous mes cousins sans exception**

**A toute ma famille.**

**A tous mes ami(e) s sans exception.**

**Atous;jedédiecetouvrage,quiestlesensdemesétudessupérieurs,telunprésentdu  
cœur,enpriantALLAHtoutpuissantàlemettreauservicedenotrenationetdubiende**

**L'humanité, et qu'il sera une lumière sur mon parcours professionnel.**

**BESSEI Abdedjabbar**



## الملخص

يمثل العازل عصب حساس في عملية نقل الكهرباء ومن أهم المشاكل التي تظهر على مستوى العوازل التلوث وتيار التسرب وظاهرة الالتفاف 'من الواجب معرفة طرق لتحسين وتفادي هذه الظاهرة لزيادة قوة الشبكة الكهربائية و موثوقيتها 'يوفر هذا العمل حلا لتحسين أداء العوازل من خلال دراسة تأثير نوع سطح العازل ونمط التلوث.

**كلمات مفتاحية :** العازل- التلوث- تيار التسرب- ظاهرة الالتفاف - طرق تحسين - الشبكة الكهربائية- سطح العازل .

## Résumé

L'isolateur joue un rôle essentiel dans le processus de Transport de l'électricité, et parmi les problèmes majeurs auxquels les isolants sont confrontés, on trouve la pollution, le courant de fuite et la tension de contournement. Il est impératif de connaître des méthodes visant à améliorer et à éviter ces phénomènes afin d'accroître la puissance et la fiabilité du réseau électrique. Cette étude propose une solution pour améliorer les performances des isolants en étudiant l'impact du type de surface de l'isolant et du motif de pollution.

**Mots clés :** L'isolateur - pollution - courant de fuite - phénomène de contournement - méthodes d'amélioration -réseau électrique- surface de l'isolant.

## Abstract

The insulator plays a crucial role in the process of electricity transmission, and among the major problems faced by insulators, we find pollution, leakage current, and breakdown voltage. It is imperative to know methods aimed at improving and avoiding these phenomena in order to increase the power and reliability of the network. This study proposes a solution to enhance the performance of insulators by studying the impact of the surface type of the insulator and the pattern of pollution.

**Keywords:** The insulator - pollution - leakage current - flashover phenomenon - improvement methods - electrical grid- insulator surface.

Liste des figures

Chapitre I

**Figure I.1.** Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre..... 4

**Figure I.2.** Isolateur capot et tige.....5

**Figure I.3.** Isolateur capot et tige de profil standard.....6

**Figure I.4.** Isolateur capot et tige de profil plat.....7

**Figure I.5.** Isolateur capot et tige de profil sphérique.....7

**Figure I.6.** Profil antibrouillard ; forme A.....8

**Figure I.7.** Profil antibrouillard ; forme B.....9

**Figure I.8.** Isolateur à log fût.....10

**Figure I.9.** isolateur en céramique.....12

**Figure I.10.** Isolateurs en matériaux synthétiques.....13

Chapitre II

**Figure II.1.** Isolateur réel (à gauche) et son modèle (à droite).....20

**Figure II.2.** Formes d'ondes des courants de fuite du modèle.....21

**Figure II.3.** formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel.....21

**Figure II.4.** Dispositif expérimental.....22

**Figure II.5.** Evolution du rapport des harmoniques d'ordres 3 et 5 par rapport à celui du fondamental du signal du courant de fuite.....23

**Figure II.6.** Isolateurs testés.....24

**Figure II.7.** Variation de l'amplitude des harmoniques du courant de fuite pour différents taux d'humidités et différents niveaux de contaminations..... 25

**Figure II.8.** Photographie et schéma d'un échantillon SIR 11 Kv.....26

**Figure II.9.** Montage expérimental.....26

<b>Figure II.10.</b> Signaux obtenus (représentations temporelles et fréquentielles) des DP à 0.08 ESDD : (a) 60%RH, (b) 70%RH, (c) 80%RH, (d) 90%RH, (e) 100%RH.....	27
<b>Figure II.11.</b> Signaux obtenus (représentations temporelles et fréquentielles) des DP pour RH=100% : (a) 0.06 ESDD, (b) 0.08 ESDD, (c) 0.12 ESDD, (d) 0.25 ESDD.....	28
<b>Figure II.12.</b> Exemples d'agencements de circuits d'essai. Colonne isolante à l'extrémité d'un jeu de barres (a) avec et (b) sans BS ; colonne d'isolateur au milieu d'un jeu de barres (c) sans BS et section d'isolateur sans BS (d).....	29
<b>Figure II.13.</b> Images UV pour un isolateur de type multi conique de 800 kV, de fabricant B, sous 885 kV, pluie artificielle de 5 mm/min. (a) sans booster sheds (BS) ; (b) 6 BS : sheds 2, 9, 14, 21, 28 et 35 ; (c) 5 BS : sheds 2, 9, 14, 21 et 28 ; (d) 4 BS : sheds 2, 9, 14 et 21 ; (e) 3 BS : sheds 2, 9 et 14. Le gain de la caméra UV et sa distance par rapport à l'isolateur sont restés constants pendant les tests.....	31
<b>Figure II.14.</b> Dessin schématique des configurations de BS sur la colonne isolante du fabricant "A" (a) et du fabricant "B" (b).....	31
<b>Figure II.15.</b> Échantillons d'isolateurs en céramique à broche et poteau (a) Non revêtus (b) Revêtus de RTV.....	32
<b>Figure II.16.</b> Les isolateurs à broches de type post ont été installés à la sous-station de Pangandaran.....	33
<b>Figure II.17.</b> Échantillons d'isolants de type tige sur la côte de Ketewel.....	33
<b>Figure II. 18.</b> Formes d'onde LC typiques pour isolant pollué par du sel de kaolin pollution sous brouillard propre à la tension appliquée (a) 10 kV, (b) 40 kV et (c)60 Kv.....	35
<b>Figure II. 19.</b> Profil des gouttelettes d'eau et angle de contact pour les isolants sans revêtement et revêtus RTV.....	36
<b>Figure II. 20.</b> Intensité corona des isolateurs à tige installés sur la côte de Ketewel zone à Bali (a) phase R (sans revêtement) et (b) phase T (avec revêtement).....	37
<b>Figure II. 21.</b> Image de température infrarouge pour (a) un isolateur non revêtu et (b) un isolateur revêtu à la côte de Ketewel.....	37
<b>Figure II.22.</b> Distribution de la résistance de surface des sheds le long de l'isolateur.....	39

**Figure II.23.** Activités de décharge.....40

### Chapitre III

**Figure III.1.** Oscilloscope numérique.....42

**Figure III.2.** Photo du pupitre de commande du laboratoire de haute tension de l'université d'El Oued.....43

**Figure III.3.** Circuit d'essai à fréquence industrielle.44.....

**Figure III.4.** Photo du circuit d'essai à fréquence industrielle.....45

**Figure III.5.**Échantillon conventionnel non texturé .46.....

**Figure III.6.** (A)échantillon conventionnel non texturé, et (B) exemple d'intersections carrées...47

**Figure III.7.** Instrument de mesure pour les conditions atmosphériques (Humidité, température et pression).....48

**Figure III.8.** Photo réel de contournement des déférentes configurations sèche ,configuration A .....50

**Figure III. 9.** Photo réel de contournement des déférentes configurations avec liquide ,configuration A .....51

**Figure III. 10.** Histogramme la variation de tension de contournement en configuration A .....52

**Figure III. 11.**Photo réel de contournement des déférentes configurations sèche ,configurationB.....53

**Figure III. 12.** Photo réel de contournement des déférentes configurations avec liquide ,configuration B .....53

**Figure III.13.** Histogramme la variation de tension de contournement en configuration B .....54

**Figure III.14.**Histogramme pour comparer la tension de contournement entre configuration A et configuration B.....55

**Figure III.15.** Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 5 KV sèche.....56

<b>Figure III.16.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 10 KV sèche .....	57
<b>Figure III.17.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 15 KV sèche .57.....	
<b>Figure III.18.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 20 KV sèche.....	58
<b>Figure III.19.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 3 KV avec pollué .....	59
<b>Figure III.20.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 7 KV avec pollué .....	59
<b>Figure III.21.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 10 KV avec pollué .60 .....	
<b>Figure III.22.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 5 KV sèche .....	61
<b>Figure III.23.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 10 KV sèche .....	61
<b>Figure III.24.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 15 KV sèche .....	62
<b>Figure III.25.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 20 KV sèche .....	62
<b>Figure III.26.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 3KV avec pollué .....	63
<b>Figure III.27.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 7 KV avec pollué .....	63
<b>Figure III.28.</b> Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 10 KV avec pollué.....	64

## Listes des abréviations et des symboles

**CIGRE:** Conférence International des Grands Réseaux Electriques.

**SIR:** Silicon Rubber.

**ESDD:** Equivalent Salt Deposit Density.

**Lc :** Ligne de contournement.

$$K_{5/3} = \frac{\text{Amplitude de l'harmonique 5}}{\text{Amplitude de l'harmonique 3}}$$

**RH:** Humidités Relatives de l'air.

**DP:** Décharges Partielles.

**β:** le paramètre de forme.

**HT:** Haute Tension.

**BS :** Booster Sheds.

**UV :** Les rayons ultraviolets.

**UD :** Un balanced Distribution.

**PT. PLN:** La société d'électricité d'État indonésienne.

**RTV:** Room Temperature Vulcanizing.

**GPIB:** General Pur pose Interface Bus.

**DHT:** Distortion Harmonique Totale

**Liste des Tableaux**

**Chapitre II**

**Tableau II.1.** Caractéristiques des isolateurs..... 23

**Chapitre III**

**Tableau III.1** Variation de tension du contournement configuration A..... 50

**Tableau III.2.** Variation de tension du contournement configuration B.....52

---



---

## Sommaire

Résumé.....	I
Liste des figures.....	II
Listes des abréviations et des symboles.....	VII
Liste des Tableaux.....	VIII
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>

### Chapitre I: Les isolateurs de haute tension

I.1. Introduction.....	3
I.2. Isolateur de haute tension.....	3
I.2.1. Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	3
I.2.2. Types d'isolateurs .....	4
I.2.2.1. Isolateurs de type rigide.....	4
I.2.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.....	5
I.2.2.3. Isolateur capot et tige.....	5
I.2.2.4. Profils des isolateurs capot et tige.....	6
I.2.2.5. Isolateur à long fût.....	9
I.3. Choix des isolateurs.....	10
I.4. Matériaux isolants .....	11
I.4.1. Céramique.....	11
I.4.2. Verres.....	12
I.4.2.1. Le verre trempé.....	12
I.4.2.2. Le verre recuit.....	13
I.4.2.3. Matériaux synthétiques (composites).....	13
I.5. Vieillissement des isolateurs.....	14
I.5.1. Vieillissement thermique.....	14
I.5.2. Vieillissement Electrochimique.....	14
I.6. Défauts des isolateurs.....	14
I.6.1. Défauts électriques.....	15
I.6.2. Défauts mécaniques.....	16
I.6.3. Défauts dus à la manipulation .....	16

I.7.	Pollution des isolateurs.....	16
I.7.1.	Types de pollution.....	17
I.7.1.1.	Pollution naturelle.....	17
I.7.1.2.	Pollution marine.....	17
I.7.1.3.	Pollution désertique.....	17
I.7.1.4.	Pollution industrielle.....	17
I.7.1.5.	Pollution mixte.....	18
I.7.2.	Conséquences de la pollution.....	18
I.8.	Conclusion.....	18

## **Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques**

II.1.	Introduction.....	19
II.2.	Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques.....	19
II.2.1.	Définition de optimisation des performances des isolateurs haute tension.....	19
II.2.2.	Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère.....	19
II.2.3.	Analyse temporelle et fréquentielle du signal du courant de fuite d'un isolateur recouvert de glace.....	22
II.2.4.	Détermination de la probabilité d'occurrence d'un contournement des isolateurs composites en utilisant les composantes harmoniques du signal du courant de fuite.....	23
II.2.5.	Analyse des décharges partielles pour le diagnostic de l'état de surface des isolateurs en polymères.....	25
II.2.6.	L'utilisation de Booster Sheds pour améliorer la Performances des isolateurs de type multicône 800 kV sous une pluie battante.....	28
II.2.7.	Amélioration des performances des isolateurs extérieurs installés dans les zones côtières à l'aide d'un revêtement en caoutchouc de silicone.....	32
II.2.8.	Amélioration des performances de la tension de contournement en présence de pollution des isolateurs cylindriques en porcelaine.....	38
II.3.	Conclusion.....	40

## **Chapitre.III. Etude et Résultats Expérimentale**

III.1.	Introduction.....	41
III.2.	Dispositif expérimental.....	41
III.2.1.	Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université d'El Oued).....	41

III.2.1.1.	Équipement de la station d'essai.....	41
III.2.1.2.	Transformateur d'essai.....	42
III.2.1.3.	Transformateur de réglage.....	42
III.2.1.4.	Oscilloscope numérique.....	42
III.2.1.5.	Pupitre de commande.....	43
III.2.1.6.	Appareils de mesure et de protection43 .....	
III.2.1.7.	Diviseur de tension.....	44
III.2.1.8.	Circuit d'essai à tension alternatif.....	44
III.3.	Mode opératoire.....	45
III.3.1.	Modèle expérimental.....	45
III.3.2.	Préparation du modèle.....	46
III.3.3.	Les configurations utilisées lors des essais ont été adoptées46.....	
III.4.	Procédé d'essai.....	47
III.4.1.	Mesure de la tension de contournement.....	47
III.4.2.	Mesure du courant de fuite.....	48
III.5.	Correction atmosphérique.....	48
III.5.1.	Influence de la densité relative de l'air.....	49
III.5.2.	Influence de l'humidité.....	49
III.6.	Résultats.....	49
III.6.1.	Tension de contournement .....	50
III.6.1.1.	échantillon conventionnel non texturé .....	50
III.6.1.1.1.	Visualisations réels des arcs de contournement en laboratoire de haute tension (échantillon non texturé).....	50
III.6.1.2.	Exemple d'intersections carrées.....	52
III.6.1.2.1.	Visualisations réels des arcs de contournement en laboratoire de haute tension (échantillon texturé)53.....	
III.6.1.3.	Comparaison.....	54
III.6.2.	Courant de fuite.....	55
III.6.2.1.	échantillon conventionnel non texturé.....	56
III.6.2.2.	échantillon tissé.....	60
III.7.	Conclusion.....	64
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>66</b>
	Bibliographiques.....	67

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### Introduction Générale

Les lignes à haute et très haute tension forment le composant principal des réseaux de transport de l'énergie électrique. En dehors des conducteurs, les isolateurs constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes [1]. Par définition, les isolateurs assurent à la fois un support mécanique et électrique. En effet, ils supportent les parties portées à la haute tension et les isolent du pylône [2].

En service, les isolateurs doivent supporter aussi bien les contraintes électriques dans leurs conditions normales et anormales d'exploitation (surtensions transitoires) que les contraintes environnementales (chaleur, pluie, rayonnements ultraviolets, ...). Un bon choix et un bon dimensionnement des isolateurs s'imposent pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement haute tension. Les matériaux isolants sont parmi les facteurs prépondérants dans leur conception, de leur réalisation et de leur exploitation.

Au cours de ces dernières années, les isolateurs en polymère, ou encore isolateurs composites, ont été largement acceptés comme substituts aux isolateurs traditionnels en porcelaine ou en verre en raison des multiples avantages qu'ils offrent [3]

Les isolateurs haute tension sont constamment exposés à divers facteurs environnementaux et contaminants, y compris les substances naturelles et agricoles et les émissions industrielles, pendant leur période de service. Les isolateurs proches des régions côtières, par exemple, rencontrent sels de mer alors que ceux des zones urbaines sont soumis aux cendres, à la poussière et aux particules chimiques. Ces particules en suspension dans l'air ont tendance à se déposer et à s'accumuler à la surface de l'isolateur. Les contaminants forment une couche qui peut devenir conducteur lorsqu'il est exposé à des conditions atmosphériques humides telles que le brouillard, la brume et la bruine. La présence de polluants recouvrant la surface de l'isolateur pourrait également réduire la hydrophobicité du matériau polymère, favorisant ainsi la formation d'un film conducteur continu. Le courant de fuite résultant sous la tension du système génère un chauffage résistif qui évapore l'eau des surfaces humides, risquant formation de bandes sèches [4].

Plusieurs mesures peuvent être prises pour améliorer les performances des isolateurs haute tension. Tout d'abord, l'utilisation de matériaux innovants et plus résistants, tels que les composites, peut augmenter la résistance des isolateurs et leur durée de vie. Les entreprises peuvent également recourir à des systèmes de nettoyage automatique ou des revêtements anti-adhérents pour empêcher les contaminants de s'accumuler sur les isolateurs. Des conceptions de forme améliorées peuvent

également être utilisées pour minimiser les perturbations du champ électrique autour des isolateurs et réduire les risques d'arcs électriques. Les technologies de surveillance avancées, telles que les capteurs de vibration et de température, peuvent être utilisées pour détecter les dommages potentiels des isolateurs et permettre des interventions préventives avant que les défaillances ne se produisent. Enfin, une formation régulière et une sensibilisation accrue à la sécurité peuvent aider à réduire les risques associés aux isolateurs haute tension.

Notre objectif est d'améliorer les performances des isolateurs composites pour les tensions élevées. Afin de mener cette étude correctement, nous avons divisé notre travail en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous parlerons des isolateurs haute tension et de leurs types, ainsi que de la définition du phénomène de pollution des isolateurs haute tension et des types de pollution.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons les méthodes pour améliorer les performances des isolateurs haute tension.

Dans le troisième chapitre, nous étudierons des expériences sur deux échantillons en plastique en utilisant une surface plane traditionnelle et une surface tissée pour effectuer une comparaison.

**CHAPITRE I:**  
**LES ISOLATEURS DE**  
**HAUTE TENSION**

## **I.1. Introduction**

Pour des raisons technico-économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement sous haute tension (surtout au moyen de lignes aériennes, mais aussi de câbles souterrains). La fiabilité du transport d'énergie dépend considérablement du comportement mécanique, électrique et diélectrique à long terme des différents composants des lignes et postes. Parmi ces composants on note le rôle primordial que jouent les isolateurs. Dans la plupart des lignes électriques de haute tension les isolateurs sont menacés par le phénomène de pollution[5]. Le présent chapitre porte sur les isolateurs de haute tension, leurs différents types ainsi que les matériaux utilisés dans leur fabrication. Nous traitons ensuite le phénomène de la pollution en générale et ses conséquences néfastes sur le comportement des isolateurs.

## **I.2. Isolateur de haute tension**

L'isolateur est un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents afin d'empêcher les court-circuités, les pertes de courant et les charges d'électrocution [6].[7]

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dû surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc. [8]

### **I.2.1. Fonctionnement et constitution d'un isolateur**

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes. Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure). Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement[9].

Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants [9] :

- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique
- L'interface air - matériau diélectrique. (La longueur de l'interface constitue la ligne de fuite –ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

### I.2.2. Types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

#### I.2.2.1. Isolateurs de type rigide

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes Figure I.1. Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV, [10]. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides.

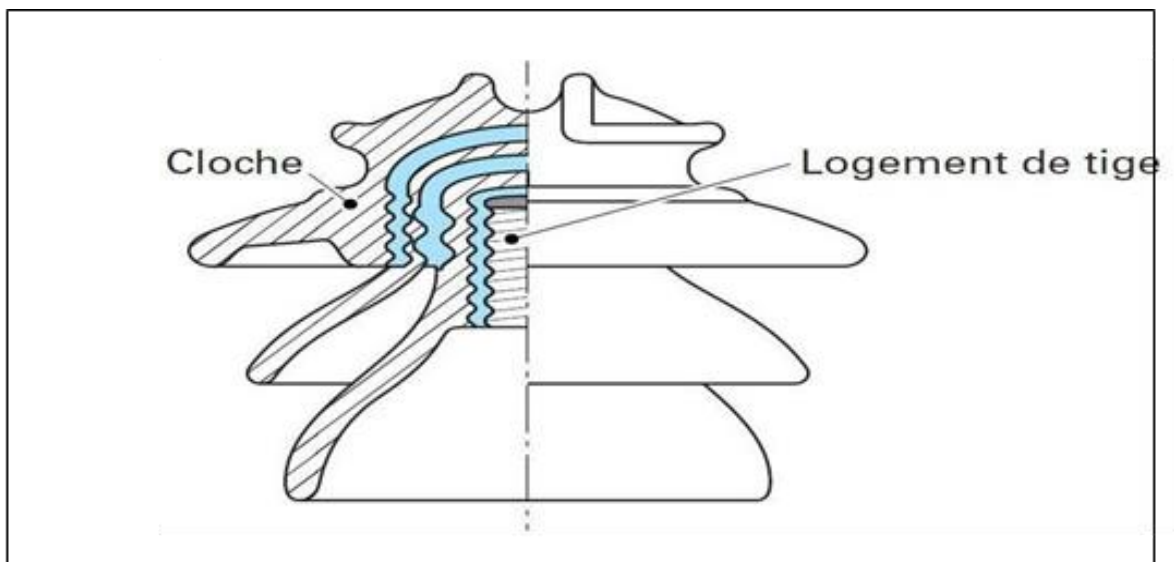


Figure I.1. Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre .

### I.2.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués du matériau isolant ainsi que d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et qui permet de donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs peut être montée sur le pylône en suspension, ou bien verticalement (chaîne d'alignement), ou encore d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage) [11]. Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne.

- L'isolateur capot et tige.
- L'isolateur long fut.

### I.2.2.3. Isolateur capot et tige

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige. La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la Figure 1.2. La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur les quels apparaissent, toute fois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement[11]. La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure I.2.

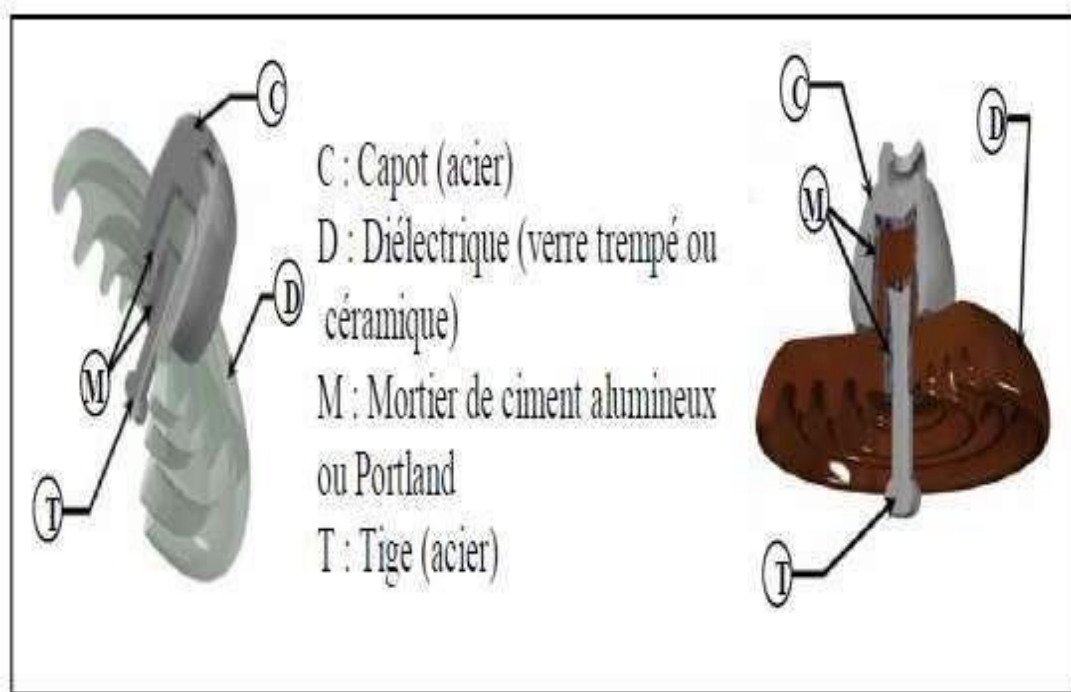


Figure I.2. Isolateur capot et tige.

#### I.2.2.4. Profils des isolateurs capot et tige

##### a. Profil standard

Ce sont les plus communs et les plus utilisés sur les lignes installées dans les zones de faible pollution, où ils se comportent bien grâce à leurs petites nervures bien espacées. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne Figure I.3 [12].



**Figure I.3.** Isolateur capot et tige de profil standard.

##### b. Profil plat

Ce type d'isolateur, de par le profil de son diélectrique totalement plat, est très recommandé pour les zones désertiques. En effet, l'absence de nervures rend difficile le dépôt de particules, en particulier sur la surface inférieure du diélectrique. De plus, sa forme facilite son « auto-nettoyage » par le vent, en permettant un flux d'air régulier et continu. Ils peuvent également être utilisés dans les zones de pollution industrielle sévère ou mixte (pollution désertique + industrielle). Figure I.4 [12].



**Figure I.4.**Isolateur capot et tige de profil plat.

*c. Profil sphérique*

L'absence de nervures sur la pièce de verre rend difficile le dépôt de particules sur la surface du diélectrique, tout en facilitant le nettoyage par le vent et la pluie. De plus, sa forme sphérique le rend plus résistant au vandalisme et le nettoyage devient facile et efficace Figure I.5 [12].



**Figure I.5.**Isolateur capot et tige de profil sphérique.

*d. Profil antibrouillard (forme A)*

Il est de conception avec un diamètre plus grand que le type de profil standard muni de deux ou trois rainures à grande profondeur.

Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire et empêche le claquage entre rainures voisines quand il y a une pollution sévère et tout le profil intérieur simplifie la maintenance [13].



**Figure I.6.** Profil antibrouillard ; forme A.

*e. Profil antibrouillard (forme B)*

Dans cette conception comme le montre la figure I.7, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières[13].



Figure I.7. Profil antibrouillard ;forme B.

#### I.2.2.5. Isolateur à long fût

Ce type peut être soit:

- ❖ Constitué d'un cylindre plein en céramique, ou en porcelaine, muni d'ailettes figure 1.8 avec une pièce métallique de liaison à chaque extrémité. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [14].
- ❖ Constitué d'un matériau synthétique dont la caractéristique principale est la bonne tenue à la pollution, le faible encombrement, la résistance au vandalisme et la légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée [14]. Ce type d'isolateurs est appelé composite, il est constitué de trois parties selon le rôle:
  - ✓ Un noyau en fibre de verre, imprégnées de résine, capable d'assurer l'isolement et de supporter les efforts mécaniques générés par les conducteurs.
  - ✓ Un revêtement en élastomère en EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère), vulcanisés à chaud qui donne le profil et précise la ligne de fuite tout en protégeant le noyau contre toute attaque des agents extérieurs en assurant l'étanchéité au raccordement avec les pièces métalliques

d'extrémités. Son profil à ailettes alternées permet d'accroître la tenue sous pollution.

Des pièces métalliques, en fonte malléable ou acier forgé galvanisé à chaud, elles sont nécessaires au montage de l'isolateur et à la transmission des efforts mécaniques [14].



Figure 1.8. Isolateur à log fût.

### I.3. Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluant le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto nettoyage. Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident:

- La sévérité de la pollution d'un site peut changer.
- L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste ,

- La construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation.

Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles ,[15].

#### **I.4. Matériaux isolants**

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages. Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [16, 17].

##### **I.4.1. Céramique**

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs installés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence la céramique à grains très fins. Souvent, on trouve la céramique dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance,...etc. [16, 18].



**Figure I.9.** isolateur en céramique

#### **I.4.2. Verres**

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile [19]. Nous trouvons deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [20].

##### **I.4.2.1. Le verre trempé**

Celui-ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 70 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation [21]. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C [21]. La couleur verte de l'isolateur en verre provient de l'oxyde de fer présent dans sa composition, si celui-ci est absent le verre est transparent [21]. Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation [22].

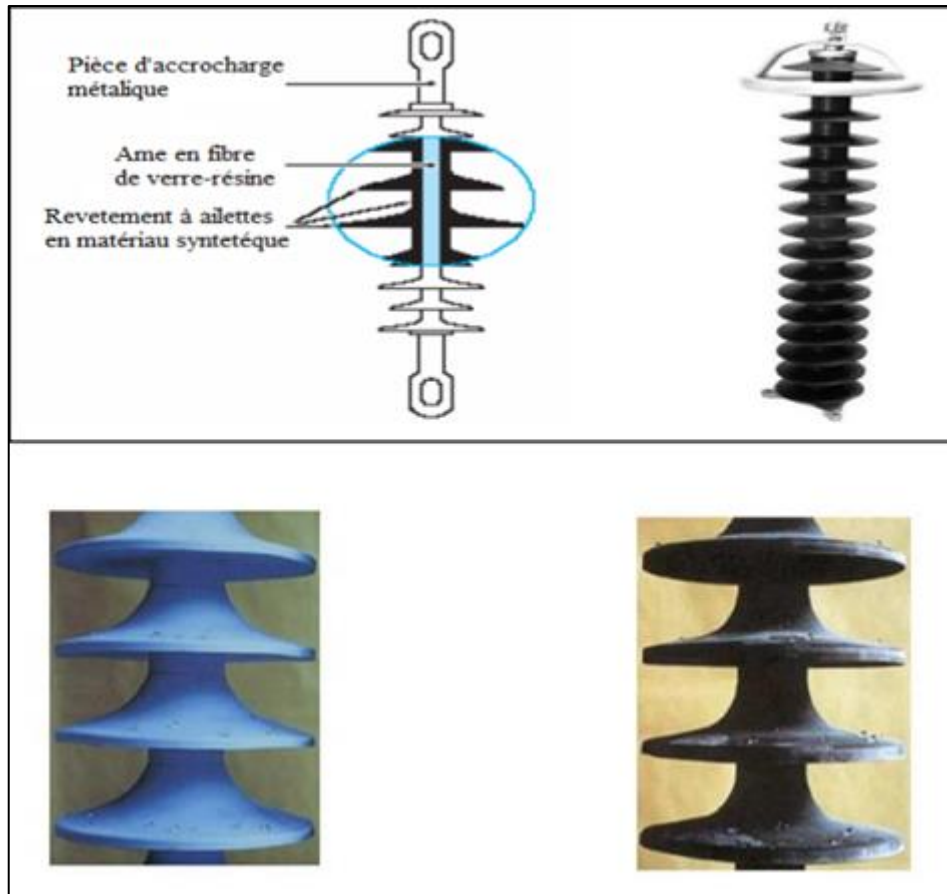
### I.4.2.2. Le verre recuit

Il a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de températures. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [22].

### I.4.2.3. Matériaux synthétiques (composites)

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique. [23]

La figure I.10 représente les isolateurs des matériaux synthétiques.



**Figure I.10.** Isolateurs en matériaux synthétiques.

## I.5. Vieillessement des isolateurs

Le vieillissement est caractérisé surtout par une dégradation des propriétés électriques, mécaniques ou chimiques (par exemple augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité ou de l'hydrophobicité). Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, les isolants vieillissent. Et selon le type de réaction produite sur le matériau composite, on distingue plusieurs types de vieillissement dont les principaux sont Le vieillissement thermique provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique.

- Le vieillissement électrochimique engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.
- Le vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles) résultant des décharges à la surface et dans les cavités surtout gazeuses enfermées dans les diélectriques. [24]

### I.5.1. Vieillessement thermique

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. Les principaux processus de vieillissement thermique sont :

- La rupture des chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques,
- Le dégagement de gaz à faible poids moléculaire,
- L'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques. [24]

### I.5.2. Vieillessement Electrochimique

Lors du processus de vieillissement électrochimique, la température du diélectrique augmente. Cette augmentation engendre non seulement une augmentation de la conductivité du matériau mais aussi une activation des réactions chimiques qui sont la cause du vieillissement. [24]

## I.6. Défauts des isolateurs

Les isolateurs composites des générations précédentes ont présenté comme principaux problèmes l'érosion, l'acheminement, la décharge de couronne...etc.

Ces problèmes ont été éliminés par le bon choix des matériaux et le développement de nouvelles techniques de fabrication. L'inconvénient des isolateurs composites est la difficulté d'identifier l'isolateur défectueux de l'isolateur sain, d'où la nécessité de développer une méthode de diagnostic pour différencier entre un isolateur défectueux et un isolateur sain [25].

On peut distinguer deux types de défauts : défauts électriques et défauts mécaniques. Ces deux types de défauts sont mutuellement dépendants.

### **I.6.1. Défauts électriques**

Le vieillissement des isolateurs est causé par les conditions climatiques auxquelles l'isolateur est exposé ainsi que son profil.

Un profil qui permet l'accumulation des agents polluants favorise l'apparition des décharges locales menant à l'érosion et par la suite au cheminement. L'effet de couronne est considéré comme agent principal de vieillissement des Isolateurs.

Cet effet se caractérise par la réduction de l'hydrophobie, la décoloration de la surface de l'isolateur ainsi que l'érosion sous l'effet des gaz de décharge.

Les gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur affectent la distribution du champ sur cette surface (la permittivité relative de l'eau est élevée ce qui augmente l'intensité du champ aux voisinages des gouttelettes), les gouttelettes se déforment dans la direction du champ.

Un excellent isolateur est caractérisé par son hydrophobicité, cette hydrophobie peut être perdue suite à l'accumulation des agents polluants sur la surface de l'isolant, ou même après avoir subi des chocs électriques (arcs locaux) ; certains isolateurs peuvent réacquérir leurs états hydrophobes après immigration des molécules de faible poids (Low Molar Weight) du centre de l'objet jusqu'à la surface [25].

Le mouillage de la surface favorise l'apparition de l'effet couronne dans les régions de forte intensité de champ, d'où la perte locale de l'hydrophobie ; une quantité de pollution se dissout et forme une couche plus ou moins conductrice, par conséquent une nouvelle distribution du champ s'établit.

Ce processus se poursuit et le chemin conducteur mouillé se développe à travers l'isolateur, par la suite le courant circulant à travers ce chemin cause l'assèchement des régions à forte densité de courant ce qui conduit au développement d'un arc local ; celui-ci provoque d'avantage de perte d'hydrophobie, d'érosion de surface et augmente l'amplitude du courant de fuite.

Dans le cas d'un isolateur en polymère, le séchage de sa surface lui permet de réacquérir ses propriétés hydrophobes.

Dans le cas des isolateurs en verre ou en porcelaine, le mécanisme de décharge est différent de celui des isolateurs en polymère, le mouillage de la pollution accumulée sur la surface des isolateurs en verre ou en porcelaine conduit à l'apparition d'un film d'eau continu, donc l'arc peut se développer directement.

Le séchage de la partie restante et l'élongation de l'arc causent le contournement de l'isolateur. Les premières étapes sont similaires à celles des SIR. De plus, la couche de pollution développée est souvent mince, ce qui limite l'intensité du courant de fuite et par la suite, la tension de contournement augment [25].

### **I.6.2. Défauts mécaniques**

Les défauts mécaniques d'un isolateur peuvent mener à des conséquences fatales. Dans le cas des isolateurs en SIR, la plupart des défauts sont d'ordre mécanique[25].

### **I.6.3. Défauts dus à la manipulation**

Les isolateurs en porcelaine peuvent être endommagés facilement mais le taux de tels endommagements est toujours faible. Les isolateurs composites ne sont pas fragiles mais marquent un taux relativement élevé d'endommagements. En effet, un nombre d'endommagements plus ou moins important a été constaté dû des manœuvres durant le transport et l'installation. Pour prendre en charge ces problèmes, le groupe CIGRE (Conférence International des Grands Réseaux Electriques) prépara un guide de manipulation qui contient des recommandations relatives aux méthodes de manipulation de ce type d'isolateurs, en commençant de l'endroit de fabrication jusqu'à sa mise sous tension [25].

## **I.7. Pollution des isolateurs**

Un isolateur placé à l'extérieur est exposé aux différents agents constituant l'atmosphère qui le contamine. Cette contamination est due à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface de l'isolateur. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs [26].

L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants de fuite sur la surface de ces isolateurs, entraîne des assèchements locaux de la couche de pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur (arcs partielles). Dans certaines conditions, ces arcs partielles peuvent se développer jusqu'à provoquer le contournement total des isolateurs, en

connectant l'extrémités sous haut tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation[26] .

### **I.7.1. Types de pollution**

#### **I.7.1.1. Pollution naturelle**

La pollution naturelle provient [27]:

- Des sels marins dans les régions côtières.
- Des poussières du sol, notamment lors de chantiers importants.
- Des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

#### **I.7.1.2. Pollution marine**

Les installations situées au bord de la mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance [27].

#### **I.7.1.3. Pollution désertique**

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur [27].

#### **I.7.1.4. Pollution industrielle**

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais ..... etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants. Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution; les gaz d'échappement des véhicules et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs [27].

**I.7.1.5. Pollution mixte**

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées au bord de mer [27].

**I.7.2. Conséquences de la pollution**

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution. On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique. Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique. La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [26].

**I.8. Conclusion**

A travers ce chapitre on conclut que pour remplir leur rôle, les matériaux isolants et les isolateurs, doivent vérifier des critères mécaniques, électriques et environnementaux. Chaque type d'isolateurs est destiné pour une isolation précise. Ainsi le choix de l'isolateur, ou le dimensionnement même de celui-ci, se fait en tenant compte des critères (contraintes) déjà mentionnés pour assurer une qualité et continuité de service, aussi réaliser un couple qualité prix optimal [28]. La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension. Pour mieux dimensionner l'isolateur, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation [29]. La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant (degré de pollution) ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante. La connaissance de ce degré de pollution est par conséquent, une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue de dimensionner convenablement l'isolation [30].

**CHAPITRE II:**

**ETUDES**

**ANTÉRIEURES SUR**

**L'AMÉLIORATION**

**DES PERFORMANCES**

**DES ISOLATEURS**

**ÉLECTRIQUES**

### **II.1. Introduction**

En présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs et des courants de fuite s'établissent à la surface des isolateurs . À partir d'une certaine intensité de ces courants, la couche conductrice s'assèche dans les zones à forte densité de courant. Il en résulte une modification de la répartition du potentiel et du champ électriques conduisant à la formation de petits arcs électriques à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs . plusieurs approches peuvent être utilisées pour améliorer les performances des isolateurs. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à quelques études dans ce domaine.

### **II.2. Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques**

#### **II.2.1. Définition de optimisation des performances des isolateurs haute tension**

Nous pouvons définir l'amélioration des performances des isolateurs haute tension comme le processus d'amélioration de leurs propriétés électriques et mécaniques pour augmenter l'efficacité la fiabilité et la sécurité des réseaux de transmission et de distribution d'énergie haute tension. Cette amélioration peut être obtenue grâce à la recherche en science des matériaux, à l'optimisation de la conception, à l'évaluation des performances en matière de pollution et à des tests dans diverses conditions. L'objectif est de s'assurer que les isolateurs haute tension peuvent résister à des conditions climatiques extrêmes, résister à la pollution, prévenir les contournements et maintenir des propriétés d'isolation électrique stables tout au long de leur durée de vie. L'optimisation peut se faire par différents moyens, tels que : Amélioration des performances des isolateurs extérieurs installés dans les zones côtières à l'aide d'un revêtement en caoutchouc de silicone[31], et amélioration des performances de la tension de contournement en présence de pollution des isolateurs cylindriques en porcelaine [32].

#### **II.2.2. Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère**

Yong Zhu et al [33] ont utilisé les informations fournies par le signal du courant de fuite pour caractériser l'état de surface d'un isolateur SIR et pour comparer les résultats obtenus avec ceux d'un modèle proposé. Le diagnostic à partir du signal du courant de fuite a été pris en considération. Cette étude a également tenu compte du comportement des décharges électriques qui ont lieu à la surface des polymères :

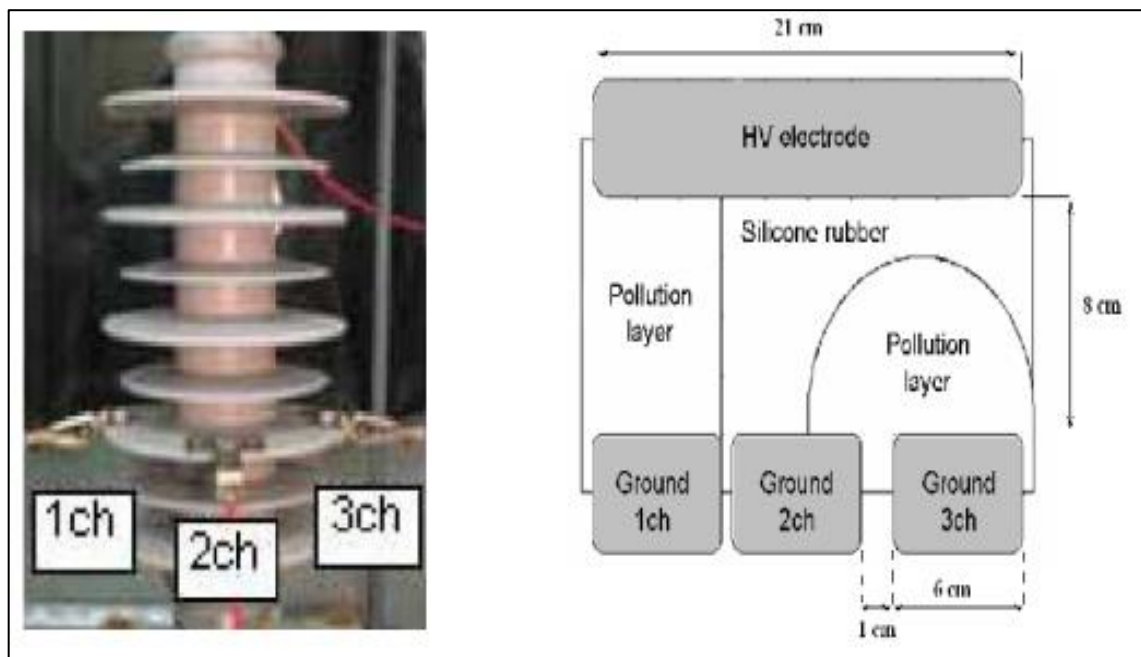
- Les arcs locaux qui surviennent dans les bandes sèches.

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

- 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 [34].

Le modèle 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 [35].

La pollution des isolateurs réels et leur modèle figure II.1 est faite avec une solution de 31 d'eau distillée qui contient 12 g/l de NaCl ; les mesures effectuées avec l'ESDD indiquent 0.03 mg/cm<sup>2</sup> pour cette solution. La pollution des surfaces est effectuée par pulvérisation. Nous utilisons une caméra pour observer le phénomène de décharge et un oscilloscope connecté à un ordinateur pour enregistrer les signaux de courant de fuite. En utilisant la méthode des éléments finis, nous évaluons également le champ électrique et identifions les zones présentant une forte intensité. [36].



**Figure II.1.** Isolateur réel (à gauche) et son modèle (à droite).

Les résultats obtenus lors de l'analyse des courants 1ch, 2ch et 3ch montrent que 1ch à 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 II.1. Les décharges observées sont causées par un champ électrique dont la valeur dépasse la rigidité diélectrique du système en question.

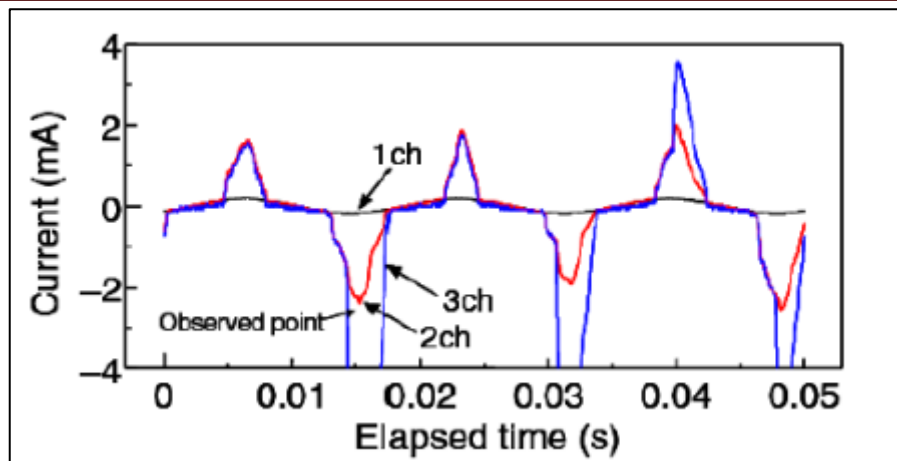


Figure II.2. Formes d'ondes des courants de fuite du modèle.

Dans le cas de l'isolateur réel, les trois signaux de courant de fuite présentent des formes distordues. Cette déformation est due à l'irrégularité du profil de l'isolateur. L'apparition d'arcs locaux provoqués par l'assèchement de certaines zones. Cette situation est causée par une distribution inégale du courant de fuite.

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 courant 2ch.
- L'apparition de la décharge entre 2ch et 3ch après 1ms augmente les amplitudes des courants 2ch et 3ch[36].

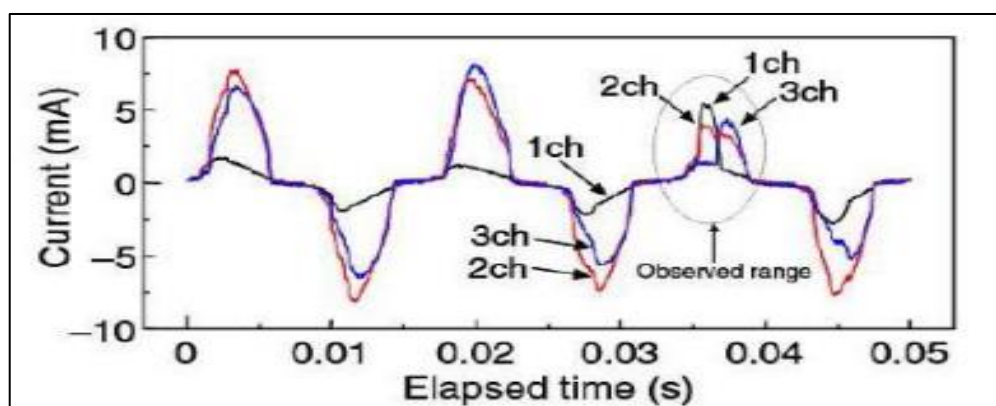


Figure II.3. formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel.

Il peut être déduit de cette étude que le courant de fuite peut servir de moyen de détection des positions des décharges partielles et qu'il identifie l'état de surface de l'isolateur.

### II.2.3. Analyse temporelle et fréquentielle du signal du courant de fuite d'un isolateur recouvert de glace

F. Meghnefi et al [37] se sont intéressés à l'analyse du signal du LC d'un isolateur en porcelaine recouvert de glace. Les résultats obtenus montrent que le signal du courant de fuite lors de l'accumulation de glace est caractérisé par des formes d'ondes et des fréquences des harmoniques spécifiques. Des tests de laboratoire ont également montré que l'analyse de ce signal permet d'estimer le taux de gel. Ceci est possible en étudiant dans le temps l'évolution des harmoniques d'ordres 1, 3 et 5 ainsi que par le déphasage entre les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. La simulation du gel a été faite artificiellement dans une chambre froide de 6m×6m×9m spécialement conçue pour ce genre de recherches. La glace a été formée à partir de gouttelettes en surfusion produites par un système de buses, comme le montre la figure II.4. L'approvisionnement en haute tension est assuré par un transformateur d'essais THT (350 kV). Le signal du courant de fuite est enregistré à travers un shunt de 5Ω.

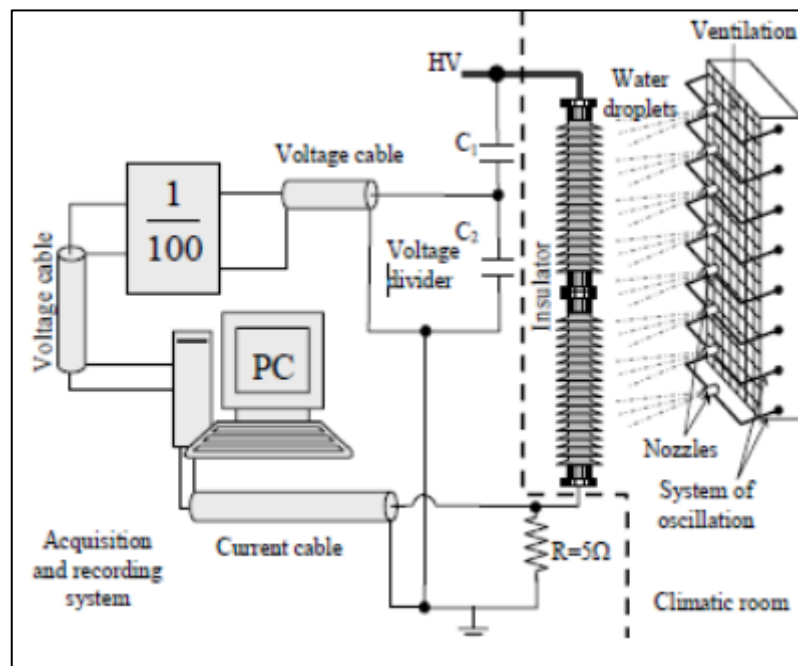


Figure II.4. Dispositif expérimental.

Afin de suivre l'état de surface de l'isolateur sous l'effet de glace, les auteurs ont étudié les variations des harmoniques du signal du courant de fuite et ceci en se limitant à ceux d'ordre 1, 3 et 5 (60Hz, 180Hz et 300Hz). Pour une meilleure représentation, les amplitudes des harmoniques d'ordres 3 et 5 sont représentés par rapport à celle du fondamental Figure II.5.

Les auteurs ont déduit qu'initialement (faible dépôts de glace) les amplitudes des deux harmoniques sont faibles par rapport à celle du fondamental, ce qui confirme que le courant de fuite

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

est sinusoïdal durant cette période. Par ailleurs, les mêmes chercheurs ont pu conclure que l'étude du déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite est d'une importance capitale car elle permet d'estimer l'accumulation de la glace sur les isolateurs. Ce déphasage augmente avec l'accumulation de la glace [36].

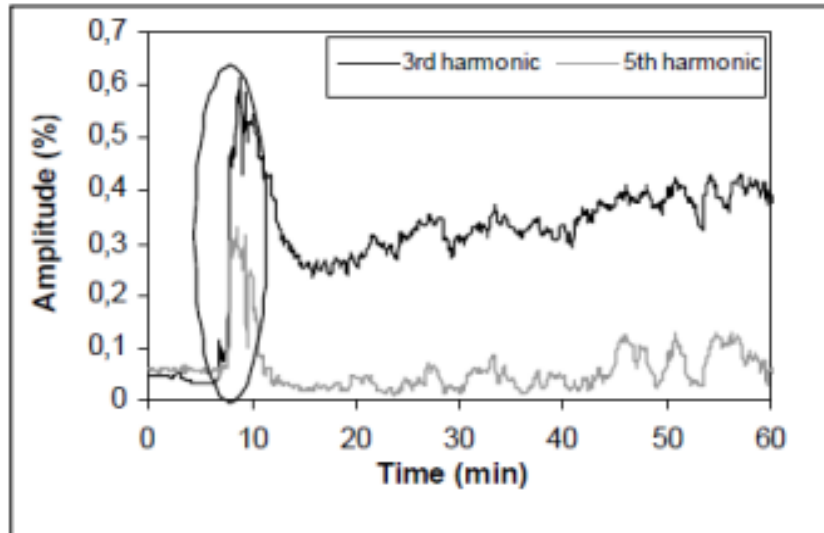


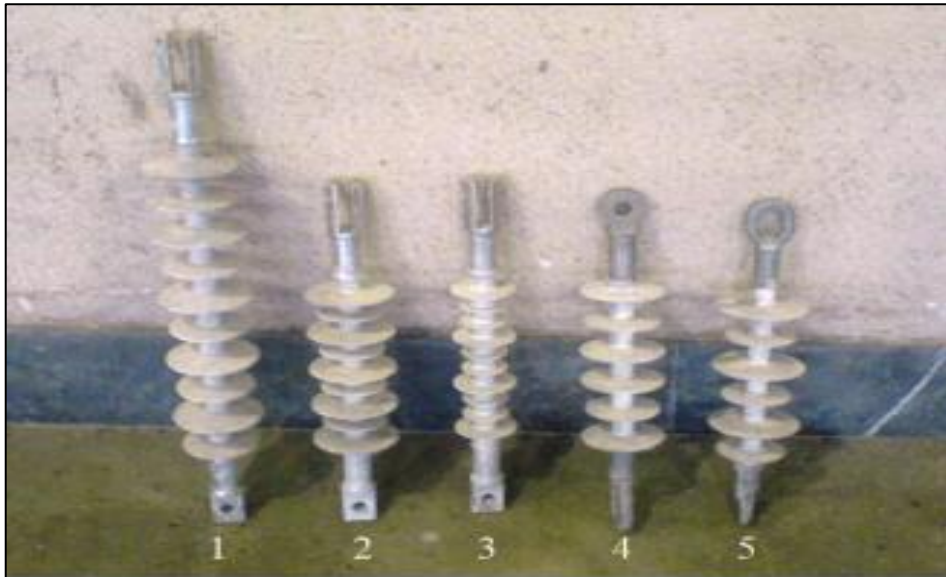
Figure II.5. Evolution du rapport des harmoniques d'ordres 3 et 5 par rapport à celui du fondamental du signal du courant de fuite.

### II.2.4. Détermination de la probabilité d'occurrence d'un contournement des isolateurs composites en utilisant les composantes harmoniques du signal du courant de fuite

H. H. Kordkheili et al [38] ont proposé une nouvelle méthode pour prédire le contournement des isolateurs type Caoutchouc de Silicium (Silicon Rubber (SIR)) et sa probabilité d'occurrence en analysant les composantes harmoniques du signal du courant de fuite. Les essais ont été effectués sur des échantillons d'isolateurs pollués avec différents profils Figure II.6-Tableau II.1.

Tableau II.1. Caractéristiques des isolateurs.

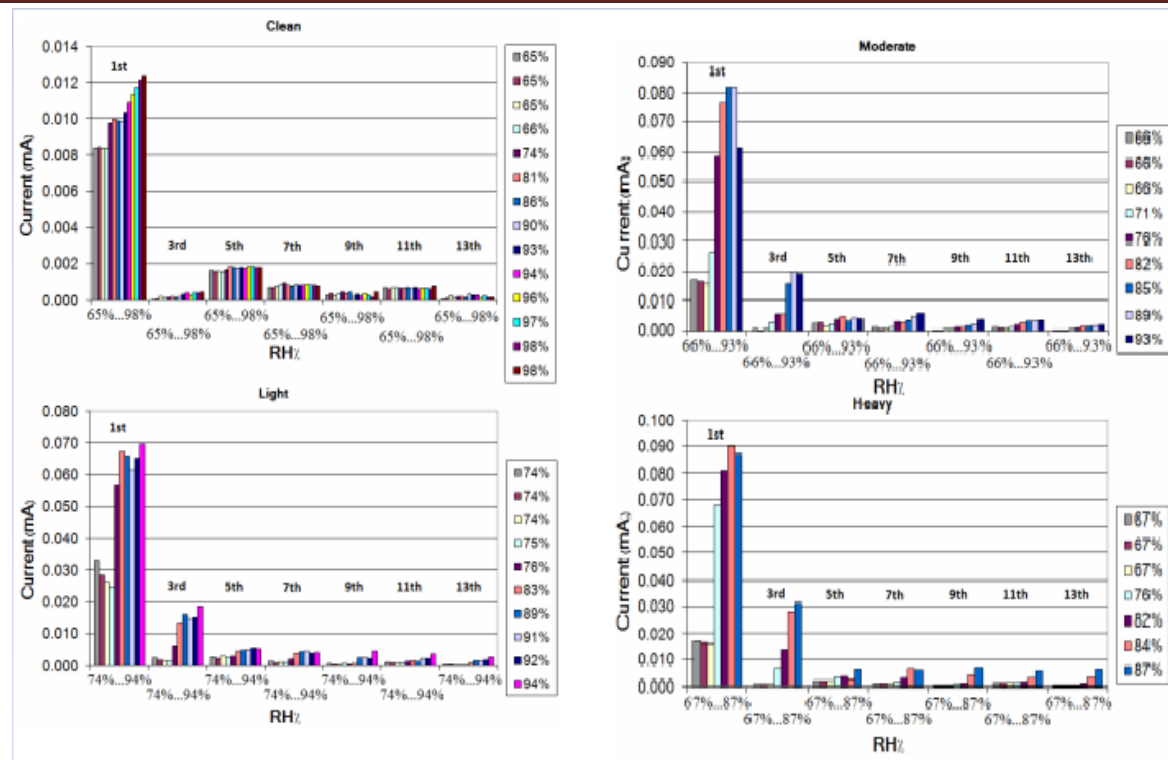
Isolateur N°	1	2	3	4	5
Tension nominale (kV)	33	24	24	24	24
Longueur de la chaîne d'isolateurs (mm)	720	520	520	449	449
Ligne de fuite (mm)	1070	770	590	674	630



**Figure II.6.** Isolateurs testés.

Pour vérifier l'efficacité de leur nouvelle méthode, ces chercheurs ont effectué des mesures de courant de fuite sur différents isolateurs, à divers taux d'humidité et niveaux de contamination différents. Les résultats de ces mesures pour l'isolateur n°1 sont présentés sur la figure II.7.

H. H. Kordkheili et al [38] ont montré que lorsque l'amplitude de la composante harmonique d'ordre 5 est plus importante que celle d'ordre 3, cela signifie que l'isolateur est propre ou bien très légèrement pollué. Les chercheurs ont également constaté que si le contournement ne se produit pas au début de l'humidification, il ne se produira pas non plus à la saturation en humidité. Les chercheurs ont démontré dans la même étude que la variation du rapport entre les amplitudes de la cinquième et la troisième harmonique est un indicateur très fiable pour évaluer l'état de surface d'un isolateur spécifique [36].



**Figure II.7.** Variation de l'amplitude des harmoniques du courant de fuite pour différents taux d'humidités et différents niveaux de contaminations.

$$K_{5/3} = \frac{\text{Amplitude de l'harmonique 5}}{\text{Amplitude de l'harmonique 3}}$$

D'après les tests effectués dans le même laboratoire, les chercheurs ont remarqué que dans les conditions normales de service, l'index  $K_{5/3}$  est supérieur à 100%. Donc, ils concluent que si cette condition est vérifiée, alors le contournement est très lointain. Par ailleurs, ils ont aussi remarqué que pour tous les cas où le contournement se produit, l'index  $K_{5/3}$  est inférieur à 30%. alors, ils déduisent que pour reconnaître qu'un isolateur est  $K_{5/3}$  est inférieur à 30%. Est une condition nécessaire mais pas suffisante. Ils démontrent que la probabilité d'occurrence du contournement dans ce dernier cas est de 90% [38].

### II.2.5. Analyse des décharges partielles pour le diagnostic de l'état de surface des isolateurs en polymères

Afin d'estimer la sévérité de pollution des isolateurs de ligne, S. Chandrasekar et al [39] ont analysé les décharges partielles sur les isolateurs SIR ( Silicon Rubber ). Dès lors, des tests ont été réalisés sur plusieurs échantillons figure II.8 sous tension alternative avec des niveaux de pollution et des taux d'humidité relative de l'air (RH) différents [36].

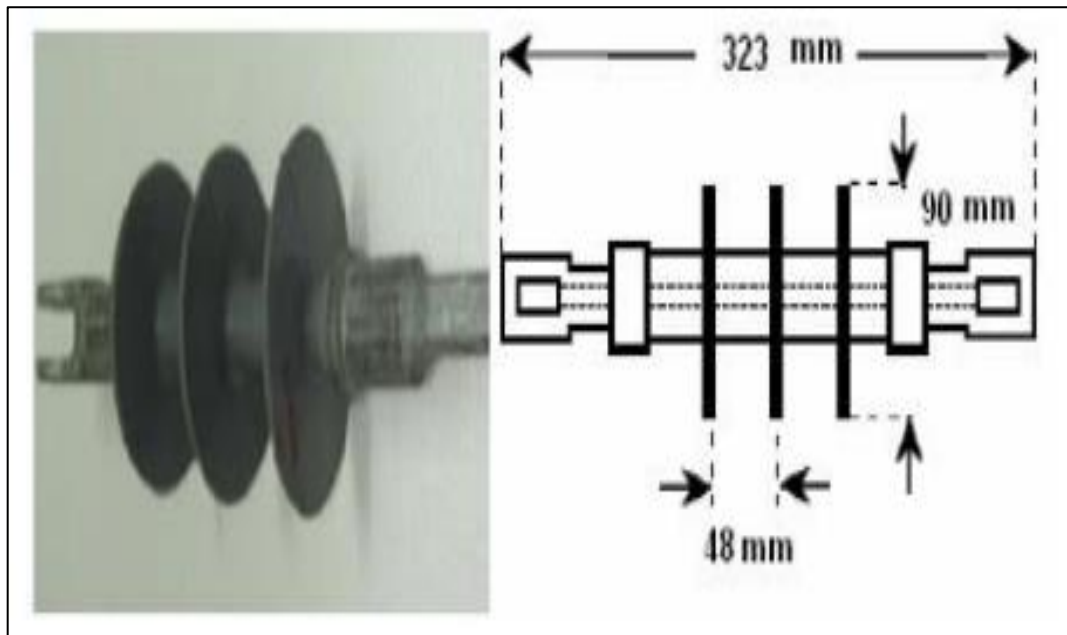


Figure II.8. Photographie et schéma d'un échantillon SIR 11 Kv.

Les isolateurs sont suspendus dans une chambre ( $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ) où le brouillard (NaCl) est injecté afin de varier le ESDD en  $\text{mg}/\text{cm}^2$  de 0.06 à 0.25. Pour cette expérience, le montage utilisé est celui de la figure II.9 .

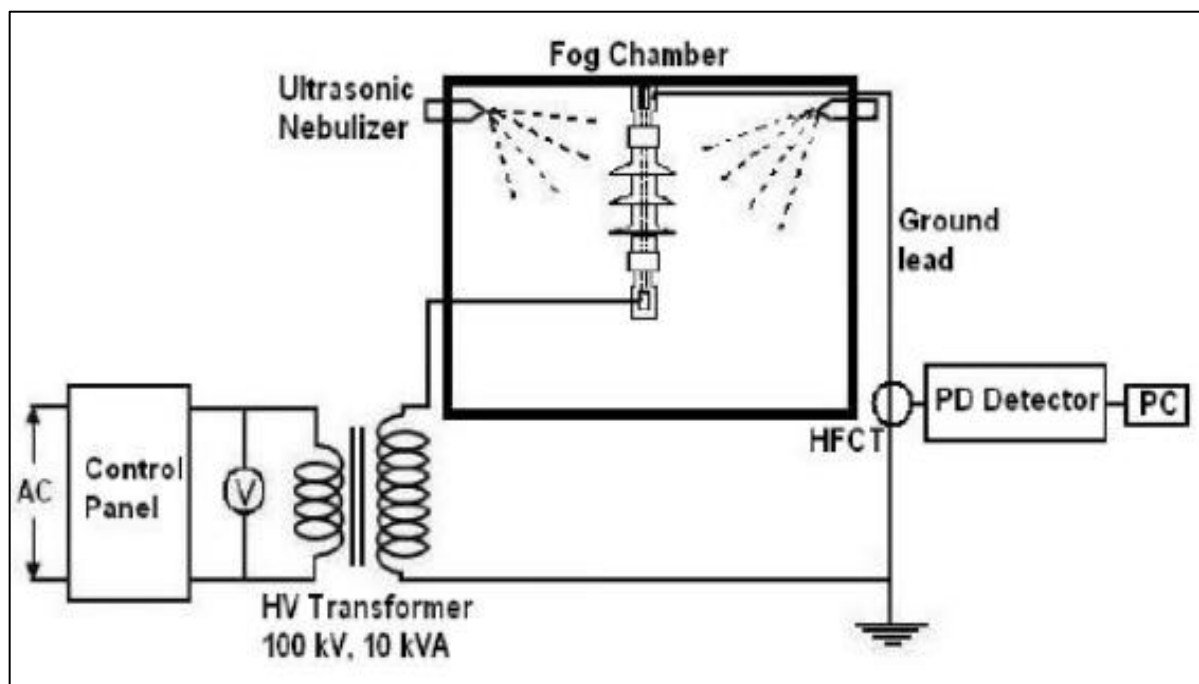


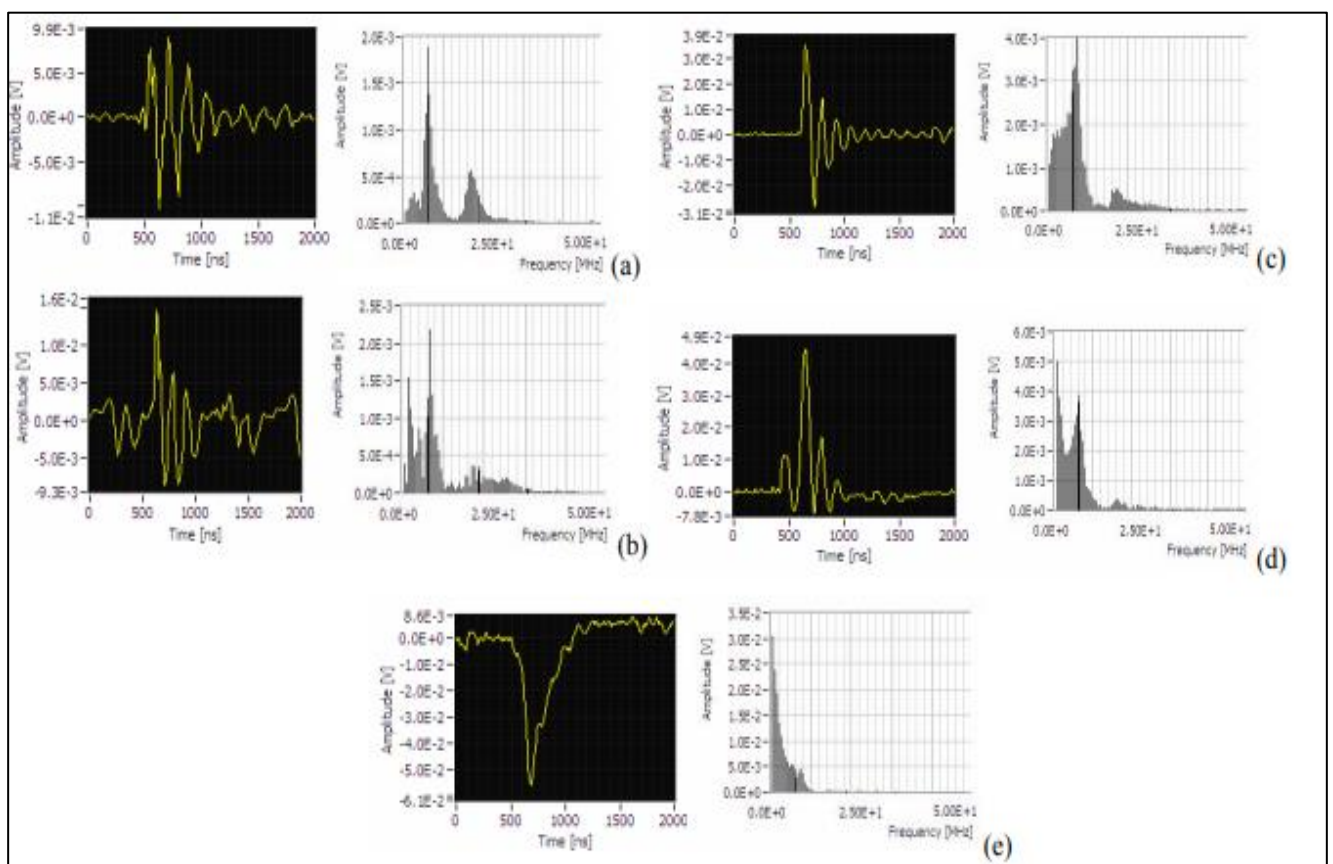
Figure II.9. Montage expérimental.

Plusieurs essais ont été effectués :

- essais sur un isolateur SIR propre, sous différents taux d'humidité relative de l'air (30 à 40%);

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

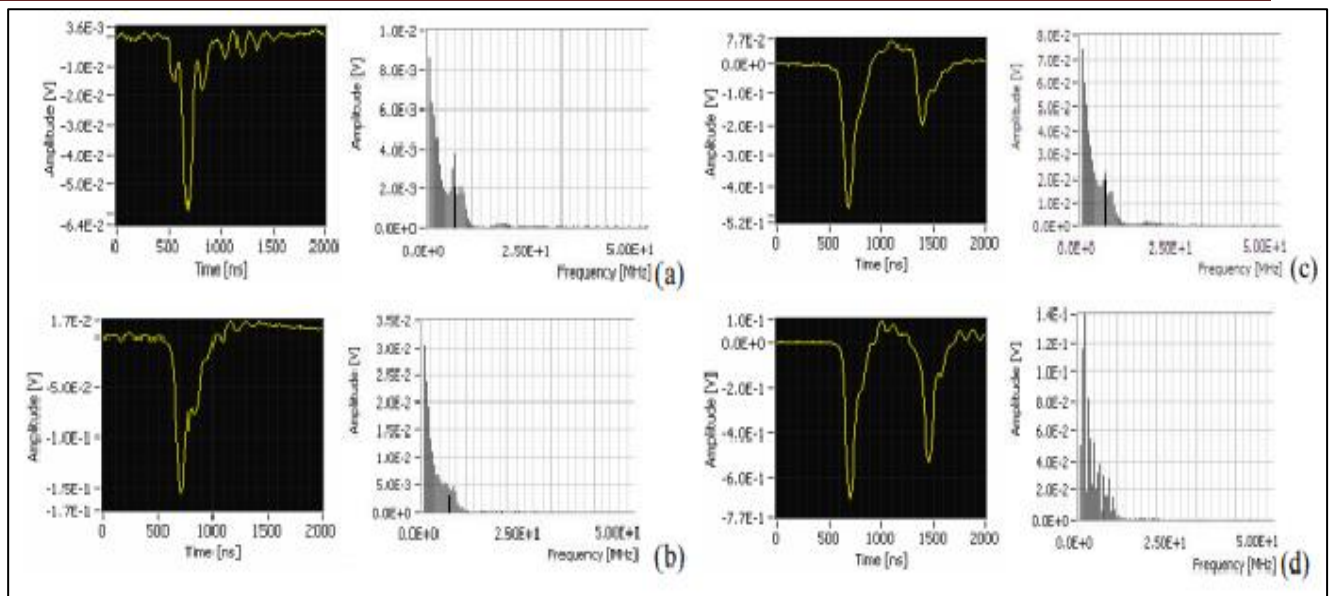
- essais sur un isolateur SIR (ESDD =  $0.08\text{mg}/\text{cm}^2$ , RH=60 à 100%) ;
- essais sur un isolateur (SIR) à RH=100%, (ESDD varie de  $0.06$  à  $0.25\text{ mg}/\text{cm}^2$ ). Pour les isolateurs propres, les auteurs ont noté l'absence de décharges partielles. Pour un niveau de pollution de  $0.08$  ESDD, et un taux d'humidité relative allant de 60 à 100% (figure II.5), les auteurs ont observé que :
- l'amplitude des DP augmente avec l'augmentation du RH ;
- pour de faibles RH (60% à 80%), les composantes fréquentielles dominantes du signal DP sont comprises dans la bande 6-25 MHz ;
- pour des valeurs élevées de RH (au-dessus de 90%), les composantes fréquentielles sont comprises dans la bande 2-6 MHz.



**Figure II.10.** Signaux obtenus (représentations temporelles et fréquentielles) des DP à 0.08 ESDD : (a) 60%RH, (b) 70%RH, (c) 80%RH, (d) 90%RH, (e) 100%RH.

Pour un niveau de pollution variant de  $0.06$  ESDD à  $0.25$  ESDD avec un RH=100% (figure I.9), les auteurs ont conclu que quand le niveau de pollution augmente :

- les amplitudes des DP augmentent;
- le taux de répétition (apparition de la totalité des DP dans un délai spécifique) diminue ;
- les amplitudes des composantes fréquentielles augmentent dans la bande 1-6 MHz.



**Figure II.11.** Signaux obtenus (représentations temporelles et fréquentielles) des DP pour RH=100% : (a) 0.06 ESDD, (b) 0.08 ESDD, (c) 0.12 ESDD, (d) 0.25 ESDD.

En analysant les résultats et les graphiques obtenus, les auteurs ont conclu que la valeur de l'asymétrie du signal des DP diminue considérablement avec l'augmentation de la pollution dans des conditions de pollution élevées. Cependant, ils ont estimé que l'utilisation de ce paramètre seul ne suffit pas pour diagnostiquer l'état de l'isolateur.. Cette étude fut achevée par une analyse statistique, dont les paramètres sont : le paramètre de forme  $\beta$  et la phase moyenne du signal DP, et cela pour différents ESDD et RH. La variation du paramètre  $\beta$  et de la phase moyenne s'avère comme un bon outil pour le diagnostic de la sévérité de la pollution[36].

### II.2.6. L'utilisation de Booster Sheds pour améliorer la Performances des isolateurs de type multicône 800 kV sous une pluie battante

Dans des études antérieures, [40] ont proposé une méthode pour améliorer les performances des isolateurs, des tests de haute tension de contournement ont été réalisés au laboratoire HT de CEPPEL, sous une tension alternative de 60 Hz, à l'aide de deux unités de transformateurs de test en cascade capables d'appliquer une tension jusqu'à 900 kV et 2 ampères. Initialement, les tests visaient à déterminer le nombre et la position appropriés des BS pour chaque colonne d'isolateur complète (deux sections d'isolateur assemblées en série). Cette expérience a été menée sur la base d'images UV associées aux activités de décharge le long de l'isolateur lorsqu'il était soumis à une tension élevée sous une forte pluie. Par la suite, des tests ont été effectués sur des sections d'isolateurs afin de quantifier l'efficacité des BS pour améliorer les performances de l'isolateur en cas de contournement. Dans tous les cas, les tests ont été réalisés sur des isolateurs avec et sans BS

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

et les résultats ont été comparés dans les mêmes conditions de test; conditions sèches ou mouillées avec des pluies artificielles de 5 mm/min; la résistivité de l'eau étant de 100m.

Pour les tests de contournement sur la colonne d'isolateur complète, le niveau de tension de tenue de 885 kV a été vérifié, la tension étant appliquée pendant une minute après un temps de pré-humidification de 15 minutes. Pour les tests sur des sections d'isolateurs, la tension de contournement a été déterminée comme une valeur moyenne de cinq ou dix tensions de rupture ( $U_d$ ), en fonction de la dispersion des valeurs de  $U_d$ .

La structure de pluie artificielle et les autres parties métalliques non actives à l'intérieur de la zone d'essai ont été maintenues aussi éloignées que possible des composants actifs du circuit d'essai, la distance minimale étant d'environ 12 m. Le taux de précipitation et l'uniformité de la pluie artificielle le long de l'isolateur en cours d'essai ont été mesurés et vérifiés selon la procédure normalisée. Les dimensions de la structure métallique utilisée comme base physique pour l'isolateur en cours d'essai et sa hauteur au-dessus du sol du laboratoire ont été établies autant que possible en fonction d'un agencement d'isolateur réel sur un jeu de barres de sous-station 765 kV. Des exemples de dispositions d'essai utilisées sont présentés à la figure II.12.



**Figure II.12.**Exemples d'agencements de circuits d'essai. Colonne isolante à l'extrémité d'un jeu de barres (a) avec et (b) sans BS ; colonne d'isolateur au milieu d'un jeu de barres (c) sans BS et section d'isolateur sans BS (d).

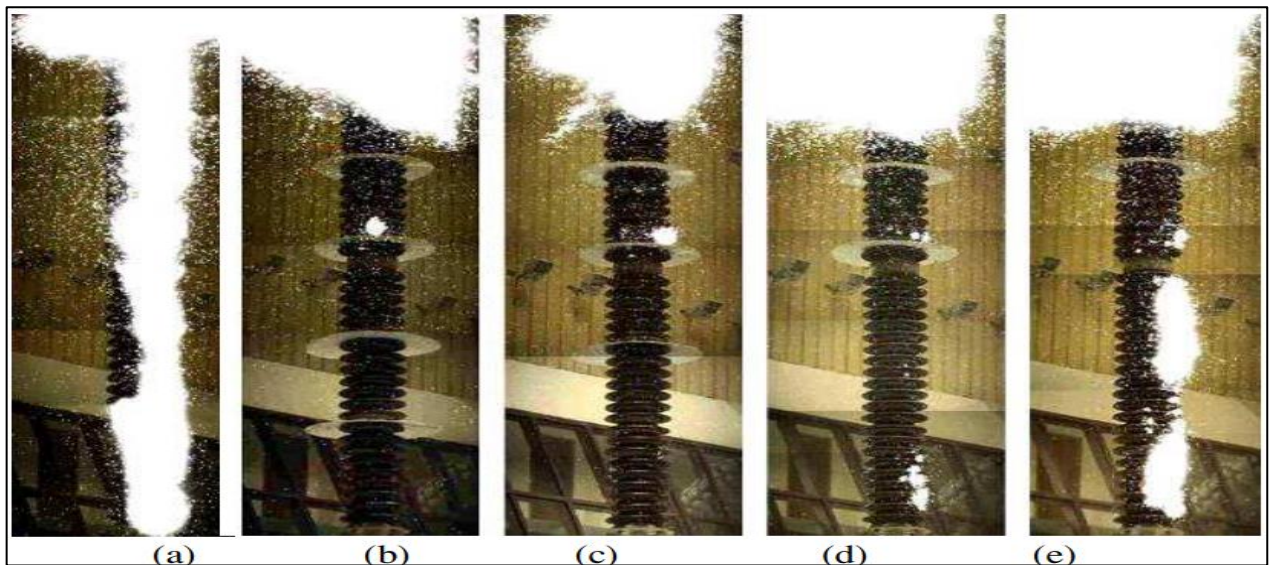
### ✓ Résultats

Au cours des tests effectués avec différentes quantités et positions de BS le long de la colonne d'isolateur, il a été observé que la quantité et la position appropriées de BS doivent toutes deux être prises en compte pour trouver la meilleure configuration permettant d'améliorer ses performances de contournement dans des conditions de forte pluie.

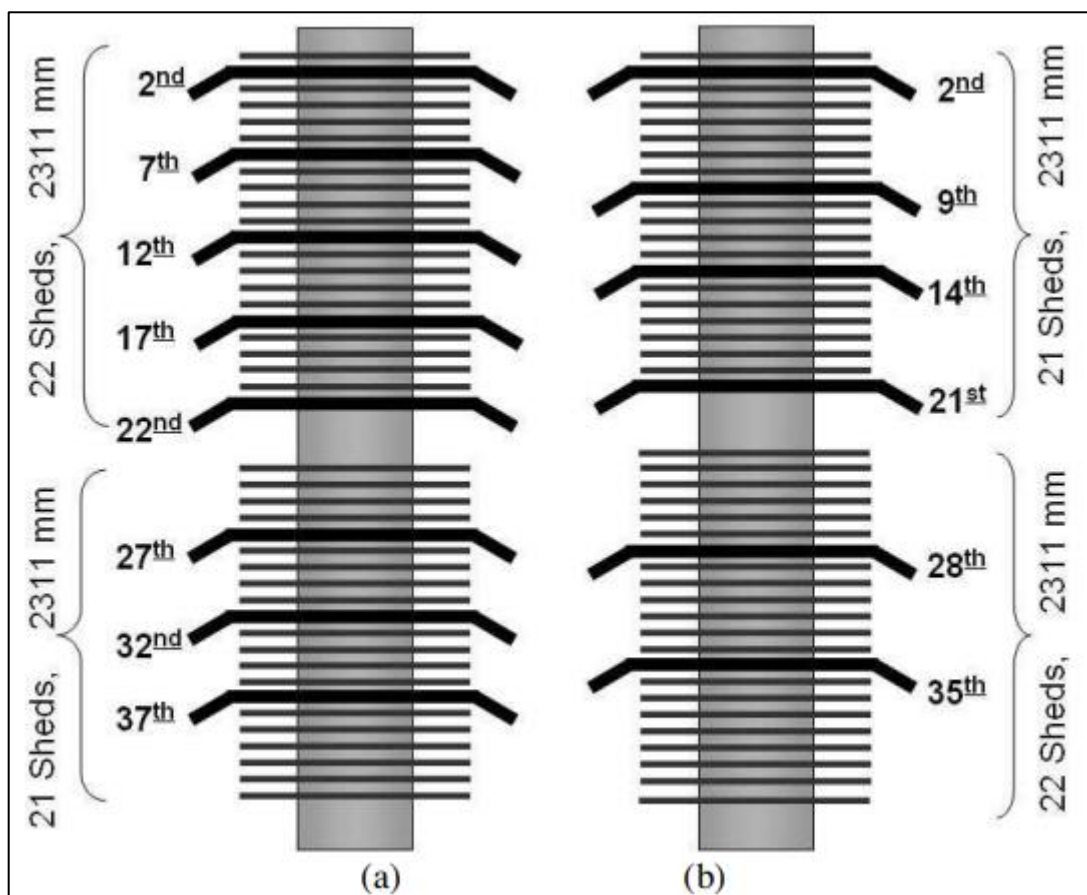
Des investigations ont été effectuées avec des BS positionnées uniformément tous les trois à sept sheds le long de l'isolateur, ainsi qu'avec certaines distributions de BS non uniformes. La configuration de BS la plus appropriée a été définie sur la base d'images UV et n'était pas la même pour les isolateurs des fabricants "A" et "B", comme le montre la figure II.13. Pour le fabricant "A", huit BS positionnées tous les cinq sheds de haut en bas de la colonne d'isolateur ont été trouvées être la meilleure configuration. Pour le fabricant "B", six BS distribuées de manière non uniforme comme indiqué dans la figure II.13. étaient les plus adéquates. Une représentation schématique des configurations de BS sélectionnées pour les deux colonnes d'isolateur est présentée dans la figure

Chaque isolateur a été testé avec la configuration sélectionnée de BS sous une pluie artificielle de 5 mm/min, 885 kV, prouvant sa capacité de tenue dans deux agencements de test différents : au milieu et à l'extrémité d'une barre omnibus typique de 800 kV. Lorsqu'il a été testé sans BS, la colonne d'isolateur a échoué dans certains cas, principalement lorsque l'agencement représentait l'extrémité de la barre omnibus dans des conditions de 5 mm/min. Les isolateurs utilisés dans ces expériences, sans BS, ont également été testés strictement conformément aux procédures normalisées actuelles pour les tests humides et ont prouvé leur capacité de tenue sous une pluie artificielle de 1 mm/min.

Les améliorations des performances de contournement des colonnes d'isolateur complètes grâce à l'utilisation de BS ont été vérifiées à l'aide d'images UV, comme le montre la figure II.13. Les images UV ont été très utiles au cours de l'enquête, permettant l'évaluation des performances des isolateurs de contournement en fonction de l'intensité, de l'étendue et de l'emplacement des activités de décharge. Il a été possible d'observer, par exemple, que la capacité de tenue de l'isolateur était très instable lors de certains tests sans BS, malgré le fait de n'avoir pas flashé complètement.



**Figure II.13.** Images UV pour un isolateur de type multi conique de 800 kV, de fabricant B, sous 885 kV, pluie artificielle de 5 mm/min. (a) sans booster sheds (BS) ; (b) 6 BS : sheds 2, 9, 14, 21, 28 et 35 ; (c) 5 BS : sheds 2, 9, 14, 21 et 28 ; (d) 4 BS : sheds 2, 9, 14 et 21 ; (e) 3 BS : sheds 2, 9 et 14. Le gain de la caméra UV et sa distance par rapport à l'isolateur sont restés constants pendant les tests.



**Figure II.14.** Dessin schématique des configurations de BS sur la colonne isolante du fabricant "A" (a) et du fabricant "B" (b).

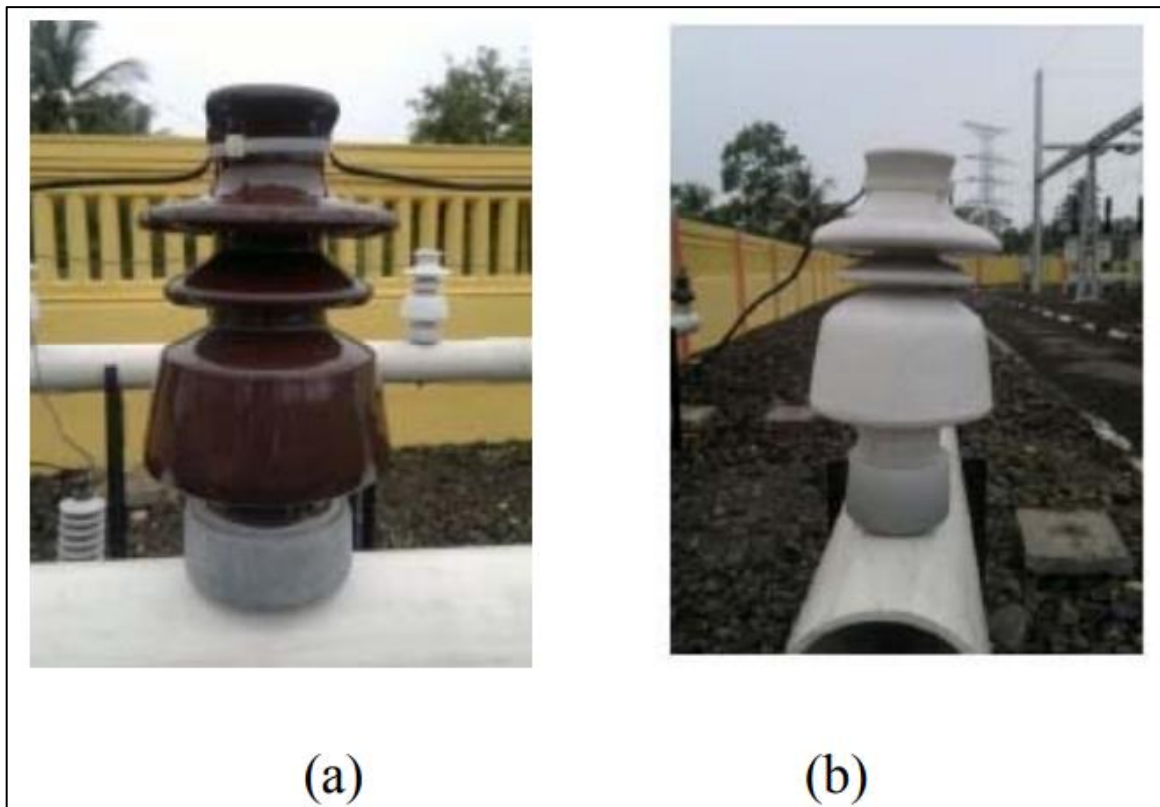
## **Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques**

### **II.2.7. Amélioration des performances des isolateurs extérieurs installés dans les zones côtières à l'aide d'un revêtement en caoutchouc de silicone**

Dans des études antérieures, [31] ont proposé une méthode pour améliorer les performances des isolateurs en amélioration des performances des isolateurs extérieurs installés dans les zones côtières à l'aide d'un revêtement en caoutchouc de silicone

#### *a. Échantillons*

Il y avait 2 types d'isolateurs utilisés dans l'expérience. Le premier isolateur était de classe 20 kV, de type broche-poteau, en céramique, comme indiqué dans la figure II.15. Les isolateurs ont été produits par PT Twink Bandung, en Indonésie, avec une distance de fuite de 500 mm. Les isolateurs sont largement utilisés dans le réseau de la société d'électricité d'État indonésienne (PT. PLN).



**Figure II.15.** Échantillons d'isolateurs en céramique à broche et poteau (a) Non revêtus (b) Revêtus de RTV.

Les isolateurs ont été testés en laboratoire et installés à la sous-station côtière de Pangandaran, comme montré dans la figure II.16. La sous-station de Pangandaran est située à environ 500 mètres de la mer indonésienne de l'île sud-ouest de Java. Le deuxième isolateur était de type tige utilisé pour la transmission à 150 kV, comme indiqué dans la figure II.16. L'isolateur de type tige a été installé dans les lignes de transmission à 150 kV dans la zone côtière de Ketewel à Bali, à environ 400 mètres de la mer indonésienne, comme illustré dans la figure II.17. Les deux zones côtières

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

sont fortement polluées et de nombreux contournement d'isolateurs ont été constatés dans la région. Les échantillons ont été enduits de caoutchouc de silicone vulcanisé à température ambiante (RTV) à l'aide d'une buse haute pression d'une épaisseur de  $0,3 \pm 0,05$  mm.



**Figure II.16.** Les isolateurs à broches de type post ont été installés à la sous-station de Pangandaran.



**Figure II.17.** Échantillons d'isolants de type tige sur la côte de Ketewel.

### *b. Pollution artificielle*

Pour étudier la performance du revêtement de composé de silicone, une contamination artificielle a été appliquée aux isolateurs. Les isolateurs ont été nettoyés avec un détergent de lavage, puis rincés à l'eau et laissés sécher. La pollution artificielle a été appliquée conformément à la norme IEC 507 1991. 40 g de kaolin ont été utilisés pour chaque litre d'eau. Le NaCl a été ajouté à la solution pour obtenir la valeur de conductivité souhaitée. Les isolateurs ont été testés sous différents climats artificiels.

### *c. Hydrophobie*

La mesure de l'hydrophobicité de la surface de l'isolant a été réalisée en mesurant l'angle de contact. Une goutte d'eau de 50  $\mu$ l a été déposée sur la surface de l'isolant. Le profil de la goutte d'eau a été pris 2 minutes après son dépôt sur la surface à l'aide d'une caméra.

### *d. Corona et mesure de température*

La mesure de la corona sur la surface de l'isolateur a été réalisée à l'aide d'une caméra Ultra Violet DAYCOR II SN 169. Grâce à cette caméra, l'intensité de la corona peut être déterminée à distance. La surface de l'isolateur a été mesurée à l'aide d'une caméra de vision infrarouge VISIR.

### *e. Mesures de courant de fuite (LC) et de tension de contournement*

Le courant de fuite circulant sur la surface de l'isolateur a été mesuré en mesurant la tension à travers une résistance en série à l'aide d'un oscilloscope numérique avec un numériseur de 8 bits, une bande passante de 100 MHz et un taux d'échantillonnage maximal de 1 GS/s. Les formes d'onde LC comprenant des composantes à basse et haute fréquence ont été obtenues. Les données numériques ont été transférées vers un ordinateur personnel via un GPIB pour une analyse ultérieure.

## ✓ **Résultats**

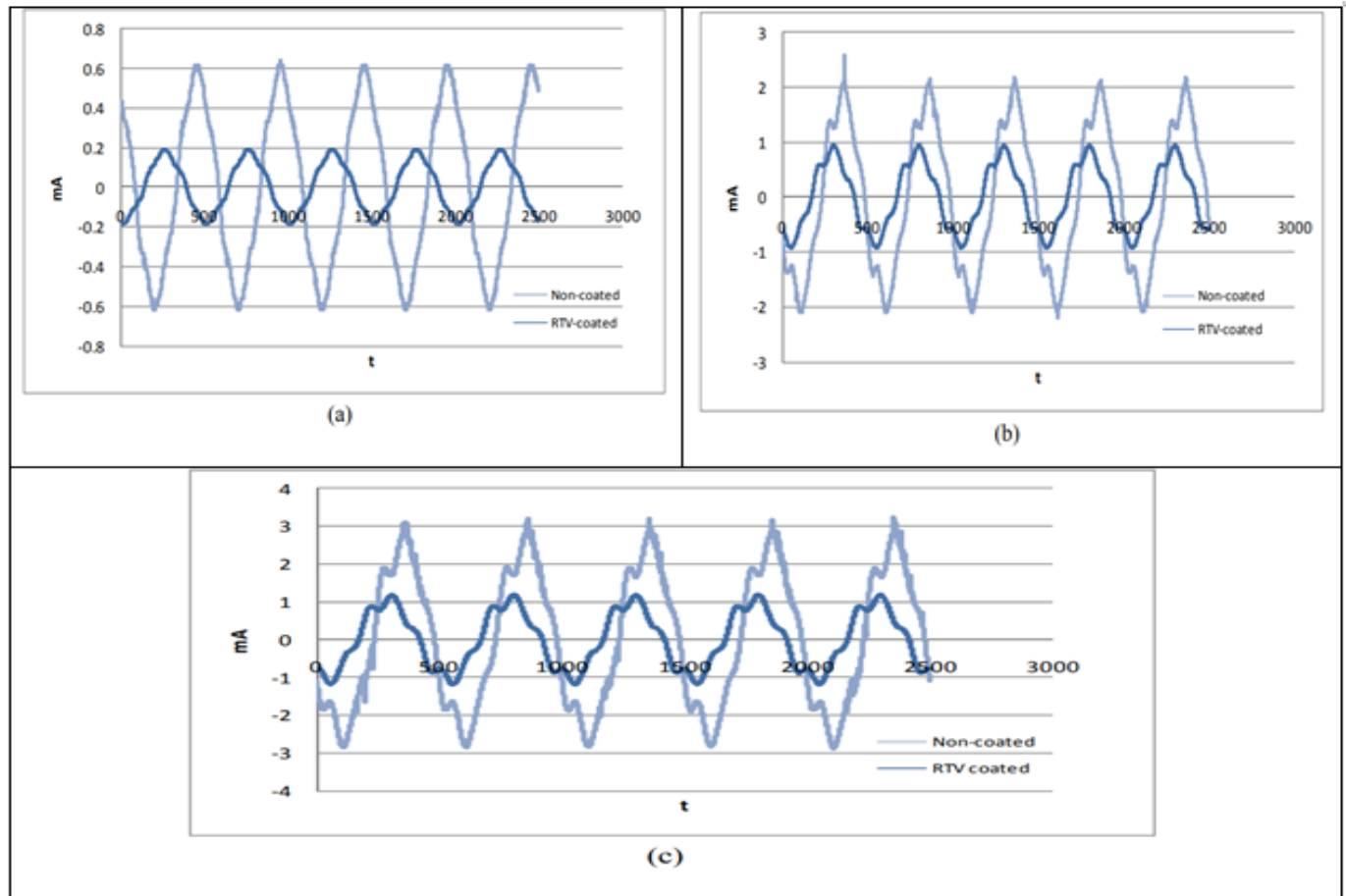
### *a. Le courant de fuite et la tension de contournement*

La figure II.18. montre des formes d'onde typiques de courant de fuite pour un isolateur en caoutchouc de silicone post-pin RTV revêtu et un isolateur en céramique non revêtu pour une pollution au kaolin-sel sous brume propre à une tension appliquée (a) de 10 kV, (b) 40 kV et (c) 60 kV au laboratoire. Les formes d'onde sont légèrement déformées par rapport à leur forme sinusoïdale en raison de la présence de composantes harmoniques, en particulier la 5<sup>ème</sup> composante. Pour l'isolateur en caoutchouc de silicone RTV revêtu, à une tension appliquée de 10 à

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

60 kV, la distorsion de la forme d'onde de courant de fuite était symétrique aux deux polarités et la 5ème harmonique contribuait grandement à la DHT.

Dans des conditions particulières, la distorsion de la forme d'onde de courant de fuite était asymétrique. Des étincelles ont été observées dans les demi-cycles positifs. La 5ème harmonique a grandement contribué à la DHT. Dans des conditions sévères, aucun contournement n'a été observé pour les isolateurs revêtus de RTV jusqu'à 60 kV, mais l'isolateur non revêtu a subi un flash à environ 32 kV.



**Figure II. 18.** Formes d'onde LC typiques pour isolant pollué par du sel de kaolin pollution sous brouillard propre à la tension appliquée (a) 10 kV, (b) 40 kV et (c) 60 kV.

### b. Amélioration de l'hydrophobicité

Le Figure II. 19. montre des photographies de gouttes d'eau sur les surfaces d'isolateurs revêtus de RTV ainsi que sur des isolateurs non revêtus, prises en laboratoire ainsi que sur des échantillons installés depuis 6 mois à la sous-station de Pangandaran. Le tableau montre clairement que le revêtement en silicone améliore considérablement la surface de l'isolateur en céramique en la rendant hydrophobe au lieu d'hydrophile. L'exposition de l'environnement côtier à l'isolateur en

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

céramique réduit considérablement l'angle de contact des isolateurs non revêtus d'environ  $50^\circ$  à  $30^\circ$  tandis que pour les isolateurs revêtus de RTV, l'angle de contact reste supérieur à  $100^\circ$ .







Isolateur non revêtu	Isolateur recouvert de silicone
 <p>Neuf et propre angle de contact : <math>55^\circ - 45^\circ</math></p>	 <p>Nouveau-enduit propre angle de contact : <math>110^\circ - 100^\circ</math></p>
 <p>Nouveau et kaolin-sel pollué à 3,6 mS angle de contact : <math>8^\circ - 5^\circ</math></p>	 <p>Sel de kaolin enrobé neuf pollué à 3,6 mS angle de contact : <math>105^\circ - 100^\circ</math></p>
 <p>Sur la côte de Pangandaran après 6 mois angle de contact : <math>35^\circ - 25^\circ</math></p>	 <p>Sur la côte de Pangandaran après 6 mois angle de contact : <math>100^\circ - 190^\circ</math></p>

Figure II. 19. Profil des gouttelettes d'eau et angle de contact pour les isolants sans revêtement et revêtus RTV.

### c. Atténuation de la corona et réduction de la température de surface

La Figure II.19. montre des photographies d'isolateurs tige installés dans la zone côtière de Ketewel à Bali. Les isolateurs installés en phase R sont non revêtus, tandis que ceux en phase T sont recouverts de caoutchouc de silicone RTV. Les isolateurs ont été installés en février 2009. Après 3 ans d'installation, l'isolateur est resté stable et aucun contournement ne s'est produit. L'intensité de la corona a considérablement diminué, passant de 3598 compteurs par minute pour l'isolateur non revêtu à 357 compteurs par minute pour l'isolateur revêtu de RTV. Le revêtement de RTV a également réduit la température de surface de l'isolateur, comme le montre la figure II.20.,

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

où la température de surface de l'isolateur non revêtu était supérieure à 33 °C, tandis que celle de l'isolateur revêtu de RTV était réduite à 31 °C.

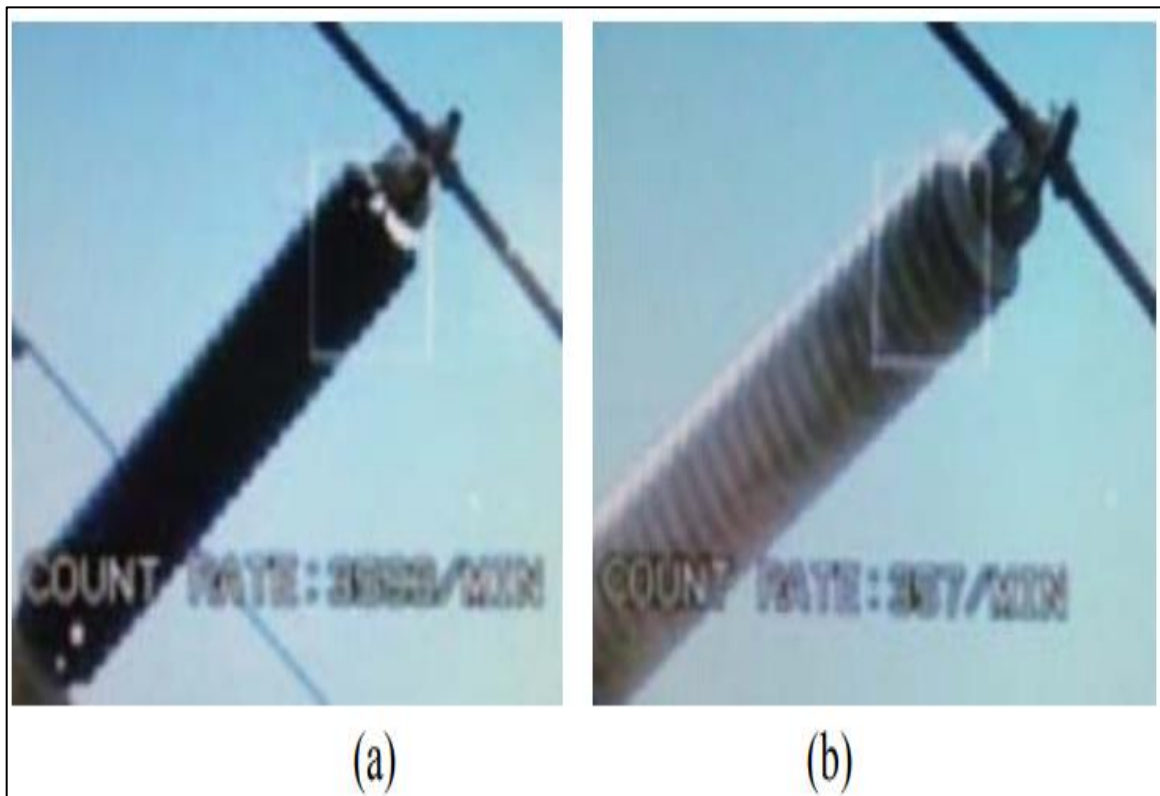


Figure II. 20. Intensité corona des isolateurs à tige installés sur la côte de Ketewel zone à Bali (a) phase R (sans revêtement) et (b) phase T (avec revêtement).

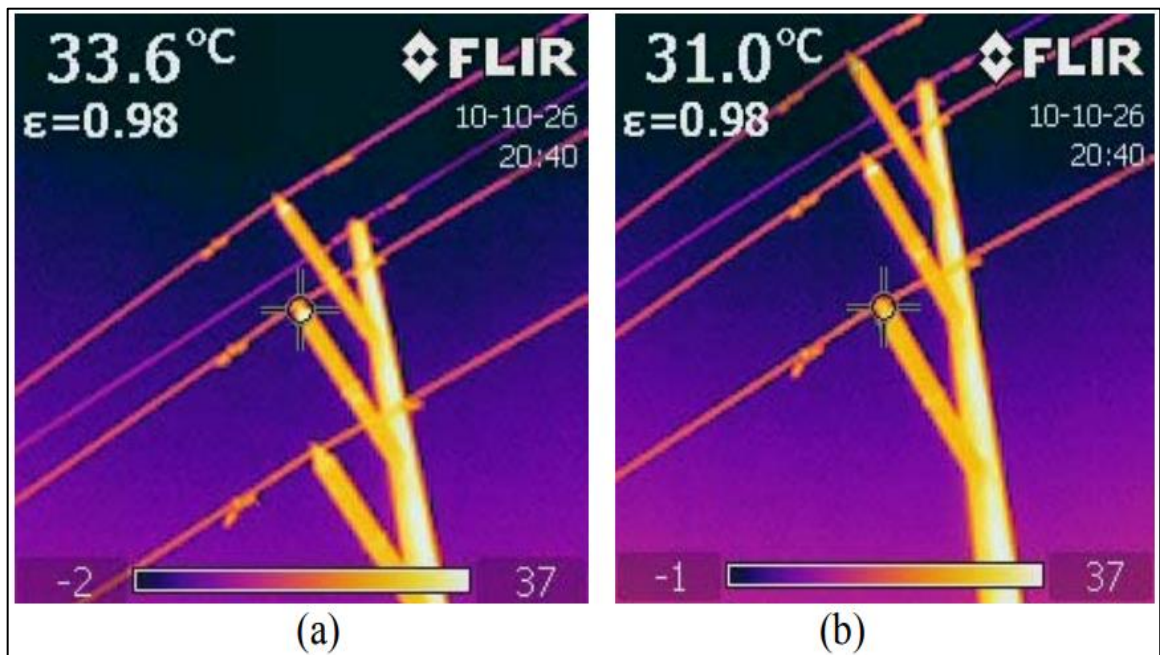


Figure II. 21. Image de température infrarouge pour (a) un isolateur non revêtu et (b) un isolateur revêtu à la côte de Ketewel.

### **II.2.8. Amélioration des performances de la tension de contournement en présence de pollution des isolateurs cylindriques en porcelaine**

Dans des études antérieures, [32] ont proposé une méthode pour améliorer les performances des isolateurs les performances de tension de contournement par contamination des quatre types d'isolateurs spécimens ont été évaluées fondamentalement par la procédure standard de test de brouillard salin spécifiée dans la publication IEC 60507, à l'exception du débit de brouillard salin. Le débit a été réduit de moitié par rapport à la valeur spécifiée (500 cc/min/buse), en tenant compte de la corrélation entre les résultats d'essais en laboratoire et sur le terrain des isolateurs en polymère. De plus, le pré conditionnement prescrit dans la norme IEC pour le test de brouillard salin des isolateurs conventionnels en porcelaine et en verre n'a pas été réalisé, car cela pourrait détruire l'hydrophobicité des surfaces revêtues de caoutchouc de silicone. Seules les surfaces en porcelaine nues des échantillons ont été soigneusement lavées avec un détergent avant les tests individuels. Un échantillon a été installé verticalement dans la chambre d'essai, et a été alimenté avec une tension d'essai. Le brouillard salin a ensuite été directement pulvérisé sur l'isolateur d'échantillon des deux côtés. La claquage ou la tenue pendant une heure a été confirmée. Le test a ensuite été répété sur un autre échantillon propre, en appliquant la tension d'un cran plus bas ou plus haut en fonction des résultats du test précédent. La tension de contournement de 50 % a été déterminée par la méthode haut-bas après l'obtention de 10 ou plusieurs données efficaces. La source d'alimentation utilisée dans cette étude était suffisamment rigide pour évaluer les tensions de contournement par contamination des isolateurs même dans des conditions de contamination importantes.

#### **✓ Résultats des tests**

Les résultats de mesure de la résistance de surface des ailettes individuelles le long des isolateurs revêtus de caoutchouc de silicone uniquement sur toutes les ailettes et sans aucun revêtement sur toute la surface de l'isolateur sont présentés à la figure II.21. Dans le cas de l'échantillon avec revêtement sur les ailettes, bien que les mesures aient été effectuées séparément pour les surfaces supérieure et inférieure des ailettes, la différence de résistance de surface entre les surfaces supérieure et inférieure des ailettes n'est généralement pas significative. Dans le cas de l'échantillon sans revêtement, bien que les résistances combinées pour les surfaces supérieure et inférieure des ailettes soient présentées à la figure II.21, elles sont principalement plus basses par rapport aux valeurs séparées pour les ailettes supérieures et inférieures de l'échantillon revêtu d'ailettes. Dans le cas de l'échantillon revêtu d'ailettes, sauf pour quelques ailettes limitées, la plupart des ailettes ont des résistances de surface plus élevées presque identiques par rapport aux surfaces en porcelaine nues. Ainsi, la tension appliquée à l'ensemble de l'isolateur d'échantillon avec

## Chapitre II: Etudes antérieures sur l'amélioration des performances des isolateurs électriques

revêtement de surface d'ailette est considérée comme étant divisée et allouée à ces ailettes individuelles. D'autre part, dans le cas de l'isolateur en porcelaine nue sans aucun revêtement, avec le temps, seul un petit nombre limité d'ailettes a une résistance beaucoup plus élevée par rapport aux autres ailettes, ce qui suggère la formation de bandes sèches résultant de la concentration de contraintes de tension sur ces ailettes ayant une résistance plus élevée. En fait, comme des activités de décharge typiques sont présentées à la figure II.22, les trois échantillons avec revêtement partiel ou entier de caoutchouc de silicone montrent des activités de décharge partielle sur presque toute la surface de l'échantillon, indiquant une distribution de tension uniforme le long de l'isolateur, tandis que l'échantillon sans revêtement ne montre que des activités de décharge limitées à la partie supérieure, indiquant une distribution de tension très non uniforme.

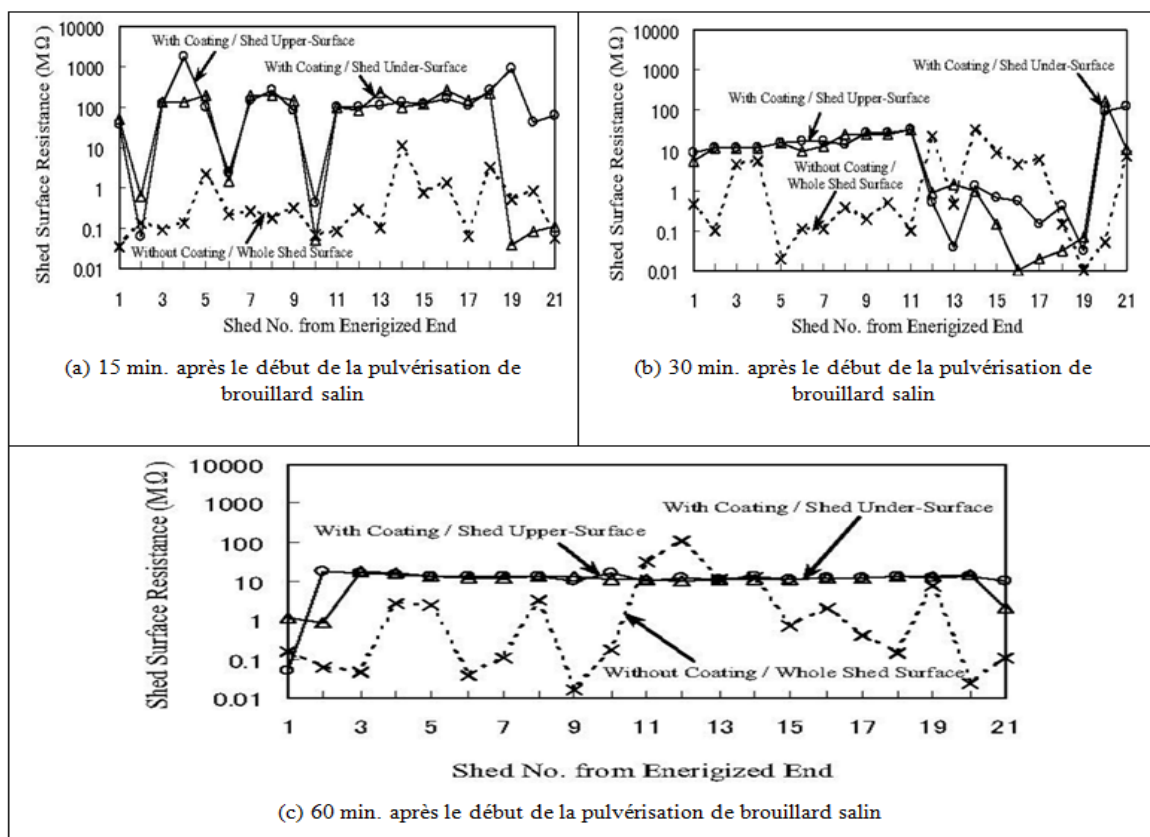


Figure II.22. Distribution de la résistance de surface des sheds le long de l'isolateur.

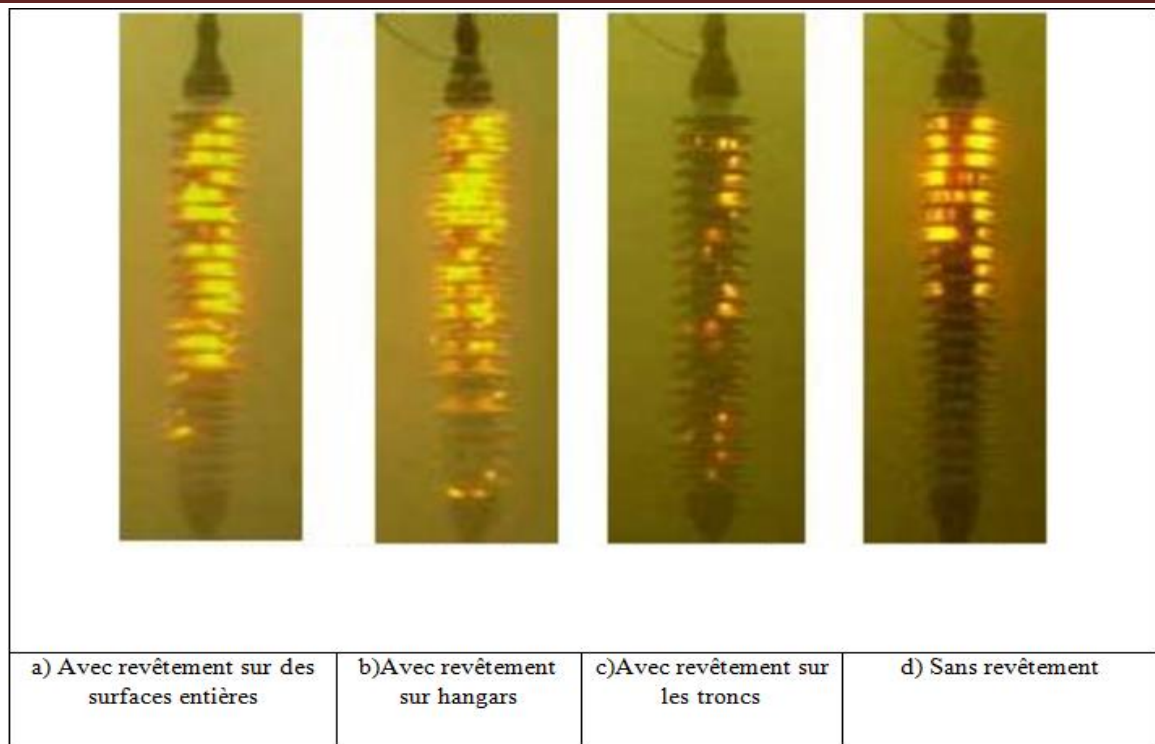


Figure II.23. Activités de décharge.

### II.3. Conclusion

L'avancée du champ de recherche a facilité l'accès à diverses technologies émergentes qui contribuent à rehausser la fiabilité d'un système électrique. Parmi les méthodes actuellement les plus performantes pour évaluer la gravité de la pollution des isolateurs, on trouve principalement l'application pratique des techniques de traitement du signal sur les formes d'onde du courant de fuite. Ces résultats permettent des différents travaux antérieurs effectuée dans le présent chapitre nous permet de nous inspirer sur l'application de ces méthodes dans le domaine de haute tension et spécialement pour améliorer les performances des isolateurs.

**CHAPITRE III:**  
**ETUDE ET RÉSULTATS**  
**EXPÉRIMENTALE**

### **III.1. Introduction**

Une conception récemment proposée pour les isolateurs, consistant en un ensemble de protubérances hémisphériques, vise à réduire la dissipation de puissance en réduisant à la fois le champ électrique  $E$  et la densité de courant de fuite  $J$ , et à augmenter la longueur de fuite longitudinale sans augmenter la longueur totale de l'isolateur. De plus, la formation de chemins de courant parallèles pourrait entraîner des décharges moins nocives. Les rapports initiaux ont montré que l'introduction d'une telle texture de surface a entraîné une performance améliorée par rapport aux échantillons conventionnels à surface lisse.

Les matériaux destinés à être utilisés pour l'isolation en extérieur doivent être testés pour leur capacité à résister à l'érosion et au suivi de surface. Le test incliné-plan, est un test de vieillissement accéléré où des échantillons rectangulaires sont soumis à un stress électrique sévère afin d'étudier la performance des matériaux contre l'érosion et le suivi de surface. Dans ce chapitre, nous étudierons des expériences sur deux échantillons en plastique en utilisant une surface plane traditionnelle et une surface tissée pour effectuer une comparaison.

### **III.2. Dispositif expérimental**

#### **III.2.1. Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université d'El Oued)**

Les essais sont effectués dans le laboratoire de haute tension de l'université d'El Oued.

Notre laboratoire est constitué des trois sources de tensions:

- Une source de tension à fréquence industrielle 50Hz.
- un générateur de tension continue.
- un générateur de tension impulsion elle.

##### **III.2.1.1. Équipement de la station d'essai**

La station d'essai de notre laboratoire comprend les organes suivants :

- Un transformateur d'essai.
- Un transformateur de réglage.
- Des diviseurs de tension.
- Un pupitre de commande et des appareils de mesure et de protection.

- Un oscilloscope numérique.
- Appareil de mesure de la conductivité.

### III.2.1.2. Transformateur d'essai

Nous avons utilisé un transformateur d'essai conçu et isolé pour la génération de haute tension. Il a un rapport de transformation de 250V / 100kV, avec une puissance de 5 kV. Ce transformateur permet la variation de la haute tension au secondaire de 0 à pleine tension.

### III.2.1.3. Transformateur de réglage

Nous permettons la variation de la tension aux bornes du transformateur d'essai. Son rapport de transformation est de 220V/250V.

### III.2.1.4. Oscilloscope numérique

C'est un appareil qui permet de donner la forme de l'onde. Les phénomènes enregistrés. Figure III.1.



Figure III.1. Oscilloscope numérique.

### III.2.1.5. Pupitre de commande

Ce pupitre est alimenté sous une tension de 220V. Ce pupitre nous permettons la variation automatique de la tension d'essai. Figure III.2.



Figure III.2. Photo du pupitre de commande du laboratoire de haute tension de l'université d'El Oued.

### III.2.1.6. Appareils de mesure et de protection

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un pupitre de commande situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essai (la cage de faraday). Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250A. Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

Pour les mesures de tension on a :

DSM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension alternatif.

DGM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension continue.

Un voltmètre et ampèremètre pour mesurer de la tension primaire au niveau du transformateur d'essai.

### III.2.1.7. Diviseur de tension

Il existe deux diviseurs de tension :

- Un diviseur de tension capacitif pour la mesure de la tension à fréquence industrielle.
- Un diviseur de tension résistif pour la mesure de la tension continue.

### III.2.1.8. Circuit d'essai à tension alternatif

Les générateurs de haute tension alternative à fréquence industrielle, situés entre quelques Hz et 1 kHz, on utilisera généralement les transformateurs élévateurs.

Les générateurs de haute tension alternative à fréquence industrielle sont utilisés pour:

- Les essais à haute tension alternative (transformateurs haute tension).
- L'alimentation (transformateurs haute tension) des redresseurs à courant continu, des générateurs à circuit oscillant et des générateurs de choc.

La figure III.3 représente le circuit d'essai à tension alternatif réalisé au laboratoire de haute tension et la figure III.4 est une photo concordante du montage réalisé au laboratoire de haute tension.

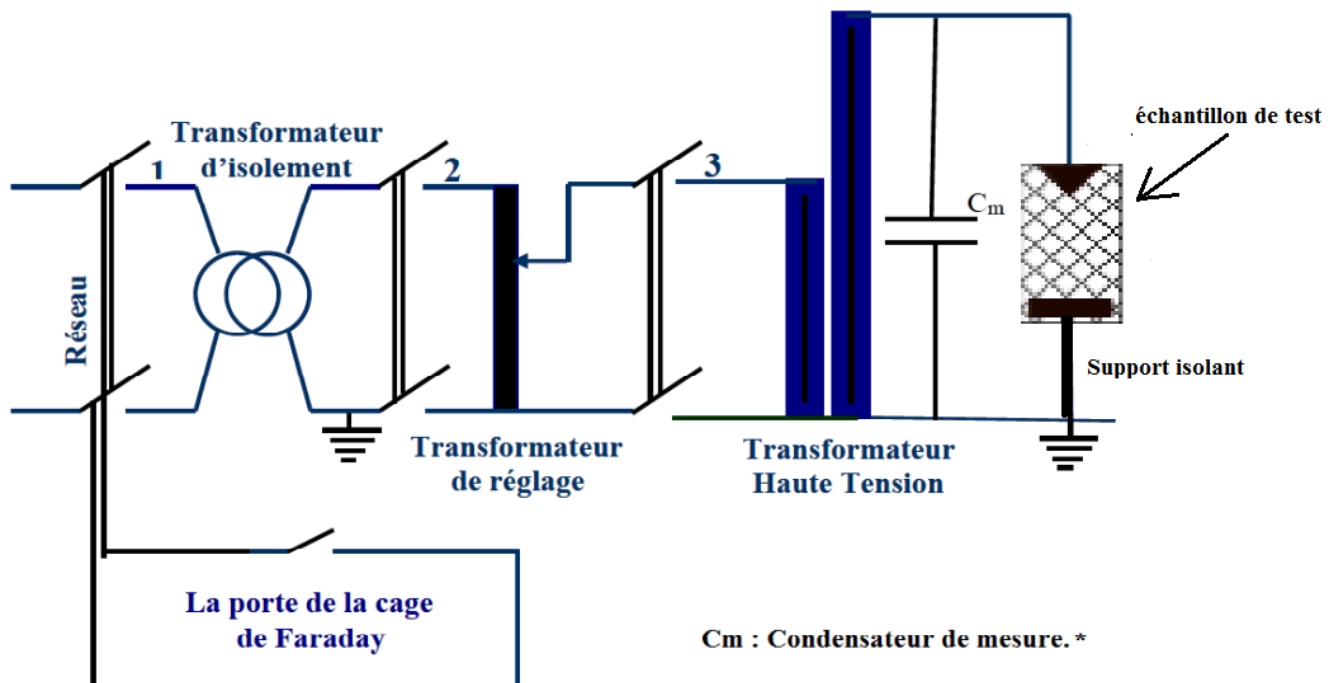


Figure III.3. Circuit d'essai à fréquence industrielle.



**Figure III.4.** Photo du circuit d'essai à fréquence industrielle.

### III.3. Mode opératoire

La plupart des travaux considèrent des modèles expérimentaux de géométrie simple et rarement le profil d'un isolateur réel. Cependant, si ces modèles équivalents ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent, par contre, une meilleure visualisation du phénomène de décharge électrique.

#### III.3.1. Modèle expérimental

Des échantillons rectangulaires en plastique ont été fabriqués. Les dimensions étaient de 120 mm x 50 mm x 6 mm. Deux échantillons ont été préparés, un échantillon traditionnel non-tissé et un échantillon tissé. Les longueurs et les largeurs des échantillons sont indiquées dans la Figure 4.

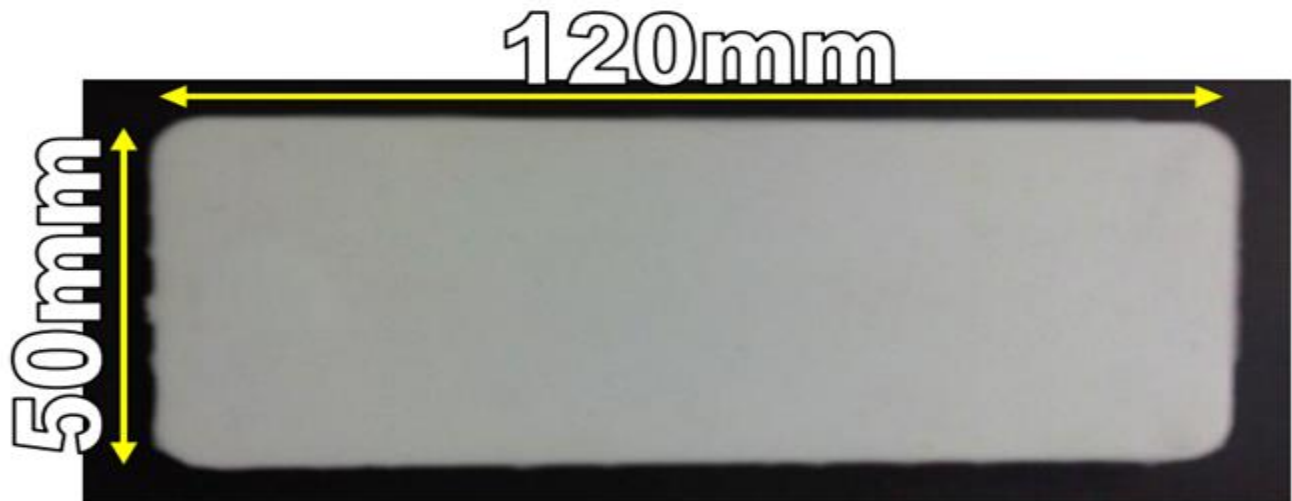


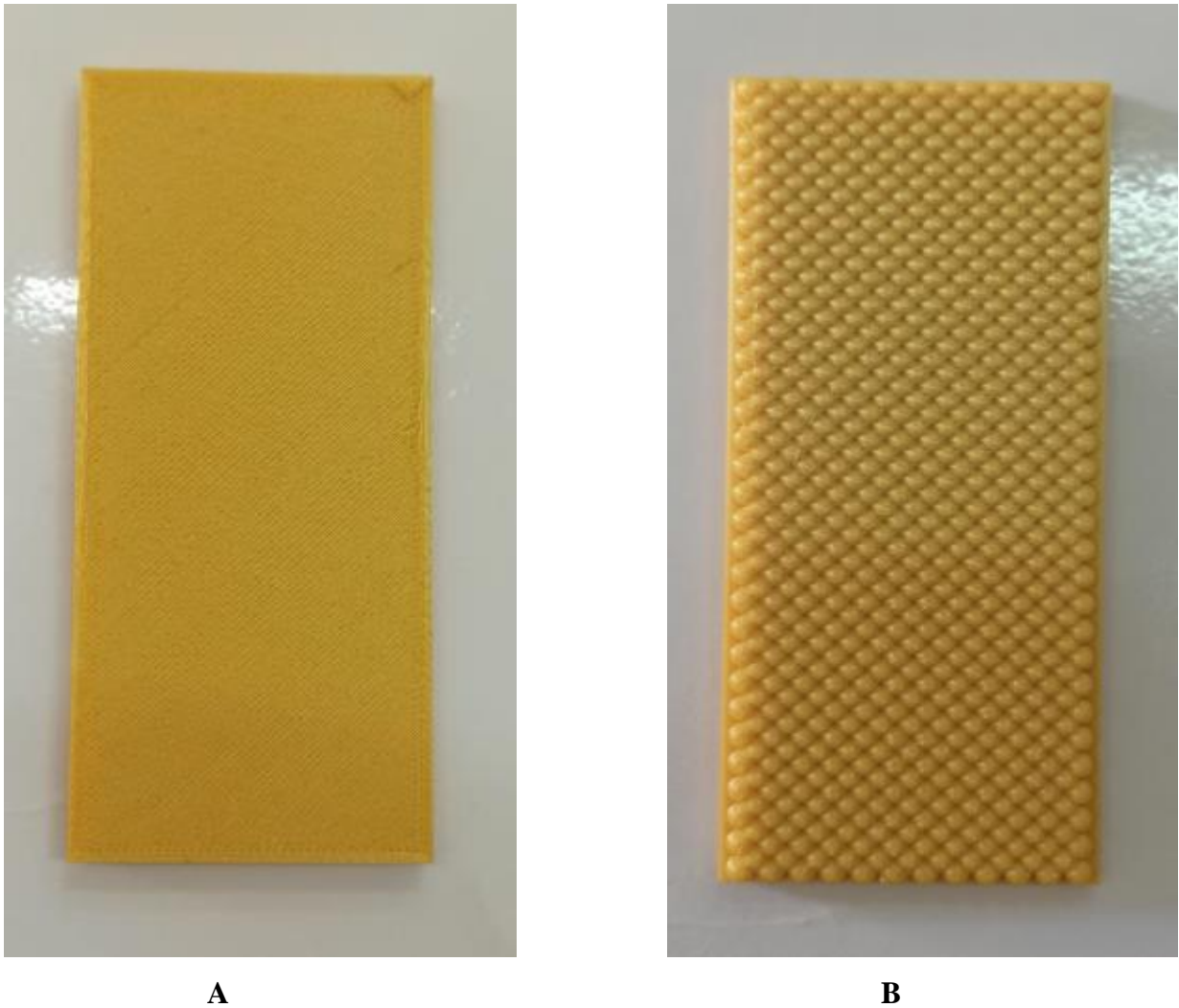
Figure III.5.Échantillon conventionnel non texturé.

### III.3.2. Préparation du modèle

Avant chaque série d'essais, la plaque isolante est soigneusement nettoyée, puis imprégnée gaz oil dans les zones où les électrodes en acier galvanisé seront placées, afin de garantir un contact étroit entre la plaque et les électrodes, sans laisser d'espace d'air. Ensuite, la plaque est essuyée à l'aide de coton imbibé d'alcool pour éliminer tout résidu gaz oil sur la surface isolante. Enfin, le modèle est placé horizontalement sur un support isolant.

### III.3.3. Les configurations utilisées lors des essais ont été adoptées

- Configuration A : échantillon conventionnel non texturé
- Configuration B : carrés intersections



**Figure III.6.** (A)échantillon conventionnel non texturé, et (B) exemple d'intersections carrées.

### **III.4. Procédé d'essai**

L'objectif de ces essais est d'étudier comment le courant de fuite et la tension de contournement évoluent en fonction des paramètres électro géométrique appliqués sur le modèle de laboratoire.

#### **III.4.1. Mesure de la tension de contournement**

La détermination de la tension de contournement (représentant la moyenne arithmétique des trois 3 valeurs) à partir des deux échantillons.

Ces mesures permettent de déterminer les niveaux de tension limite qui seront appliqués pour mesurer le courant de fuite.

### III.4.2 Mesure du courant de fuite

Pour différents paliers allant de 5kV à 20kV par pas de 5kV et pour chaque configuration, l'amplitude du courant de fuite est déterminée par l'intermédiaire de la tension captée aux bornes d'une résistance non inductive de 10 K $\Omega$  insérée dans le retour de terre. Pour cela, nous avons utilisé un oscilloscope à mémoire dont la bande passante est de 25MHz. Afin d'éviter toute influence des parasites dans le signal capté, nous introduisons la résistance dans une boîte métallique en aluminium mise à la terre, formant ainsi un écran électrostatique.

### III.5. Correction atmosphérique

Pour chaque essai que on effectuée on prenant les conditions atmosphériques par un appareil spécial électronique qui est présenter par la figure 7 III.



**Figure III.7.** Instrument de mesure pour les conditions atmosphériques (Humidité, température et pression).

### III.5.1. Influence de la densité relative de l'air

La température et la pression, influent sur la rigidité diélectrique de l'air. Dans la CEI 60 (Commission d'Electrotechnique Internationale), nous trouvons la notion de densité relative qui est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pressions (P) et de température (T), à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

- Température ambiante  $T_0 = 28C^\circ$ .
- Pression atmosphérique  $P_0 = 1008 \text{ mbar} (= 756 \text{ mm Hg})$ .

$$\partial = 0.289 \frac{p}{273 + T}$$

$\partial$ : Facteur de correction de la densité du l'air.

La pression P est en mbar et la température T en  $C^\circ$ .

Cette équation est utilisée pour convertir la tension de décharge  $U_m$  mesurée dans les conditions atmosphériques d'essais (température T et pression P) à la valeur  $U_{cr}$  qui aurait été obtenue dans les conditions normales ( $T_0$  et  $P_0$ ) :

$$U_{cr} = \frac{U_m}{(\partial)^n} \quad n \leq 1$$

L'exposant n dépend de la forme d'onde, de la longueur d'intervalle et de la position des électrodes.

### III.5.2. Influence de l'humidité

Dans le cas des ondes rapides ou très rapides, comme celles causées par la foudre, la tension d'amorçage est moins sensible aux variations d'humidité. Par conséquent, lors de nos essais, où l'humidité relative variait entre 34% et 56%, nous n'avons pas pris en compte cet aspect.

## III.6. Résultats

Nous étudions ci-dessous l'effet des échantillons de plastique rectangulaires tissés et non tissés sur le comportement du modèle de laboratoire. Les résultats expérimentaux concernent les évolutions de la tension et du courant de fuite. Une gamme de paramètres a été appliquée au modèle expérimental,

notamment l'impact des liquides sur le comportement de l'isolant en fonction de différentes conductivités et du niveau de tension appliqué.

### III.6.1. Tension de contournement

#### III.6.1.1. échantillon conventionnel non texturé

Le tableau suivant représente la variation de la tension de contournement sans présence de pollué et dans les cas présence de pollué, avec un changement de valeur de la conductivité. La tension augmente lorsque la valeur de la conductivité diminue dans la solution.

**Tableau III.1** Variation de tension du contournement configuration A.

La condition	sèche	Conductivité A	Conductivité B	Conductivité C	Conductivité D
Conductivité		2.34	5.03	7.73	9.14
Tension de contournement[KV]	45.22	19.33	15.08	8.28	1.24

#### III.6.1.1.1. Visualisations réels des arcs de contournement en laboratoire de haute tension(échantillon non texturé)



**Figure III.8.** Photo réel de contournement des déférentes configurations sèche, configuration A .



A



B



C



D

**Figure III. 9.** Photo réel de contournement des différentes configurations avec pollué ,configuration A .

L'histogramme en figure (III. 10) représente la variation de la tension de contournement.

Nous avons observé une augmentation de la tension de contournement avec une diminution du taux de conductivité dans le pollué.

### Configuration A

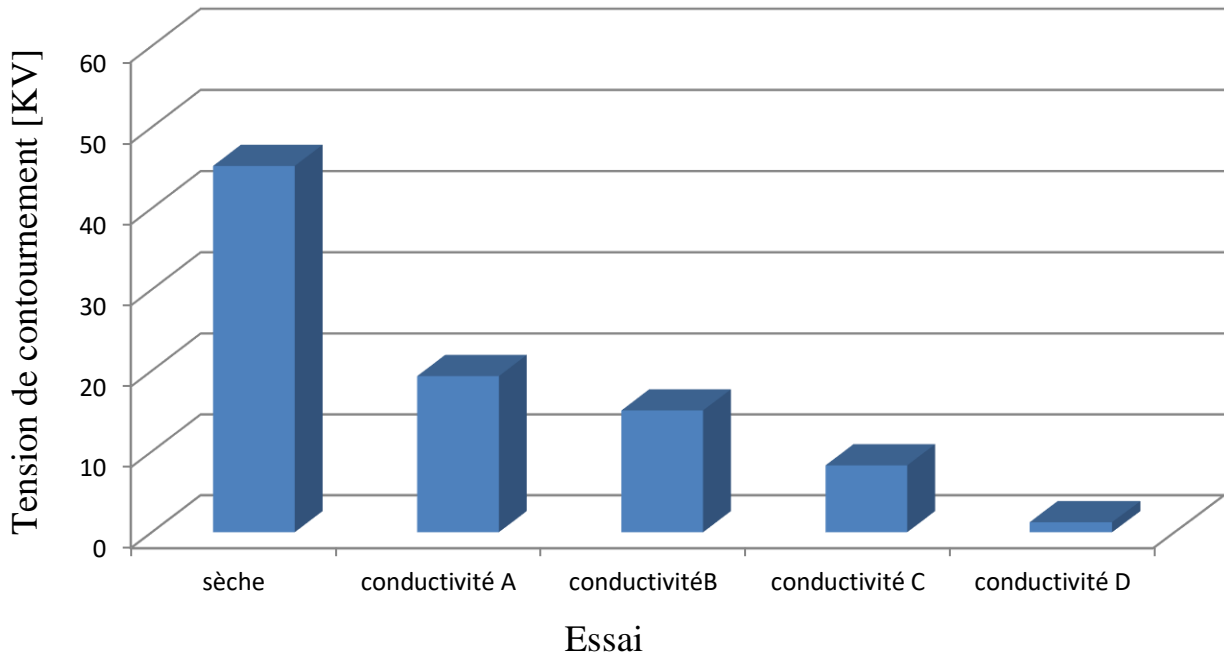


Figure III. 10. Histogramme la variation de tension de contournement en configuration A .

#### III.6.1.2. Exemple d'intersections carrées

Le tableau suivant représente la variation de la tension de contournement sans présence de pollué et dans les cas présence de pollué, avec un changement de valeur de la conductivité. La tension augmente lorsque la valeur de la conductivité diminue dans la solution.

Tableau III.2.Variation de tension du contournement configuration B.

La condition	sèche	conductivité A	conductivité B	conductivité C	conductivité D
conductivité		2.34	5.03	7.73	9.14
Tension de contournement[KV]	58.59	27.83	17.06	12.40	4.77

III.6.1.2.1. Visualisations réels des arcs de contournement en laboratoire de haute tension (échantillon texturé)



Figure III. 11. Photo réel de contournement des déférentes configurations sèche ,configuration B.



A



B



C

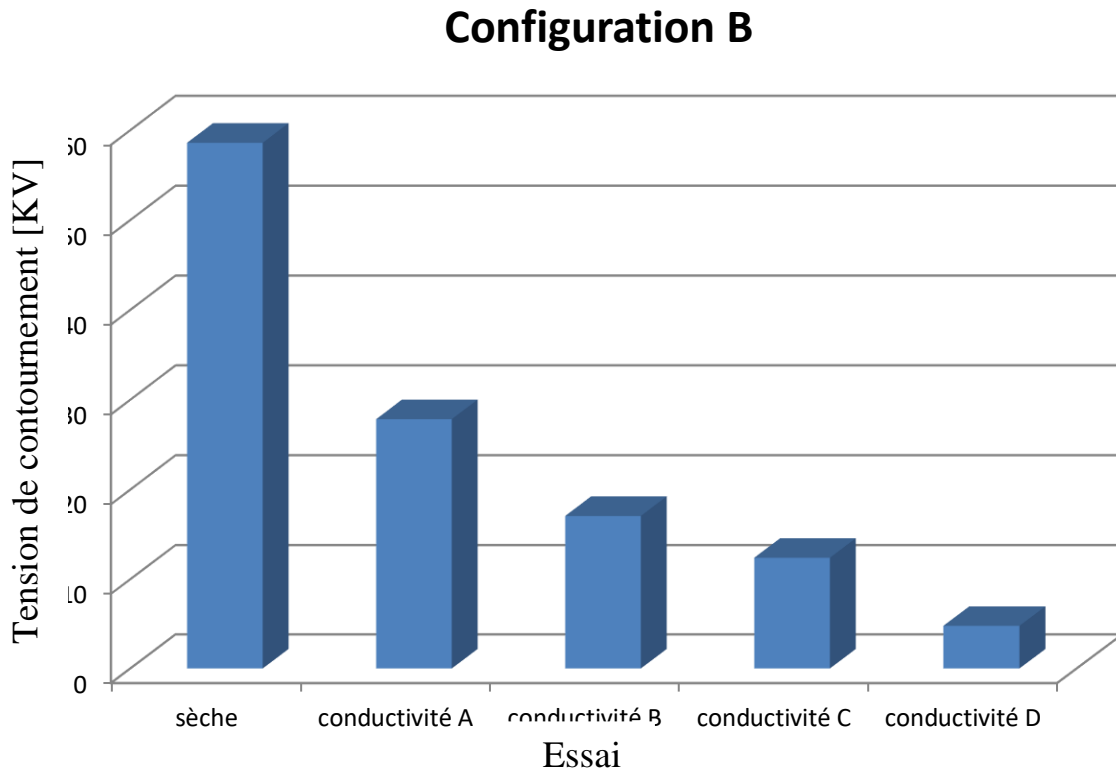


D

Figure III. 12. Photo réel de contournement des déférentes configurations avec pollué ,configuration B .

L'histogramme en figure III. 13 représente la variation de la tension de contournement.

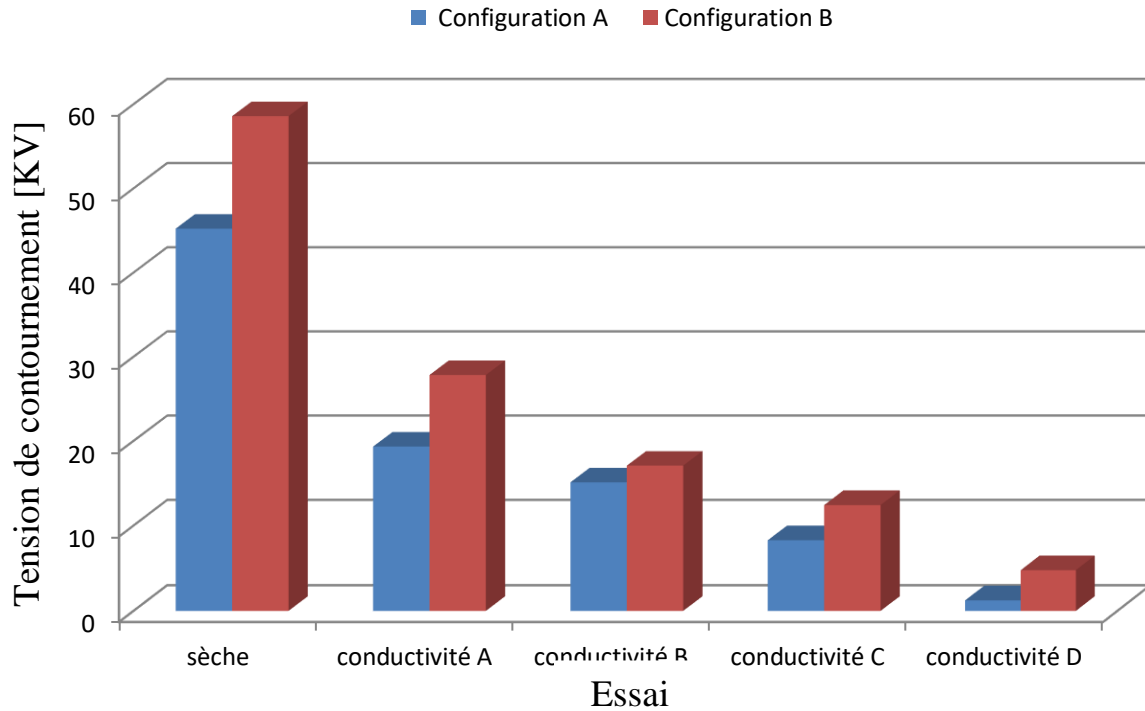
Nous avons observé une augmentation de la tension de contournement avec une diminution du taux de conductivité dans le pollué.



**Figure III.13.** Histogramme la variation de tension de contournement en configuration B .

#### III.6.1.3. Comparaison

L'histogramme en figure III. 14 représente comparaison de tension de contournement entre échantillon non texturé (configuration A) et échantillon texturé (configuration B) .



**Figure III.14.** Histogramme pour comparer la tension de contournement entre configuration A et configuration B.

Nous constatons que dans le cas de la configuration B, la tension est plus élevée que dans la configuration A, ce qui signifie que la configuration B supporte une charge supérieure à la configuration A.

Par conséquent, l'échantillon texturé est meilleur que l'échantillon non texturé, car la tension dans l'échantillon texturé est plus élevée que dans l'échantillon non texturé à toutes les étapes.

### III.6.2. Courant de fuite

Nous étudions ici l'impact des échantillons sur la valeur du courant de fuite. Par conséquent, différents niveaux de tension ont été considérés.

$$I = \frac{V}{R}$$

$$R = 10 \text{ K}\Omega$$

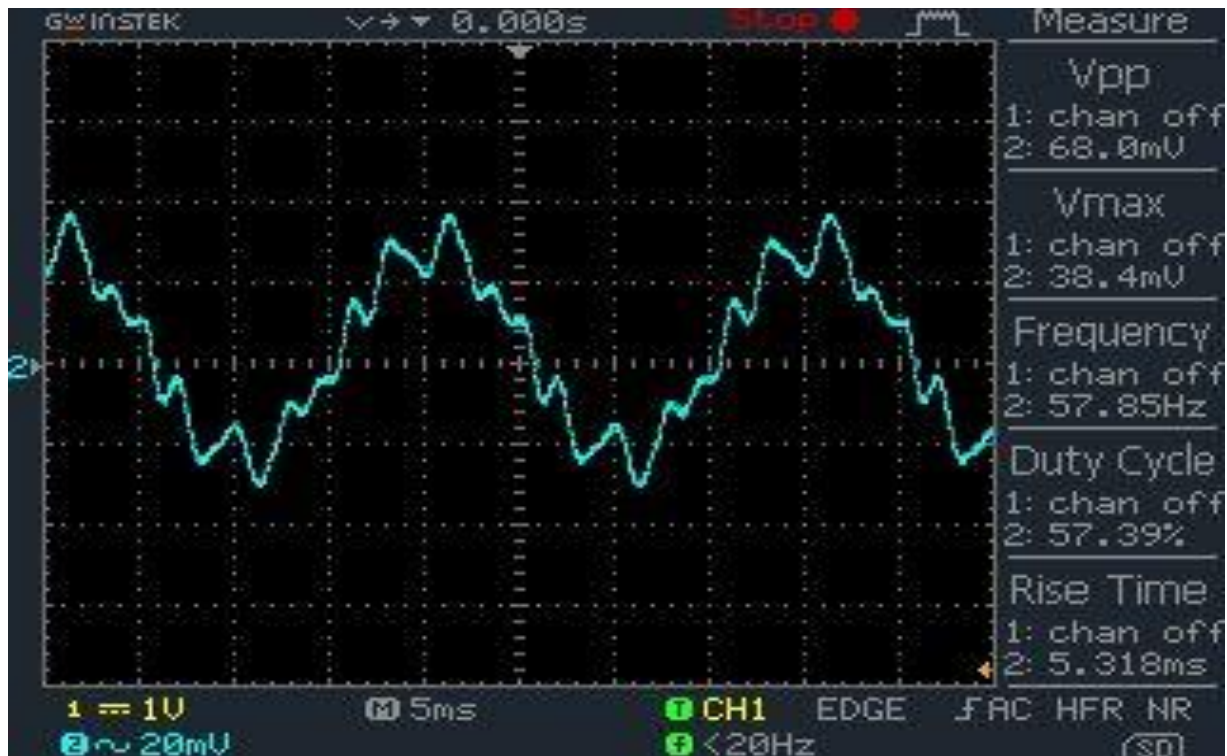
### III.6.2.1. échantillon conventionnel non texturé

Les courbes suivantes mettent en évidence les variations du courant de fuite en fonction de la tension appliquée sur échantillon non texturé (configuration A), ainsi qu'en présence du conductivité A.

a. *l'échantillon traditionnel de non-tissé sèche*

- Dans la cas de 5 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 3.84 \mu\text{A}$



**Figure III.15.** Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 5 KV sèche.

- Dans le cas de 10 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 10.6 \mu\text{A}$

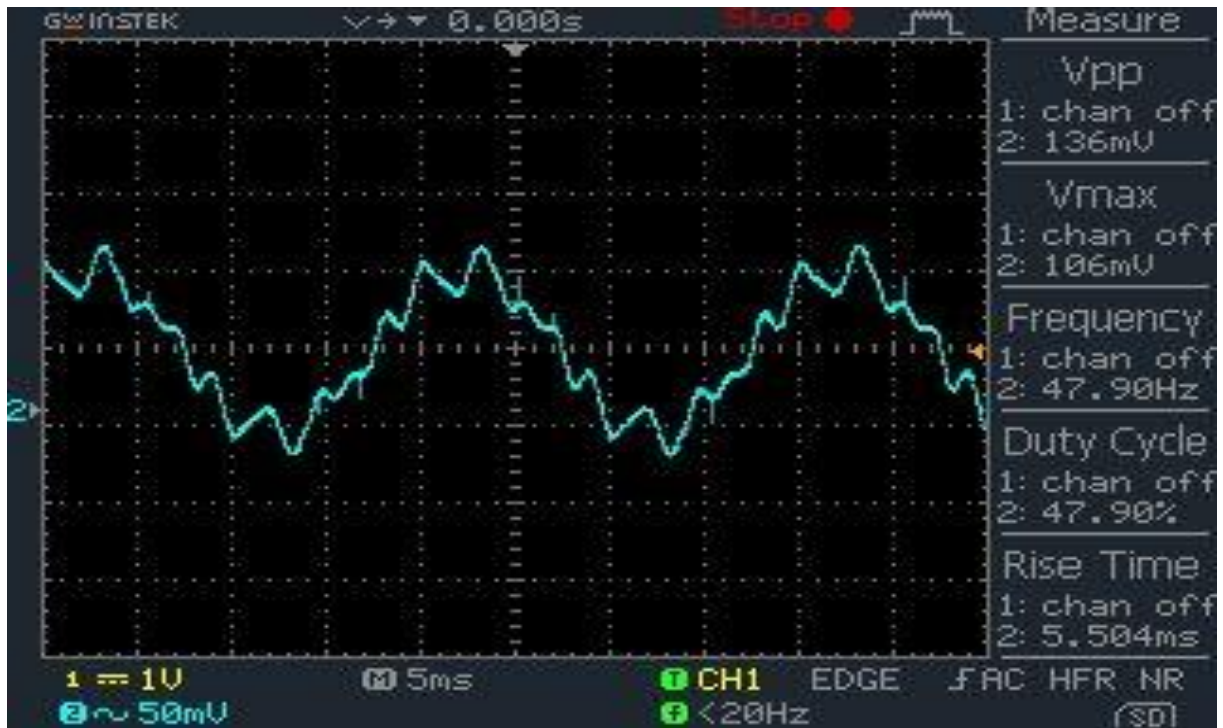


Figure III.16. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 10 KV sèche.

- Dans le cas de 15 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 15.6 \mu\text{A}$

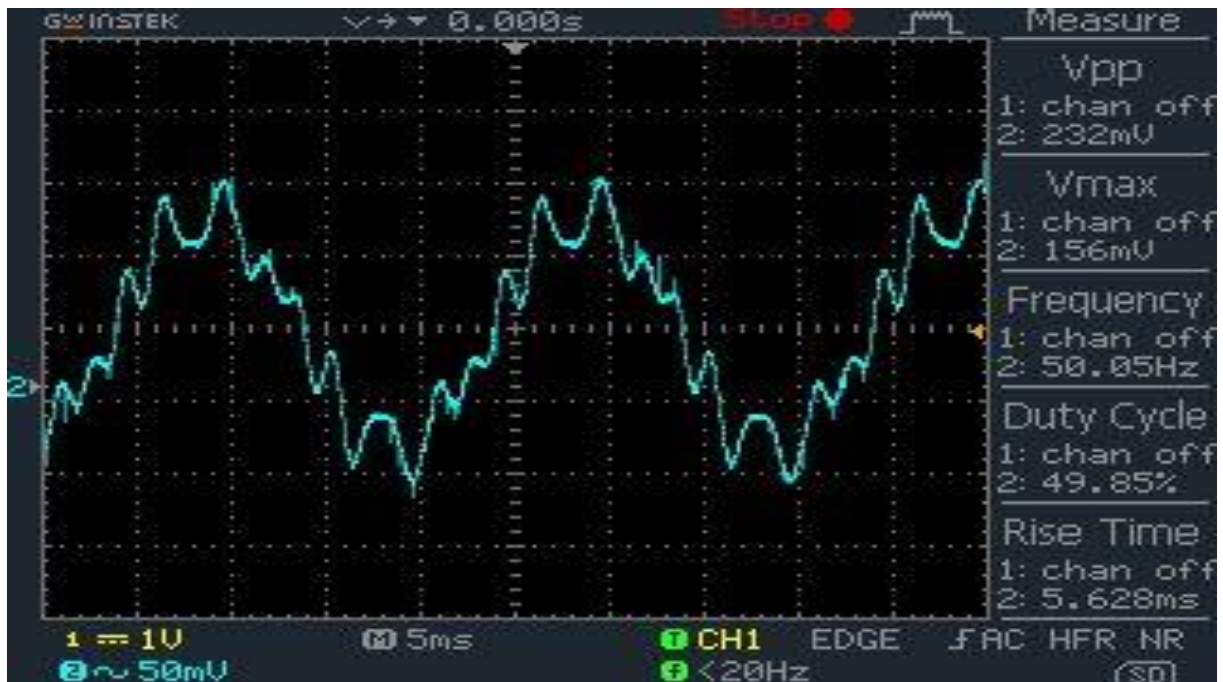
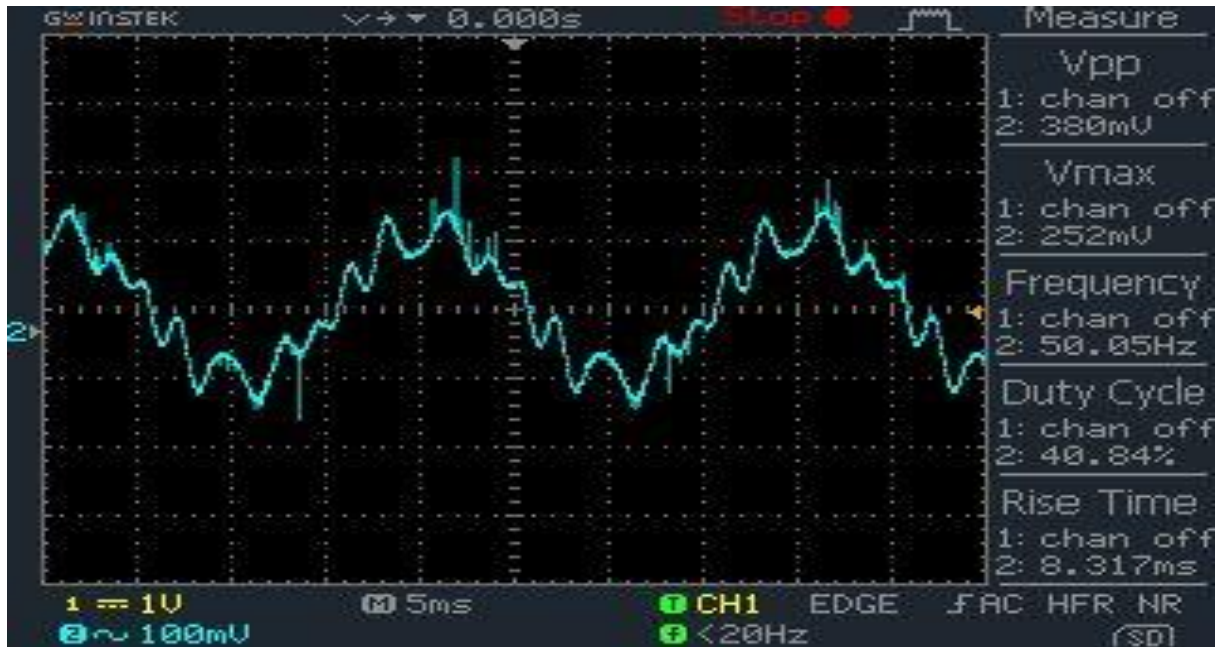


Figure III.17. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 15 KV sèche.

- Dans le cas de 20 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 25.2 \mu\text{A}$



**Figure III.18.** Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 20KV sèche.

- Nous constatons dans cette étude que dans des conditions sèches, plus la tension augmente, plus le courant de fuite augmente.

*b. l'échantillon traditionnel non-tissé avec pollué*

- Dans le cas de 3 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 8 \mu\text{A}$



Figure III.19. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 3 KV avec pollué.

- Dans le cas de 7 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 25.6 \mu\text{A}$

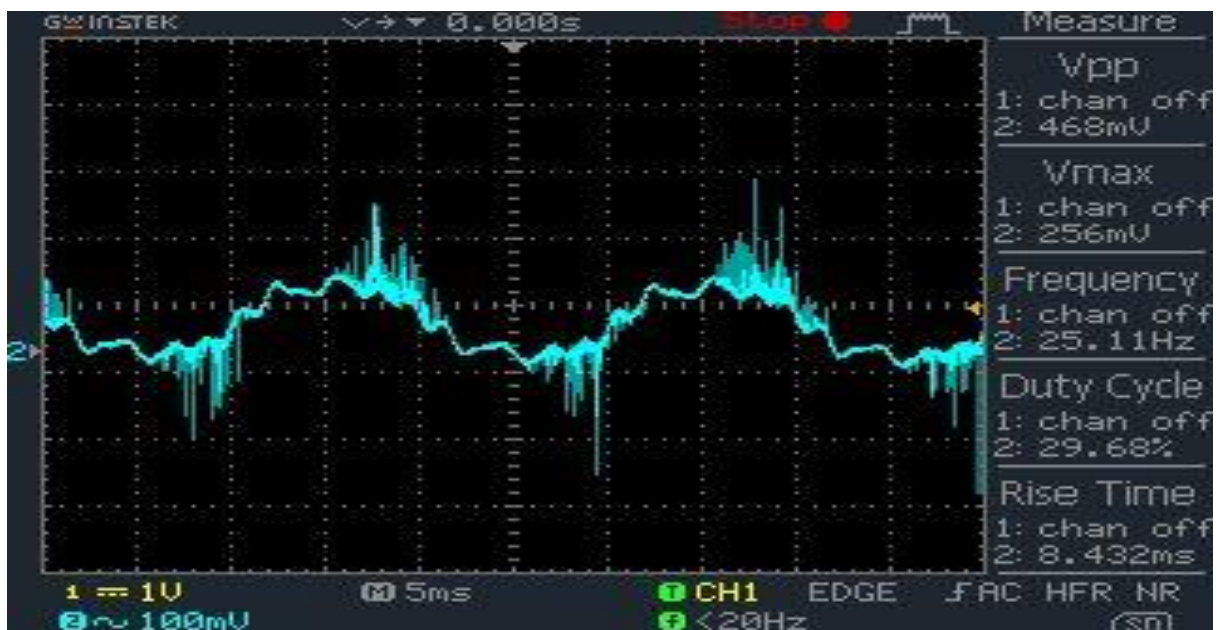
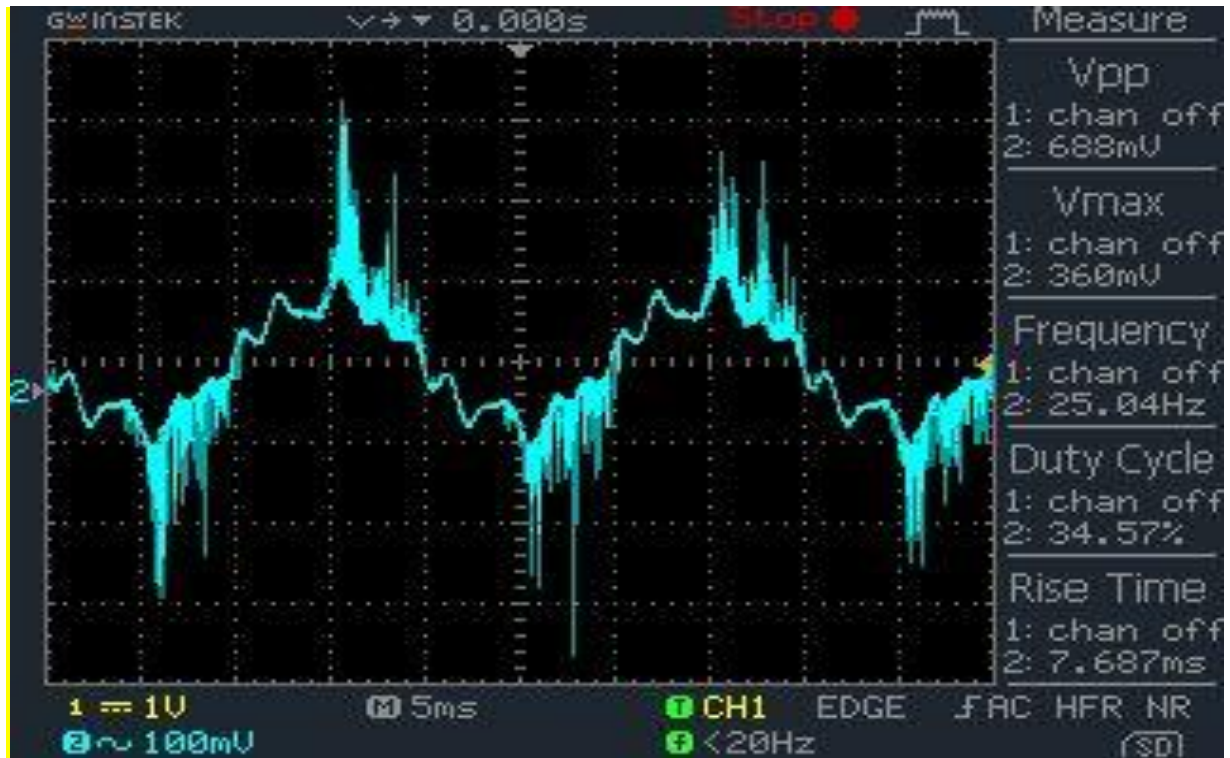


Figure III.20. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 7 KV avec pollué.

- Dans le cas de 10 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 36 \mu\text{A}$



**Figure III.21.** Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration A à 10 KV avec pollué .

- Nous constatons dans cette étude que dans des conditions sèches, plus la tension augmente, plus le courant de fuite augmente.

### III.6.2.2. échantillon tissé

Les courbes suivantes montrent les variations du courant de fuite en fonction de la tension appliquée sur l'échantillon tissé (configuration B), ainsi qu'en présence du conductivité A .

#### a. l'échantillon tissé sèche

- Dans le cas de 5 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 3.92 \mu\text{A}$

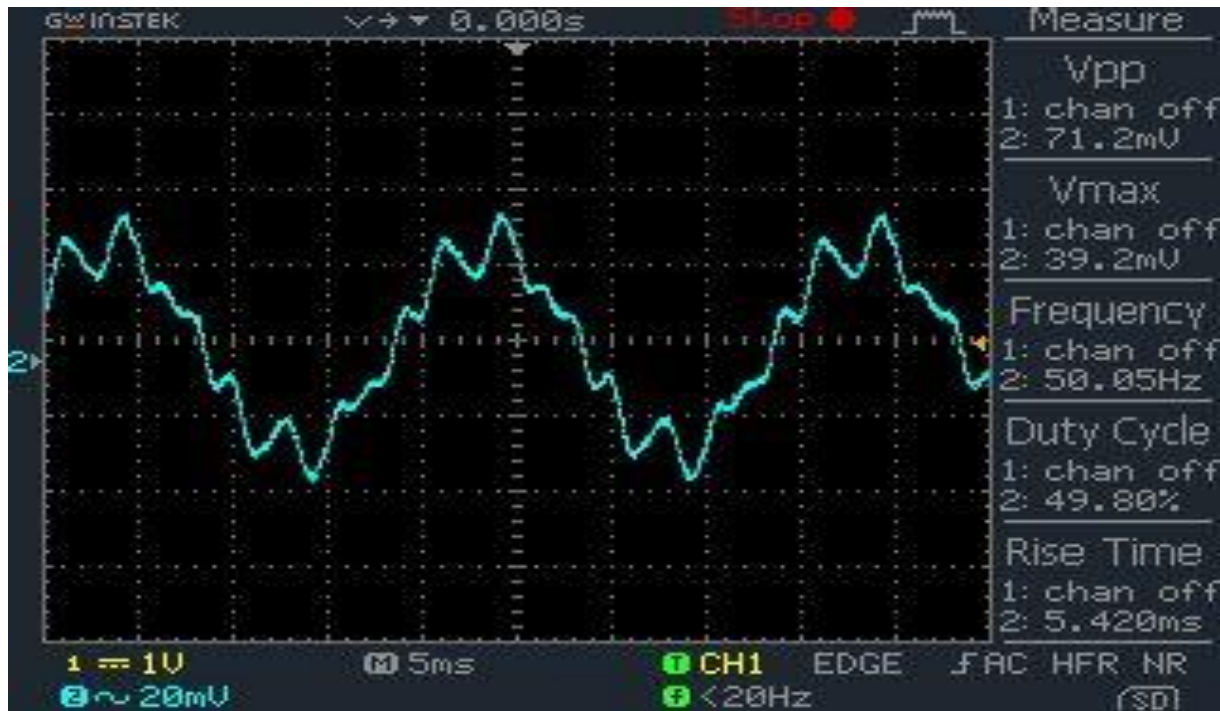


Figure III.22. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 5 KV sèche.

- Dans le cas de 10 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 11 \mu A$

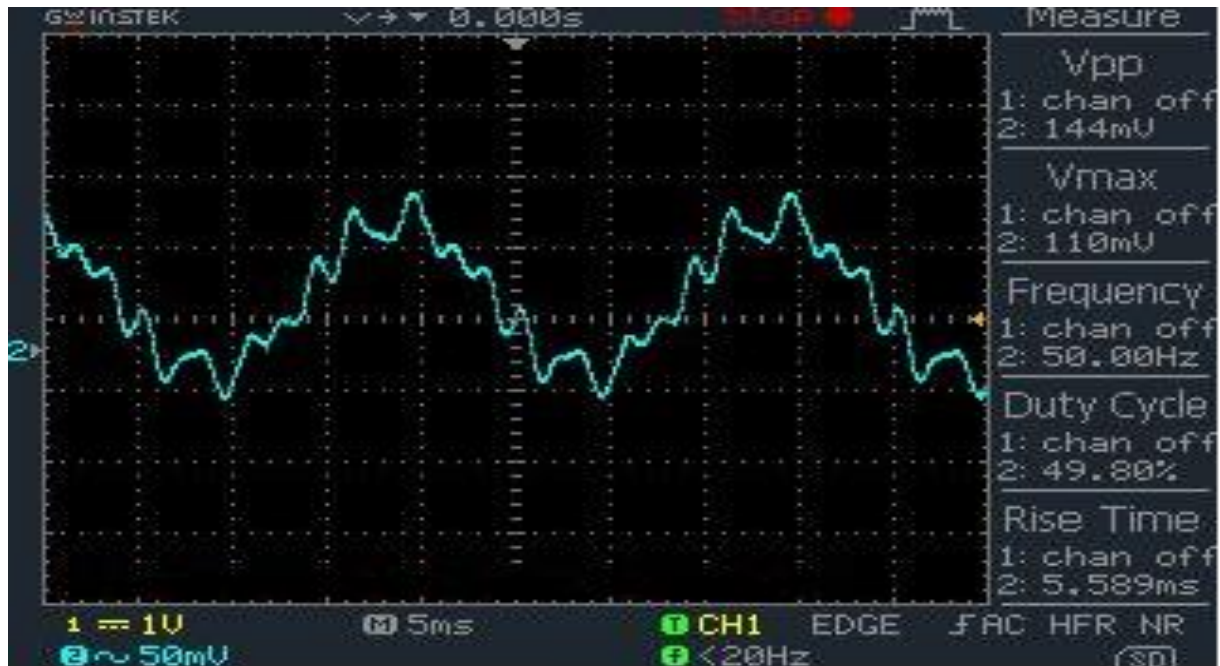
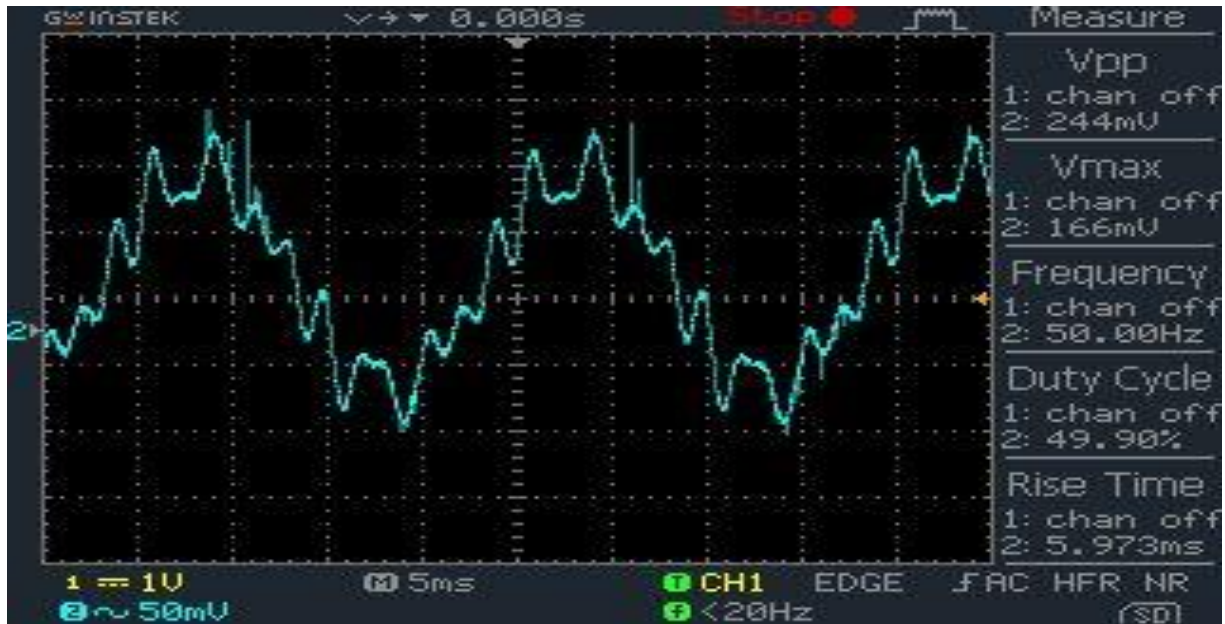


Figure III.23. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 10 KV sèche

- Dans le cas de 15 KV

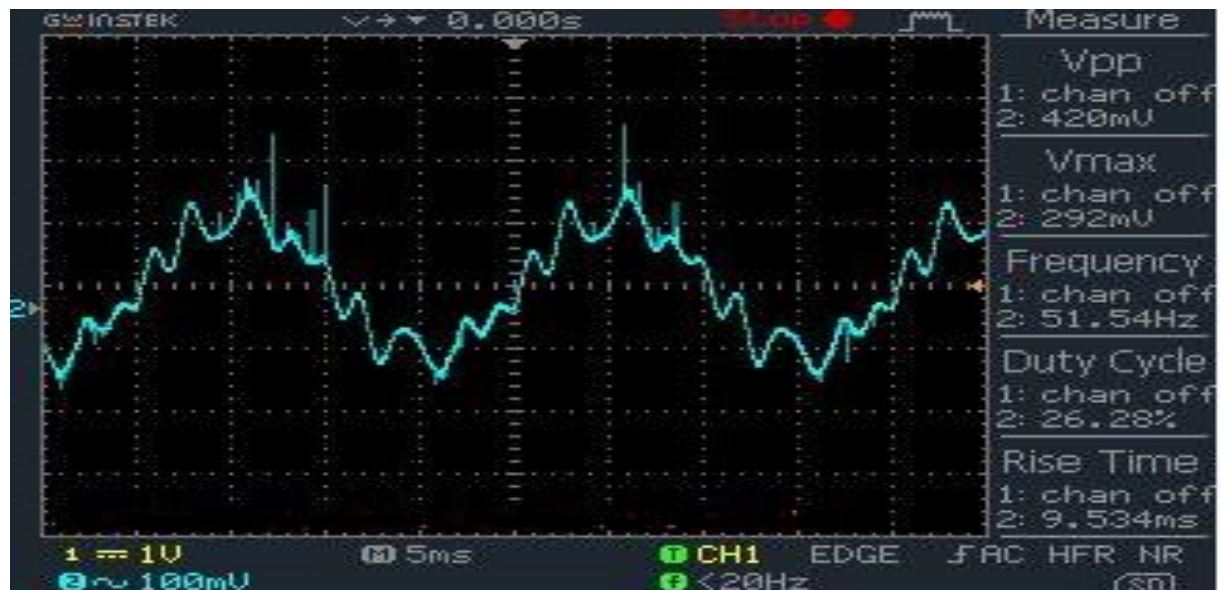
La valeur du courant de fuite est  $I = 16.6 \mu\text{A}$



**Figure III.24.** Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 15 KV sèche.

- Dans le cas de 20 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 29.2 \mu\text{A}$



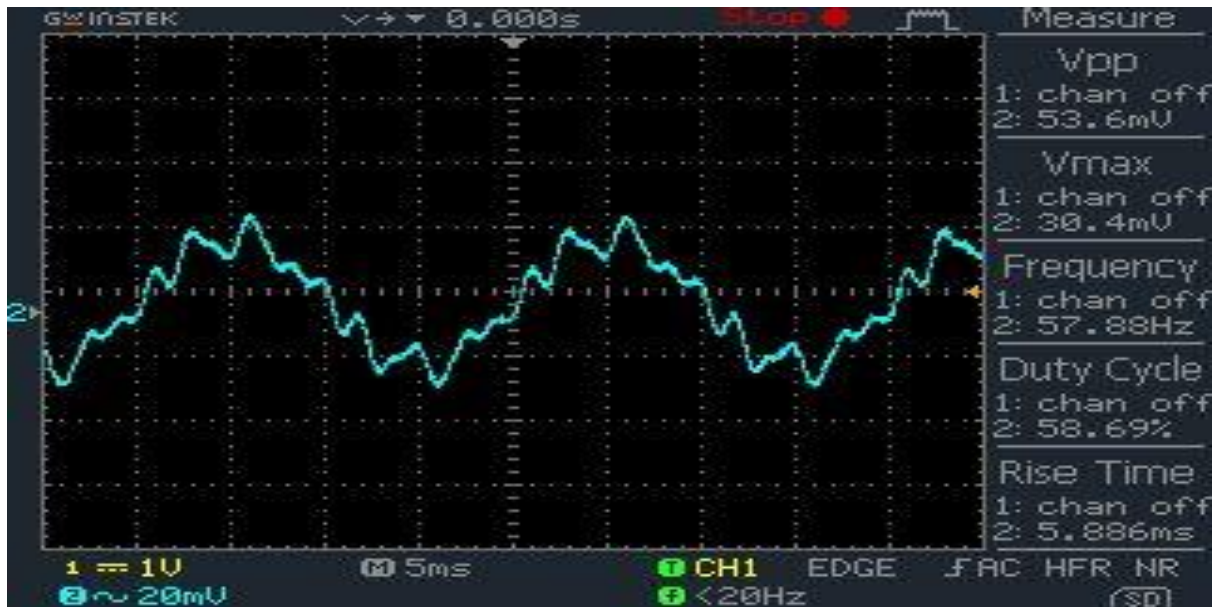
**Figure III.25.** Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 20 KV sèche .

- Nous constatons dans cette étude que dans des conditions sèches, plus la tension augmente, plus le courant de fuite augmente.

*b. l'échantillon tissé avec pollué*

- Dans le cas de 3 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 3.04 \mu\text{A}$



**Figure III.26.** Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 3KV avec pollué.

- Dans le cas de 7 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 9.2 \mu\text{A}$

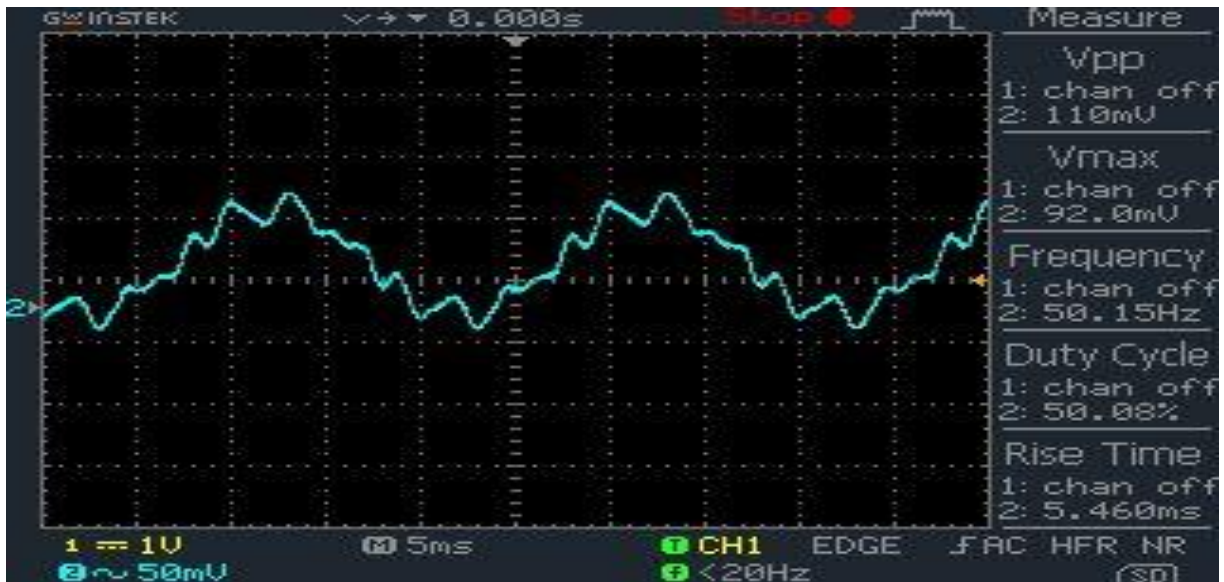


Figure III.27. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 7 KV avec pollué .

- Dans le cas de 10 KV

La valeur du courant de fuite est  $I = 14.6 \mu\text{A}$

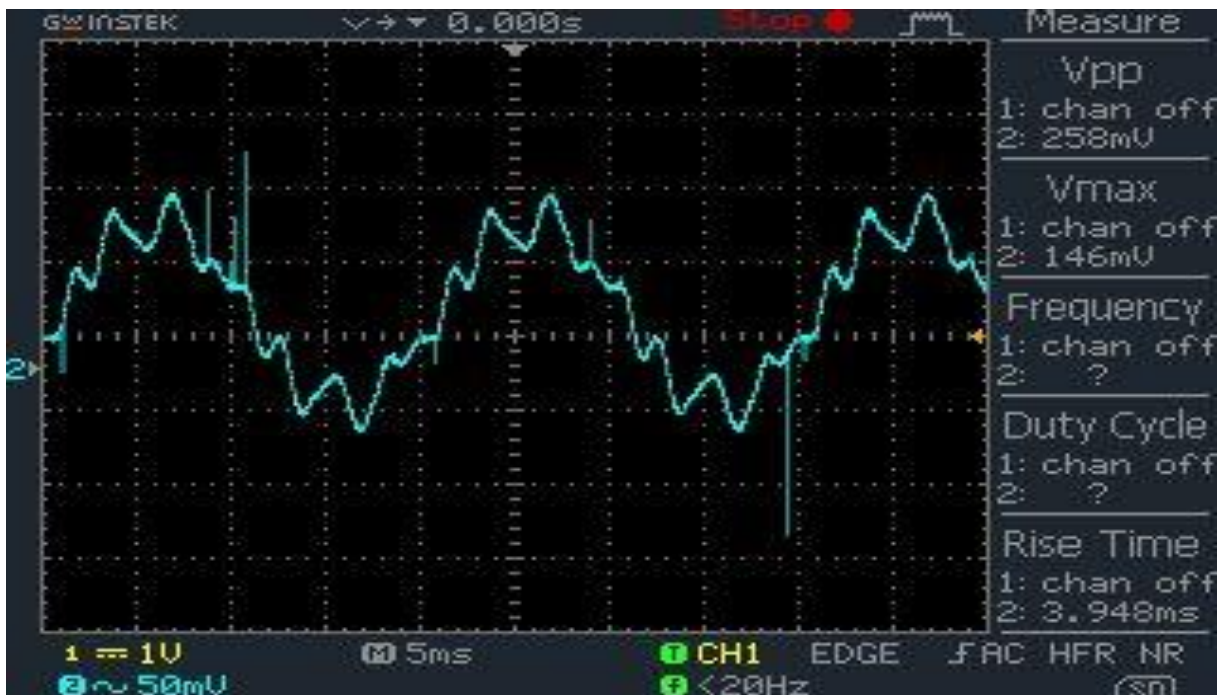


Figure III.28. Courbe graphique du courant de fuite dans le cas de la configuration B à 10 KV avec pollué.

- Nous constatons dans cette étude que dans des conditions sèches, plus la tension augmente, plus le courant de fuite augmente.

**✓ Remarque**

À partir de toutes les expériences que nous avons réalisées et des courbes mentionnées, nous constatons que plus la pollution augmente, plus le courant de fuite augmente. Dans le cas sèches, nous observons une convergence des résultats entre la échantillon non texturé et la échantillon texturé. Cependant, dans le cas pollué, le courant de fuite dans échantillon texturé est inférieur à celui de la échantillon non texturé.

**III.7. Conclusion**

Pour obtenir les résultats mentionnés ci-dessus, nous avons effectué plusieurs expériences sur deux échantillons différents (échantillon non texturé et échantillon texturé). Dans ce chapitre, nous avons comparé ces deux formations dans le but de trouver une méthode efficace pour améliorer l'isolation à des tensions élevées. Après plusieurs expériences en laboratoire, nous avons obtenu les résultats mentionnés ci-dessus, où nous avons remarqué à travers ces résultats que échantillon texturé est meilleure que échantillon non texturé. De cette étude, nous concluons que la forme de la formation joue un rôle important dans la performance de l'isolation. La présence d'obstacles isolants à la surface améliore l'efficacité de l'isolation. Le diamètre des protubérances semi-sphériques. leur hauteur et leur intersection affectent également le comportement isolant. Le courant de fuite augmente proportionnellement à la tension et diminue à mesure que le taux de conductivité diminue.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

### Conclusion Générale

Dans cette étude que nous avons menée, les tests réalisés au laboratoire de haute tension de l'Université d'El Oued avaient pour objectif d'étudier le comportement d'un modèle expérimental. Nous avons appliqué une tension alternative sur deux échantillons (un échantillon non tissé traditionnel et un échantillon tissé) et mesurer le courant de fuite sur les deux échantillons. Au cours des tests expérimentaux, nous avons étudié l'effet de ces échantillons sur la résistance de surface de l'isolant.

L'objectif spécifique de notre programme de recherche a été atteint, qui consiste à développer de nouveaux isolants offrant des performances améliorées à un coût économique. Dans le cadre de cette étude, un modèle amélioré a été développé, proposant ainsi un nouveau concept pour les surfaces isolantes.

Les principes de conception ont été définis et des tests préliminaires en laboratoire ont été effectués sur des échantillons rectangulaires. Les résultats obtenus jusqu'à présent sont prometteurs sous plusieurs aspects. Il a été constaté une diminution de la rugosité de surface et des taux de corrosion.

L'application de cette technologie peut avoir un impact significatif sur la promotion de la durabilité et l'économie d'énergie dans les systèmes électriques. Cette recherche constitue une étape importante vers le développement et l'amélioration des isolants à haute tension. Ces découvertes et améliorations dans le domaine de la conception des isolants représentent un point de départ crucial pour améliorer les performances des réseaux électriques et pour une transition vers un avenir plus durable et efficace dans le domaine du transport et de la distribution d'électricité.

De notre point de vue, nous espérons que les futurs projets de fin d'études élargiront notre travail en améliorant les performances de l'isolation externe de l'isolant composite en utilisant d'autres matériaux tels que la silicone, polymère etc.

# **BIBLIOGRAPHIQUES**

## Bibliographiques

- [1] **F. Meghnefi**, Etude temporelle et fréquentielle du courant de fuite des isolateurs de poste recouverts de glace en vue de développement d'un système de surveillance et de prédiction en temps réel du contournement électrique, Thèse présentée à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ingénierie, 2007.
- [2] **N. Mhaguen**, Développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis, Thèse présentée à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, 2011.
- [3] **J. F. Hall**, History and Bibliography of Polymeric Insulators for Outdoor Applications, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 376–385, 1993.
- [4] **S. M. Gubanski and A. E. Vlastos**, Wettability of naturally aged silicon and EPDM composite insulators, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 5, no. 3, pp. 1527–1535, 1990.
- [5] **H Salah Eddine & A Mohamed Elfateh**, Estimation de la tension de contournement d'un isolateur capot et tige de haute tension artificiellement pollué en utilisant la logique floue, Mémoire master en génie électrique, Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2019.
- [6] **G. Leroy et al**, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, Edition Eyrolles, Paris, France, 1984.
- [7] **G. Riquel, E. SpanGenberg**, De la céramique au synthétique, EDF-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [8] S. VITET, La pollution des isolateurs, EDF-Epure, Juillet 1990.
- [9] **Boudjamaa Med Abdelhakim, Sebti Redouane**, Modélisation des phénomènes de pollution des isolateurs de haute tension, Diplôme de Master en Génie Electrique, Université KasdiMerbah
- [10] **M. Terkmani, M. Babouamer**, Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension, PFE, USTO, Oran, juin 2005.
- [11] **M<sup>elle</sup> Fatiha Aouabed**, Contribution A L'etude D'un Circuit Equivalent Des Isolateurs Synthétiques Sous Pollution En Utilisant L'emtp, Mémoire De Magister En Electrotechnique Université Ferhat Abbas SetifUfas (Algerie)
- [12] [http://www.tygesen-energi.dk/upload\\_dir/pics/tygesen-energi/produkter/glasisolatorer/Ny-2014-SGDLa-Granja-Glass-Insulators-Catalogue-EN-FR.pdf](http://www.tygesen-energi.dk/upload_dir/pics/tygesen-energi/produkter/glasisolatorer/Ny-2014-SGDLa-Granja-Glass-Insulators-Catalogue-EN-FR.pdf)
- [13] **M. Lamine D. Yacine**, Amélioration de rigidité diélectrique d'un isolateur de haute tension par le dépôt des barrières en verre, Mémoire master en génie électrique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued.

- [14] **A. Kara**, Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué, Mémoire magistère en électrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif, 2013.
- [15] **A.Tilmatine**, Isolateurs Des LignesAériennesHaute Tension, cours de haute tension, chapitre6.
- [16]**C.H.A. Ely, P.J. Lambeth, J.S.T. Looms, D.A. Swift, C.E.G.B**, Contournement des polymères humides et pollués : l'ailette BOOSTER, CIGRE, Rapport 15-02, Paris, France, 1978.
- [17]**A.Abimouloud**, Comportement d'une surface isolante partiellement polluée sous tension alternative 50 Hz, Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Décembre 1999.
- [18] **M. Tegar, A. Boubakeur**, 'Pollution des Isolateurs de Haute Tension, Cours 4<sup>ème</sup>Année, Département de Génie Electrique, ENP, Alger.
- [19] **Z. DJEMAI, F. BENNAI**, Essais sur Site et au Laboratoire d'Isolateurs Contamines par la Pollution Industrielle au Bord de la Mer , PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 1986.
- [20] **M. Tegar**, Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées, Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juillet 1993.
- [21]**M.Benakouche, R.Timghellette**, Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2005.
- [22] **QUILLET**, Encyclopédie des sciences industrielles, 1981
- [23]**Fatiha Aouabed**, Contribution A L'étude D'un Circuit Equivalent Des Isolateurs Synthétiques Sous Pollution En Utilisant L'emtp, Mémoire De Magister, Setif
- [24]**Ndoumbe Jean**, Étude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique , l'école doctorale Électronique, électrotechnique, Automatique De Lyon, L'école Centrale De Lyon, 2014.
- [25]**Dilmi. A, Maarouf. A**, Influence De La Pollution Sur Le Comportement D'un Modèle Plan D'isolateur Sous Haute Tension, Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme De Master, Département Génie Electrique, 2017
- [26]**M .Bouhamama**, Modélisation du contournement sur isolateur réel pollue, Thèse de doctorat en Sciences, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [27]**F. Aouabed**, Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP , Mémoire magistère en électrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif.

- [28] **B. Abdelghani**, Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue, Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira, Béjaia, 2009.
- [29] **A. Fatiha**, Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP, Mémoire du projet, Université Ferhat Abbas Sétif, (Algerie);
- [30] **S. MoatezBéllah**, Prédiction Du Contournement D'une Chaîne D'isolateur Mt 175 CtvSonelgaz Polluée Artificiellement Par La Logique Floue, Mémoire De Fin D'études En Vue De L'obtention Du Diplôme : Master, Département De Génie Electrique, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [31] **Suwarno** et **ArioBasuki** et **F. Lendy** et **Sumedi**, Improving outdoor Insulator performances installed coastal area using Silicone Rubber Coating, [2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis](#), 23-27 September 2012, Bali, Indonesia.
- [32] **K. Yamada, A. Hayashi, C. Saka, K. Sakanishi and R. Matsuoka**, Improvement of Contamination Flashover Voltage Performance of Cylindrical Porcelain Insulators, [Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation](#), 09-12 June 2008.
- [33] **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.
- [34] **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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 10, pp. 1053-1060, 2003.
- [35] ] **W. T. Starr**, Polymeric outdoor insulation, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., vol. 25, pp. 125-136, 1990.
- [36] ] **M. Belkacem**, Diagnostic des isolateurs haute tension sous tension alternative 50Hz, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2014.
- [37] **F. Meghnefi, C. Volatet M. Farzaneh** «Temporal and Frequency Analysis of the Leakage Current of a Station Post Insulator during Ice Accretion», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 6; pp 1-6 December 2007.
- [38] **H. H. Kordkheili, H. Abravesh, M. Tabasi, M. Dakhem, and M. M. Abravesh** "Determining the probability of flashover occurrence in composite insulators by using leakage current harmonic components", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 17, No. 2, pp. 502-512, 2010.
- [39] **S. Chandrasekar, C. Kalaivanan et A. Cavallini**, Partial discharge detection as a tool to infer pollution severity of polymeric insulators, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation., Vol. 17, No. 1, pp. 1-12, February 2010.

[40] **O. O.Filho et J.A. Cardoso et D. R. de Mello** ,The Use of Booster Sheds to Improve the Performance of 800 kV Multicone Type Insulators under Heavy Rain, IEEE 2010 [International Conference on High Voltage Engineering and Application](#), 11-14 October 2010.