

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**  
**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**  
**En vue de l'obtention du**  
**Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique**

**THEME :**

***Comportement de l'isolateur capot et tige 1512L  
artificiellement pollué sous tension alternative 50 Hz***

**Proposé par :**

**Pr. Madjid TEGUAR**

**Etudié par :**

**Fawzi TALEB**

**Adel BOULEGHLEM**

**-Promotion Juin 2010-**

**ENP, 10, Avenue Hassen Badi, 16200, EL-Harrach, ALGER**

## ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة تأثير طبيعة، ناقلية وكذا توزيع التلوث على سلوك العازل الكهربائي ذي قبة ودبوس نوع 1512 ملوث اصطناعيا. لأجل هذا، استعملنا عدة محاليل (هيدروكسيد الصوديوم، كلوريد الصوديوم، الماء مقطر وماء معدني) ، لها ناقلية مختلفة، بتوزيعين اثنين (مستمر ومتقطع عن طريق الرش على السطح العلوي ثم السطح السفلي للعازل). تمت دراسة تأثير هذه العوامل على توتر الإحاطة، سعة تيار التسرب، الممانعة الكهربائية المكافئة و فرق الصفحة بين التوتر وتيار التسرب.

**الكلمات المفتاحية :** التلوث، عازل، توتر الإحاطة، تيار التسرب، فرق الصفحة بين التوتر وتيار التسرب، ناقلية، ممانعة.

## Résumé

Dans ce travail, nous examinons l'impact de la nature, de la conductivité ainsi que la répartition de la pollution sur le comportement de l'isolateur capot et tige 1512L, artificiellement pollué. Pour cela, plusieurs solutions (alcaline à base de NaOH, saline à base de NaCl, eau distillée et eau minérale), à différentes conductivités et deux distributions (continue et discontinue en pulvérisant la surface supérieure, puis la surface inférieure de l'isolateur) ont été appliquées. L'influence de ces paramètres sur la tension de contournement, le courant de fuite, l'impédance électrique équivalente et le déphasage courant-tension a été étudiée.

**Mots-clés :** pollution, isolateur, tension de contournement, courant de fuite, déphasage courant-tension, conductivité, impédance.

## Abstract

In this work, we examine the impact of nature, the conductivity as well as the distribution of pollution on the behavior of the 1512L cap and pin insulator, artificially polluted. For that purpose, several solutions (alkaline containing NaOH, saline containing NaCl, distilled water and mineral water), having various conductivities and two distributions (continuous and discontinuous by pulverizing the upper surface, and then, the lower one of the insulator) were applied. The influence of these parameters on the flashover voltage, the leakage current, the equivalent electrical impedance and the phase angle current-voltage was studied.

**Key-words:** pollution, insulator, flashover voltage, leakage current, phase angle, conductivity, impedance.

# *Remerciements*

*Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et l'aide pour mener à bien ce modeste travail.*

*Au terme de ce travail nous tenons à remercier vivement notre promoteur Monsieur le Professeur Madjid TEGUAR pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils et son aide précieuse.*

*Nos sincères et chaleureux remerciements à Monsieur le Professeur Abdelouahab MEKHALDI pour son aide, son appui moral, et ces qualités humaines.*

*Nous remercions Monsieur le Professeur Ahmed BOUBAKEUR pour l'intérêt qu'il a porté à notre modeste travail.*

*Monsieur Rabah TIMGHELLETTE mérite également nos remerciements les plus sincères pour le travail qu'il a accompli, son aide et ses conseils.*

*Nous n'oublions de remercier les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique, en particulier ceux du département de Génie Electrique, pour nous avoir offert un agréable cadre de formation.*

# *Dédicace*

*Avant tout, à la personne la plus chère, celle que j'admire et j'aime le plus au monde, ma mère, qui s'est donné corps et âme pour l'éducation de ses enfants, et sans qui je ne serais jamais devenu ce que je suis*

*A mon père qui m'a épaulé tout au long de ma vie, qui a été un modèle pour moi, et que j'admire*

*A mes frères et sœurs que j'aime très fort, et à qui je souhaite tout le bonheur et la réussite du monde*

*A la mémoire de mon grand père*

*A mes amis*

*A mes camarades de l'école nationale polytechnique*

*A tous ceux qui comptent pour moi*

*A tous ceux qui ont de près ou de loin assisté à ma formation*

**Adel**

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents et ma grande famille.*

*A mes très chers frères et mes sœurs.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*A tous mes collègues de la promotion 2010.*

*A vous.*

*Fawzi*

# **Sommaire des figures**

# Sommaire des figures

---

## Chapitre I : Isolateurs de Haute Tension

Figure I.1 : Isolateur rigide.	(7)
Figure I.2 : Isolateur long fût Figure I.2.1 : Forme 1 Figure I.2.2 : Forme 2.	(8)
Figure I.3 : Isolateur capot et tige.	(9)
Figure I.4 : Isolateur capot et tige avec profil standard.	(9)
Figure I.5 : Isolateur capot et tige de profil antibrouillard (forme A).	(10)
Figure I.6 : Isolateur capot et tige de profil antibrouillard (forme B).	(10)
Figure I.7 : Isolateur capot et tige de profil plat.	(11)
Figure I.8 : Isolateur capot et tige de profil sphérique.	(11)
Figure I.9 : Isolateur composite.	(13)
Figure I.10 : Matériau synthétique.	(14)
Figure I.11 : Vieillissement de matériau.	(14)

## Chapitre III : Principaux travaux sur les isolateurs pollués

Figure.III.1.Modèle de J.Danis : (a) Absence de l'arc ;(b) Formation d'arc ;(c) connexion des arcs ; (d) Contournement ; (e) Création d'arc (2 <sup>ème</sup> expérience).	(30)
Figure.III. 2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh.	(31)
Figure. III.3 : Modèle expérimental selon D.Namane : (a) Pollution côté haute tension ; (b) Pollution côté terre.	(33)
Figure III.4: Modèle expérimental de Claverie et Porcheron.	(34)
Figure III.5 : Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Teguar.	(35)
Figure III.6 : Modèle d'A.Mekhaldi et S.Bouazabia.	(37)
Figure III.7: Modèle de Woodson et McElroy.	(38)
Figure III.8 : Modèle à long fût selon Boehme et Obenaus.	(39)

# Sommaire des figures

---

## Chapitre IV : Techniques expérimentales

- Figure IV.1 : Circuit d'essais de laboratoire de haute tension. (42)
- Figure IV.2 : Isolateur 1512L en verre trempé : (a) Vue latérale ;(b) Vue supérieure. (44)
- Figure IV.3 : Schéma de l'isolateur 1512L. (44)
- Figure IV.4 : Grandeurs mesurées. (45)
- Figure IV.5 : Mode de pulvérisation de l'isolateur. (47)

## Chapitre V : Résultats expérimentaux et interprétations

- Figure V.1 : Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique. (51)
- Figure V.2 : Tension de contournement pour NaCl, NaOH et l'eau minérale, pour une conductivité de  $465\mu\text{S}/\text{cm}$ . (53)
- Figure V.3 : Tension de contournement à l'état sec et humide (NaOH et NaCl à  $265\mu\text{S}/\text{cm}$ ). (54)
- Figure V.4 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl. (55)
- Figure V.5: Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH. (56)
- Figure V.6 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour une conductivité de  $465\mu\text{S}/\text{cm}$ . (57)
- Figure V.7 : Impédance équivalente de l'isolateur des trois solutions (eau minérale, NaCl, NaOH).
- Figure V.8 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée. (57)
- Figure V.9 : Courant de fuite en fonction de la conductivité, cas de la solution de NaCl. (58)

## Sommaire des figures

---

Figure V.10 : Courant de fuite en fonction de la conductivité, cas de la solution de NaOH. (59)

Figure V.11 : Courant de fuite en fonction du temps d'application la tension, cas de l'eau distillée. (60)

Figure V.12 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de l'eau minérale. (62)

Figure V.13 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (62)

Figure V.14 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (63)

Figure V.15 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (63)

Figure V.16 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (64)

Figure V.17 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (64)

Figure V.18 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (65)

Figure V.19 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de 2700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (65)

Figure V.20 : Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de 2700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (66)

Figure V.21 : Impédance équivalente en fonction de la conductivité, cas des deux solutions saline et alcaline. (67)

Figure V.22 : Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH. (69)

Figure V.23 : Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas de solution de NaCl. (69)

## Sommaire des figures

---

Figure V.24 : Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas propre et sec, et cas de la solution alcaline ayant une conductivité de 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (70)

Figure V.25 : Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas des solutions alcaline, saline et eau minérale de conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (71)

Figure V.26 : Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions alcaline et saline appliquées du côté terre. (72)

Figure V.27 : Tension de contournement, cas des solutions alcaline, saline et eau minérale de conductivité 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté terre. (73)

Figure V.28 : Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions alcaline et saline appliquées du côté haute tension. (74)

Figure V.29 : Tension de contournement cas des solutions alcaline, saline et eau minérale de conductivité 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté haute tension. (74)

Figure V.30 : Influence de l'emplacement de la couche polluée sur la tension appliquée, cas de la solution de NaOH. (75)

Figure V.31 : Influence de l'emplacement de la couche polluante sur la tension appliquée, cas de la solution de NaCl. (76)

Figure V.32 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution saline. (77)

Figure V.33 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution alcaline. (77)

Figure V.34 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution saline. (78)

Figure V.35 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution alcaline. (79)

Figure V.36 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions de conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$  appliquées du côté haute tension. (80)

Figure V.37 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions de conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$  appliquées du côté terre. (80)

## Sommaire des figures

---

Figure V. 38 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH. (81)

Figure V. 39 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl. (82)

Figure V.40 : Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution saline. (83)

Figure V.41 : Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution alcaline. (84)

Figure V.42 : Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution de saline. (84)

Figure V.43 : Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution alcaline. (85)

Figure V.44 : Impédance équivalente en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions saline et alcaline. (87)

Figure V.45 : Impédance équivalente en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions saline et alcaline. (88)

Figure V.46 : Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH appliquée du côté haute tension. (86)

Figure V.47 : Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl appliquée du côté haute tension. (89)

Figure V.48 : Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH appliquée du côté terre. (89)

Figure V.49 : Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl appliquée du côté terre. (90)

Figure V.50 : Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions, ayant une conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté haute tension. (91)

Figure V.51 : Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions, ayant une conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté terre. (91)

## Sommaire des figures

---

Figure V.52 : Influence de la répartition de la couche polluante sur la tension de contournement, cas de la solution de NaCl. (92)

Figure V.53 : Influence de la répartition de la couche polluante sur la tension de contournement, cas de la solution de NaOH. (93)

Figure V.54 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de l'eau distillée. (94)

Figure V.55 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (94)

Figure V.56 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (95)

Figure V.57 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (95)

Figure V.58 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 2.7  $\text{mS}/\text{cm}$ . (96)

Figure V.59: Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (96)

Figure V.60 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (97)

Figure V.61 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (97)

Figure V.62: Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 2.7  $\text{mS}/\text{cm}$ . (98)

Figure V.63 : Influence de la répartition de la couche polluante sur l'impédance, cas de la solution de NaCl. (99)

Figure V.64 : Influence de la répartition de la couche polluante sur l'impédance, cas de la solution de NaOH. (99)

Figure V.65 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de l'eau distillée. (100)

## Sommaire des figures

---

Figure V.66 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (101)

Figure V.67 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (101)

Figure V.68 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (102)

Figure V.69 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 2.7 mS/cm. (102)

Figure V.70 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (103)

Figure V.71 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (103)

Figure V.72 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (104)

Figure V.73 : Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 2.7 mS/cm. (104)

# **Sommaire**

# Sommaire

---

I.1. Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Isolateurs de Haute Tension</b>	
I.2. Introduction .....	4
I.2. Quelques définitions.....	4
I.2.1. Isolement.....	4
I.2.2. Isolation.....	4
I.2.3. Décharge disruptive.....	4
I.2.4. Contournement.....	5
I.2.5. Tension de contournement.....	5
I.2.6. Courant de fuite.....	5
I.2.7. Longueur critique de l'arc.....	5
I.2.8. Contrainte de contournement.....	5
I.2.9. Conductance superficielle.....	6
I.3. Isolateurs de haute tension.....	6
I.4. Types d'isolateurs.....	7
I.4.1. Isolateurs rigides.....	7
I.4.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.....	7
I.4.2.1. Isolateur long fût.....	8
I.4.2.2. Isolateur capot et tige.....	8
I.4.2.2.1. Profil standard.....	9
I.4.2.2.2. Forme antibrouillard (forme A).....	10
I.4.2.2.3. Profil antibrouillard (forme B) .....	10
I.4.2.2.4. Profil plat.....	11
I.4.2.2.5. Profil sphérique.....	11
I.5. Matériaux utilisés pour la fabrication des isolateurs.....	12
I.5.1. Isolants.....	12
I.5.1.1. Céramique.....	12
I.5.1.2. Le verre.....	12
I.5.1.2.1. Le verre recuit.....	12

---

# Sommaire

---

I.5.1.2.2. Le verre trempé.....	13
I.5.2. Matériaux synthétiques.....	13
I.6. Conclusion.....	14

## Chapitre II : Phénomène de la pollution des isolateurs

II.1. Introduction.....	15
II.2. Phénomène de pollution des isolateurs.....	15
II.3. Formation des couches polluantes sur les isolateurs.....	16
II.4. Sources de pollution.....	16
II.4.1. Pollution naturelle.....	16
II.4.1.1. Pollution marine.....	16
II.4.1.2. Pollution désertique.....	16
II.4.1.3. Autre type de Pollution naturelle.....	17
II.4.2. Pollution industrielle.....	17
II.4.3. Pollution mixte.....	17
II.5. Conséquences de la pollution.....	17
II.5.1. Arc non localisé.....	18
II.5.2. Arc fixe.....	18
II.5.3. Contournement des isolateurs pollués.....	18
II.6. Sévérité de pollution d'un site.....	20
II.6.1 Classification des sites pollués.....	20
II.6.2. Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	21
II.6.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	21
II.6.2.2. Conductance superficielle.....	22
II.6.2.3. Courant de fuite.....	22
II.6.2.3.1. Comptages d'impulsions.....	22
II.6.2.3.2. Courant de fuite de la plus forte crête ( $I_{f0}$ ).....	22
II.6.2.4. Mesures optiques.....	23

# Sommaire

---

II.6.2.5. Densité de dépôt non soluble.....	23
II.7. Méthodes d'essais sous pollution.....	24
II.7.1. Essais sous pollution naturelle.....	23
II.7.2. Essais sous pollution artificielle.....	24
II.7.2.1 Méthodes de la couche solide.....	24
II.7.2.2. Méthode du brouillard salin.....	25
II.7.2.3. Méthode de la chambre de poussière.....	25
II.7.3. Critiques de ces méthodes d'essais.....	26
II.8. Techniques de lutte contre la pollution.....	26
II.8.1. Allongement de la ligne de fuite.....	26
II.8.2. Utilisation des isolateurs plats.....	26
II.8.3. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes).....	27
II.8.4. Revêtement à base de silicone.....	27
II.8.5. Les isolateurs composites.....	27
II.8.6. Nettoyages sous ou hors tension.....	27
II.9. Conclusion.....	28

## **Chapitre III. Principaux travaux sur les isolateurs pollués**

III.1. Introduction.....	29
III.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh.....	30
III.3. Modèle de D. Namane .....	32
III.4. Modèle de P.Claverie et Y.Porcheron.....	34
III.5. Modèles de M.Teguar.....	35
III.5.1. Cas de pollution continue.....	35
III.5.2. Cas d'une pollution discontinue.....	36
III.6. Modèle de A.Mekhaldi et S.Bouazabia.....	37
III.7. Modèle de Woodson et Mc Elory.....	39
III.8. Conclusion.....	40

# Sommaire

---

## Chapitre IV : Techniques expérimentales

IV.1. Introduction.....	41
IV.2. Dispositif expérimental.....	41
IV.2.1. Circuit d'essais au laboratoire de l'ENP.....	41
IV.2.1.1. Transformateur d'essais.....	42
IV.2.1.2. Transformateur de réglage.....	42
IV.2.1.3. Diviseur capacitif de tension.....	43
IV.2.1.4. Pupitre de commande.....	43
IV.2.1.5. Appareils de mesure et de protection.....	43
IV.2.1.6. Objet d'essai.....	43
IV.3. Préparation des solutions polluantes.....	46
IV.4. Préparation de l'isolateur réel 1512L.....	46
IV.5. Méthode de pulvérisation.....	46
IV.6. Mesure de la tension de contournement.....	47
IV.7. Enregistrement du courant de fuite et de la tension appliquée.....	48
IV.8. L'évolution du courant de fuite en fonction du temps.....	48
IV.9. Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée.....	48
IV.10. Conclusion.....	48

## Chapitre V : Résultats expérimentaux et interprétations

V.1. Introduction.....	50
V.2. Phénomènes observés lors des essais.....	50
V.3. Pollution continue.....	51
V.3.1. Tension de contournement.....	51
V.3.1.1. Influence de la conductivité	
V.3.1.2. Influence de la nature de pollution.....	52
V.3.1.3. Influence de l'état de surface.....	54
V.3.2. Courant de fuite.....	54

# Sommaire

---

V.3.2.1. Influence de la tension appliquée.....	54
V.3.2.2. Influence de la nature de pollution.....	56
V.3.2.3. Influence de l'état de la surface.....	58
V.3.2.4. Influence de la conductivité tension.....	59
V.3.2.5. Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension.....	60
V.3.3. Impédance électrique équivalente.....	67
V.3.4. Déphasage entre le courant et la tension .....	68
V.3.4.1. Influence de la tension appliquée.....	68
V.3.4.2. Influence de l'état de surface.....	70
V.3.4.3. Influence de la nature de pollution.....	71
V.4. Pollution discontinue.....	72
V.4.1. Tension de contournement.....	72
V.4.1.1. Pollution du côté terre.....	72
V.4.1.2. Pollution du côté haute tension.....	73
V.4.1.3. Influence de l'emplacement de la couche de pollution.....	75
V.4.2. Courant de fuite.....	76
V.4.2.1. Influence de la tension appliquée .....	76
V.4.2.1.1. Pollution du côté terre.....	76
V.4.2.1.2. Pollution du côté haute tension.....	78
V.4.2.2. Influence de la nature de pollution.....	79
V.4.2.3. Influence de l'emplacement de la couche polluante.....	81
V.4.2.4. Influence de la conductivité.....	82
V.4.2.4.1. Pollution du côté terre.....	82
V.4.2.4.2. Pollution du côté haute tension.....	84
V.4.3. Impédance électrique équivalente.....	85
V.4.3.1. Pollution du côté terre.....	85
V.4.3.2. Pollution du côté haute tension.....	86
V.4.3.3. Influence de la nature de pollution.....	87
V.4.4. Déphasage courant-tension.....	88

# Sommaire

---

V.4.4.1. Influence de la tension appliquée.....	88
V.4.4.2. Influence de la nature de pollution.....	90
V.5. Influence de la répartition de la pollution.....	90
V.5.1. Sur la tension de contournement.....	92
V.5. 2. Sur le courant de fuite.....	92
V.5. 3. Sur l'impédance électrique.....	98
V.5. 4. Sur le déphasage courant-tension.....	100
V.6. Conclusion.....	105
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>106</b>
<b>Références bibliographique.....</b>	<b>108</b>

# **Introduction générale**

## Introduction générale

---

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension [1].

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne.

Les isolateurs des lignes et de poste de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie [2]. Lorsqu'ils sont secs, les agents polluants n'engendrent généralement pas de dégradation de la rigidité diélectrique des isolateurs. Cependant, par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants, se fixant sur les surfaces isolantes, réduisent considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois survenir.

L'humidification des couches polluantes facilite, en fait, la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant ainsi des échauffements locaux, et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la réparation du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître, si le champ local dépasse un certain seuil. Ces arcs peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur.

Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne de haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur de haute tension est, donc, sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans le quel il est placé.

Le recours aux essais expérimentaux est indispensable pour juger les performances de différents types d'isolateurs. Ces essais sont effectués de préférence sous conditions naturelles de pollution (essais in situ). Ces derniers ont l'avantage de prendre en considération toutes les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur avec

## Introduction générale

---

toute leur complexité. Cependant, les essais in situ ont l'inconvénient de nécessiter plusieurs années pour permettre d'étudier le comportement des isolateurs essayés. A cet égard, on a désormais cherché à reproduire artificiellement au laboratoire les conditions naturelles de pollution, afin d'obtenir des résultats et d'effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à moindre coût que dans des stations sur sites.

Le présent travail consiste à étudier l'impact de la nature, de la conductivité ainsi que la distribution de la pollution sur le comportement de l'isolateur capot et tige type 1512L en verre trempé, artificiellement pollué. Pour cela, deux solutions chimiques de différentes conductivités, à savoir une solution alcaline à base de NaOH et une deuxième saline à base de NaCl, ont été utilisées. L'effet d'une eau minérale a été aussi examiné et comparé à celui des deux solutions à la même conductivité. Les résultats ainsi trouvés ont été comparés à ceux obtenus dans le cas de l'application d'une eau distillée. Par ailleurs, deux répartitions de la pollution ont été considérées, à savoir la pollution continue et la pollution discontinue. La pollution continue a été réalisée en pulvérisant toute la surface de l'isolateur. La seconde a été appliquée soit sur la partie inférieure (pollution du côté haute tension), soit sur la partie supérieure (pollution du côté terre).

Notre travail comporte cinq chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités traitant des isolateurs de haute tension, leurs caractéristiques, leurs différents types ainsi que les matériaux utilisés dans leur fabrication.

Le deuxième chapitre présente des rappels sur les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie. Des méthodes de mesure de la sévérité de la pollution des sites, des méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que des techniques de lutte contre ces phénomènes y sont présentés.

Nous citons, dans le troisième chapitre, les principaux travaux sur les isolateurs soumis à la pollution, développés en vue de décrire les phénomènes de décharges électriques sur des surfaces polluées.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les techniques expérimentales. Pour cela, nous présentons l'équipement de la station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. L'objet d'essai

## Introduction générale

---

(l'isolateur) ainsi que les méthodes de mouillage (pulvérisation) y sont également présentés.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux ainsi obtenus. Ces résultats concernent les évolutions de la tension de contournement, du courant de fuite, de l'impédance électrique équivalente vue des électrodes et du déphasage courant-tension en fonction des paramètres susmentionnés. La variation du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension a été également étudiée.

Nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.

# **Chapitre I :**

## Isolateurs de haute tension

## I.2. Introduction

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, et accrochés aux pylônes des lignes aériennes. Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateur d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile,  $Sf_6$ ) 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) [3].

## I.2. Quelques définitions

### I.2.1. Isolement

On appelle un isolement d'un ouvrage ou d'un appareil électrique, son aptitude à supporter la tension ou, plus généralement, les contraintes électriques qui lui sont appliquées.

### I.2.2. Isolation

L'isolation est un procédé permettant de supprimer ou de réduire la propagation de rayonnement et de vibration d'un milieu à un autre, notamment celle de la chaleur (isolation thermique) et de l'électricité (isolation électrique). Un matériau qui remplit ce rôle est dit isolant.

### I.2.3. Décharge disruptive

Phénomène associé à une défaillance de l'isolation sous l'effet de contraintes électriques, avec chute de tension et passage d'un courant. Pour les diélectriques gazeux, on parlera de l'amorçage, claquage pour les liquides, et enfin perforation pour les solides [1].

### **I.2.4. Contournement**

Décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier (cas d'isolateur). Le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur [1].

### **I.2.5. Tension de contournement**

C'est le niveau de tension le plus bas au-delà duquel des arcs électriques joignent les deux électrodes [1].

### **I.2.6. Courant de fuite**

C'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humectée le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée, ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre [2].

### **I.2.7. Longueur critique de l'arc**

C'est la longueur limite de l'arc partiel, qui au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total.

### **I.2.8. Contrainte de contournement**

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur total de cet isolateur. Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons, entre autres :

- ❖ L'installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des portions d'amorçage enregistrées.
- ❖ La disposition des éclateurs qui sont disposés sur chaque chaîne afin que sa longueur effective soit augmentée jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

Ces méthodes présentent des mesures les plus directes qui puissent être faites sur les isolateurs réels. Le coût élevé peut, toutefois, être réduit par l'utilisation d'une ligne existante [4, 5].

### I.2.9. Conductance superficielle

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite traversant l'isolateur à la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface d'isolateur [6].

### I.3. Isolateurs de haute tension

L'isolateur est utilisé pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts-circuits et les pertes de courant. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant.

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 à résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc.

Les isolateurs utilisés dans les réseaux électriques peuvent être classés selon leurs constitutions en deux groupes :

- Les isolateurs internes qui sont hermétiquement isolés (isolation des câbles, transformateurs et gaz comprimés,...etc.).
- Les isolateurs externes sont constitués par les distances dans l'air et par les lignes de fuite le long des isolants solides, tels que les supports de l'appareillage, les traversées de transformateurs et les chaînes d'isolateurs.

Un isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèles ayant des comportements différents, qui sont les suivants [2] :

- ✓ L'intervalle d'air,
- ✓ Le matériau diélectrique,

- ✓ L'interface air-matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

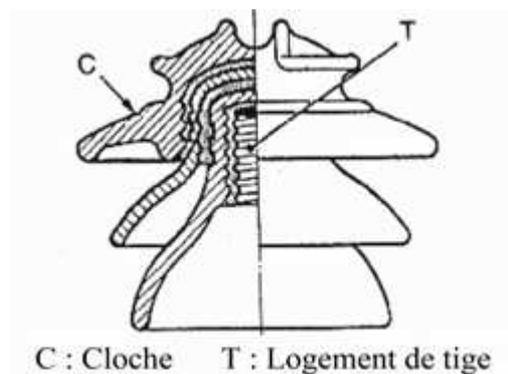
## I.4. Types d'isolateurs

Selon les différentes façons d'utilisation et les conditions de fonctionnement des isolateurs, on distingue plusieurs types d'isolateurs.

### I.4.1. Isolateurs rigides

Ce type d'isolateurs 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 verticale, horizontale ou oblique (inclinée).

Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60kV [7].



**Figure I.1** : Isolateur rigide

### I.4.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués d'un matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs [7, 8].

La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement) soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage). Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- Isolateur long fût,
- Isolateur capot et tige.

### I.4.2.1. Isolateur long fût

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes. A chaque extrémité, il y a une pièce métallique pour les liaisons [8].

Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (Figure I.2.1), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (Figure I.2.2) [7, 8].

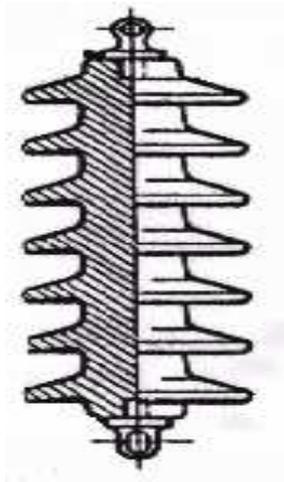


Figure I.2.1 : Forme 1

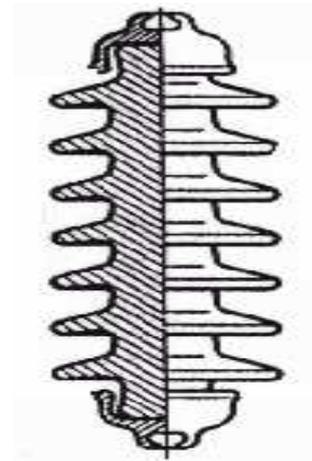
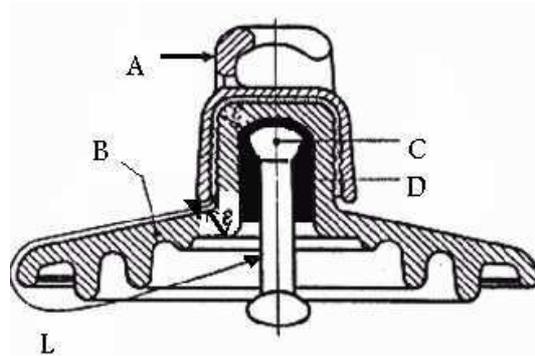


Figure I.2.2 : Forme 2

Figure I.2 : Isolateur long fût

### I.4.2.2. Isolateur capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant, soit le verre, soit la porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable. Cette dernière est trouée de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon, où la partie inférieure de l'isolateur pénètre dans le capot de l'élément inférieur, en utilisant du ciment (Figure I.3) [9].



**Figure I.3 :** Isolateur capot et tige

**A :** le capot.

**B :** le diélectrique (verre trempé ou céramique).

**C :** la tige.

**D :** le ciment de fixation.

**L :** la plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.

**ε :** la longueur du canal de perforation,  $\epsilon \ll 1/2$ .

#### I.4.2.2.1. Profil standard

La forme et les dimensions sont en accord avec la commission électrotechnique internationale (CEI 305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les droits où règne une pollution moyenne (Figure I.4) [7].



**Figure I.4 :** Isolateur capot et tige avec profil standard

#### I.4.2.2.2. Forme antibrouillard (forme A)

Son diamètre est plus grand que celui de celle du profil standard. Il est muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto-lavage par action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile, si c'est nécessaire (Figure I.5) [7].



**Figure I.5 :** Isolateur capot et tige de profil antibrouillard (forme A)

#### I.4.2.2.3. Profil antibrouillard (forme B)

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et de 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 (Figure I.6) [9].



**Figure I.6 :** Isolateur capot et tige de profil antibrouillard (forme B)

#### I.4.2.2.4. Profil plat

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air. Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto-lavage est peu fréquent par la pluie (Figure I.7) [9].



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

#### I.4.2.2.5. Profil sphérique

La forme sphérique d'une longueur de fuite importante avec absence des rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace (Figure I.8) [9].



**Figure I.8 :** Isolateur capot et tige de profil sphérique

## **I.5. Matériaux utilisés pour la fabrication des isolateurs**

Un isolateur est constitué en général de deux parties : une partie isolante et des pièces métalliques de liaison scellées sur cette partie isolante.

### **I.5.1. Isolants**

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique, la porcelaine, et les polymères.

Durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd d'isolateurs et la difficulté de détection des amorçages. Actuellement, on s'intéresse, plutôt, à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [9].

#### **I.5.1.1. 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. [7, 10].

#### **I.5.1.2. Le verre**

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation [2].

On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

##### **I.5.1.2.1. Le verre recuit**

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication des isolateurs rigides. Malheureusement, on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions

---

mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [11].

### I.5.1.2.2. Le verre trempé

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit. Ainsi, l'isolateur en verre trempé peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100°C [2].

En exploitation, l'isolateur en verre trempé ne peut avoir que deux états :

- Il est entier ; on est sûr qu'il est électriquement et mécaniquement intact.
- Il est moignon suite au bris de ça jupe ; on peut ainsi facilement le repérer. Or, on n'est pas dans l'obligation de la remplacer immédiatement, car la résistance mécanique résiduelle est suffisante pour continuer l'exploitation de la ligne jusqu'à son remplacement programmé.

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 [2].

### I.5.2. Matériaux synthétiques

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibre de verre imprégnée, 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 (Figure I.9) [7, 8, 10].

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (Figure I.10) [7]. L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique, mécanique, atmosphérique, ..) (Figure I.11) [7].

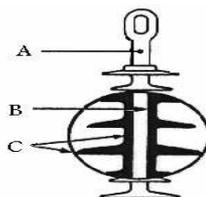
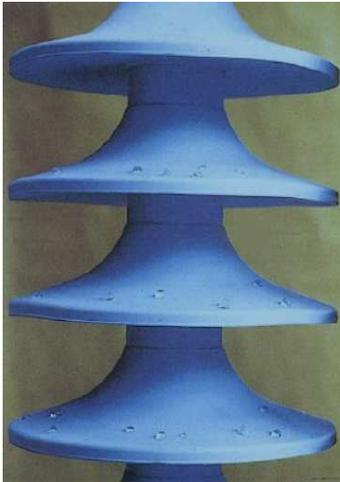


Figure I.9 : Isolateur composite

**A** : pièce d'accrochage métallique.

**B** : noyau en fibre de verre-résine.

**C** : revêtement à ailettes en matériaux synthétiques.



**Figure I.10** : Matériau synthétique



**Figure I.11** : Vieillessement de matériau

## I.6. Conclusion

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 [12].

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

Les isolateurs sous haute tension ne se comportent pas de la même façon qu'à basse ou moyenne tension. Dans ce cas, on donne beaucoup d'importance au phénomène de la pollution des isolateurs qui présente un danger particulier pour les dispositifs de haute tension qui peuvent engendrer des pertes d'énergie.

En effet, pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites et les différents paramètres contribuant à la dégradation de l'état de surface des isolateurs (la pluviométrie, l'humidité, la température, le vent,...).

## **Chapitre II :**

Phénomène de pollution  
des isolateurs

## II.1. Introduction

La pollution des isolateurs constitue un sérieux problème, dont il faut tenir compte lors de dimensionnement de l'isolement des lignes de transport et de l'appareillage de haute tension. En effet, les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de tenue des isolateurs. Les dépôts polluants peuvent dans les cas les plus critiques, conduire à un contournement total des isolateurs. Ce qui constitue la situation la plus grave, qui peut conduire à la mise hors service de la ligne. La connaissance du 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 son isolement.

## II.2. Phénomène de pollution des isolateurs

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension. Les dépôts de pollutions sur les isolateurs peuvent provoquer de nombreux incidents. Ceux-ci peuvent engendrer des nombreuses perturbations dans le fonctionnement des réseaux électrique.

Le contournement sous pluie et sous pollution sont les deux principaux types de rupture diélectrique auxquels sont soumis les isolateurs. Il est généralement admis que la pollution est plus contraignante que la pluie, dans la mesure où la résistivité des couches polluantes est bien inférieure à celle de la pluie. C'est pour cela, que les efforts de compréhension ont davantage porté sur le contournement sous pollution, afin de mieux comprendre le phénomène de contournement et de se prémunir d'outils permettant le suivi de son évolution et d'éviter son apparition.

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 partiels). Dans certaines conditions, ces arcs partiels peuvent se développer jusqu'à provoquer le contournement total des isolateurs, en connectant l'extrémité sous haute tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation.

### **II.3. Formation des couches polluantes sur les isolateurs**

La disposition des isolateurs dans les lignes forme un obstacle à l'écoulement d'un air transportant de la poussière. Une couche de pollution se développe progressivement 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 [14].

La disposition de la pollution dépend de la position de la chaîne (verticale, horizontale ou inclinée), et le profil de l'isolateur. Généralement, la pollution se concentre sur les éléments de la chaîne situés près de la borne haute tension, et dans les parties protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage [15].

### **II.4. Sources de pollution**

#### **II.4.1. Pollution naturelle**

La pollution naturelle provient de sels marins dans des régions côtières, de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants), et de sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

##### **II.4.1.1. Pollution marine**

Les installations situées en bord de 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. Dans certaines conditions, ils se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

##### **II.4.1.2. Pollution désertique**

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, figure le vent de sable. Celui-ci induit des dépôts de sable sur les surfaces des isolateurs. De la même façon que précédemment, lorsque ces dépôts sont humidifiés, les couches de sable deviennent plus au moins conductrices à cause de l'existence de sels [16], engendrant ainsi une diminution de la résistance superficielle des isolateurs.

### **II.4.1.3. Autre type de Pollution naturelle**

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement ; c'est le contournement sous pluie [4].

### **II.4.2. Pollution industrielle**

Le problème de la pollution industrielle se présente pour les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées des usines, raffineries, cimenteries, ..... etc.), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules), ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture).

Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport [17].

Les isolateurs recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs [17].

### **II.4.3. Pollution mixte**

Elle est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone ; les zones industrielles situées en bordure de la pollution, par exemple. Ce type de pollution est le plus dangereux, car la couche électrolytique formée par le processus d'humidification des dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolateurs, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique [4, 14].

## **II.5. Conséquences de la pollution**

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs engendrent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. La tension de 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.

Selon les conditions auxquelles est soumis l'isolateur, trois cas peuvent se présenter [15, 18] :

### **II.5.1. Arc non localisé**

L'arc électrique s'éteint rapidement puis, se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par le réseau de distribution.

### **II.5.2. Arc fixe**

L'arc électrique se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu) soit, en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant de l'élément défaillant.

### **II.5.3. Contournement des isolateurs pollués**

Le phénomène de contournement des isolateurs pollués résulte de la combinaison de plusieurs paramètres, soumis à la tension de service, comprenant la formation d'une couche électrolytique conductrice par humidification du dépôt de pollution sur la surface de l'isolateur. Ce qui entraîne l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation de l'arc qui peut couvrir tout l'isolateur.

Lorsque les conditions électriques appropriées sont remplies [19], le contournement d'une surface isolante polluée est le résultat d'une évolution que l'on peut décrire comme suit :

- Dépôt de la pollution : les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent entre les nervures ou autour du capot. Les facteurs d'accumulation sont les suivants : la nature, le poids et la taille des particules polluantes, la distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol, la vitesse du vent et l'orientation de la chaîne.
- Humidification de la pollution : le brouillard et la pluie fine humidifient la couche polluante, provoquant la dissolution des sels contenus dans le dépôt et

créant un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend, alors, naissance.

- Développement des zones sèches et apparition d'arcs : par effet joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant de fuite est alors très réduit en amplitude par la présence d'une bande sèche. La répartition du potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée à ses bornes. Si cette bande sèche est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc est créé.
- Comportement des arcs : la résistance du dépôt humidifié non court-circuitée par l'arc limite le courant et la longueur de l'arc. Si, le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répètera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas "le courant critique" correspondant à "une longueur critique" de l'arc, cette situation reste stable. Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir.

Sous tension continue, le processus global est relativement facile à décomposer. Une fois la décharge amorcée, si les conditions électriques le permettent, elle se propagera rapidement jusqu'au contournement. Dans le cas contraire, la zone sèche tendra à s'élargir jusqu'à ce que la tension appliquée ne puisse plus maintenir la décharge, qui va alors s'éteindre.

La tension alternative présente à cet égard une différence importante du fait de son annulation deux fois par période. Lorsque le temps au contournement est très élevé, on pourra avoir un passage par zéro avant qu'il n'y est contournement total.

Dans ces conditions, les arcs électriques s'éteignent à chaque passage par zéro de l'onde de courant. Pour que ces arcs se réamorcent au cours de l'alternance suivante, il faut que la tension appliquée atteigne un certain seuil dit tension de réamorçage [19].

## II.6. Sévérité de pollution d'un site

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la sévérité de la pollution là où l'isolation doit être installée [19].

La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

### II.6.1 Classification des sites pollués

Il est possible de caractériser la sévérité de la pollution d'un site en utilisant par exemple, la méthode du brouillard salin équivalent. La sévérité considérée est alors exprimée en termes de salinité équivalente. En effet, on peut faire correspondre, à chaque site où règne indifféremment une pollution naturelle ou industrielle, une solution saline équivalente.

Afin de définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité équivalente et le niveau de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [24].

**Classe 1** : pollution faible d'origine naturelle (sauf marine). Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitation, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium de concentration 2.5 g/l.

**Classe 2** : pollution moyenne d'origine naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé. La concentration de la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

**Classe 3** : pollution forte d'origine marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et situées près de la mer. Elles sont exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important. La concentration de la salinité équivalente maximale est de 80 g/l.

**Classe 4** : Elle correspond à des zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution dans ces zones peut être naturelle, industrielle ou mixte. Ces zones sont sujettes aux fumées industrielles et aux poussières conductrices produisant des dépôts très épais, et situés très proches de la côte. Elles sont soumises à des vents marins très forts et très polluants. Elles nécessitent un isolement exceptionnel. La salinité équivalente maximale est de 160 g/l.

## **II.6.2. Mesure de la sévérité de pollution d'un site**

Dans ce qui suit, nous passerons en revue les différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées [15]. Les principales méthodes qui ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site sont :

### **II.6.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)**

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par  $\text{cm}^2$  de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau.

Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut déterminer la DDSE.

Pour déterminer la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel.

Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente en outre, certains inconvénients, tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte [18].

### II.6.2.2. Conductance superficielle

La conductance superficielle des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir du rapport du courant électrique qui traverse l'isolateur, à la tension d'alimentation de l'isolateur témoin (tension de service)  $G = I/V$ . La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur.

Cette méthode est donc un paramètre qui caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche), lequel détermine la performance de l'isolateur [9].

Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais elle présente, en général, des résultats dispersés [18].

### II.6.2.3. Courant de fuite

La mesure du courant de fuite s'effectue de deux manières : par le comptage du nombre d'impulsions et par l'amplitude des ces dernières.

#### II.6.2.3.1. Comptages d'impulsions

Le comptage des impulsions consiste à enregistrer, par un dispositif approprié, pendant une période donnée le nombre d'impulsions du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude, pour un isolateur soumis à sa tension de service. Généralement, la fréquence et l'amplitude de ces impulsions croissent lorsqu'on s'approche du contournement. La méthode se prête mieux à la détermination des longueurs d'isolateurs dans le cadre de l'extension ou du reconditionnement de l'isolement de réseaux existants. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs et exige une aptitude au contrôle permanent [4].

#### II.6.2.3.2. Courant de fuite de la plus forte crête ( $I_{fv}$ )

On enregistre, pendant une période relativement longue, sur un échantillon ou un isolateur réel, continuellement soumis à sa tension de service, les amplitudes des impulsions de courant de fuite. La plus forte valeur de crête du courant est exploitée pour la détermination de la sévérité de pollution de site. Cette méthode est simple et

---

tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension appliquée. Le coût relativement élevé de l'équipement de mesure contrebalance les avantages de cette méthode [18].

#### **II.6.2.4. Mesures optiques**

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase ....), de calculer la constante diélectrique et épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [14].

#### **II.6.2.5. Densité de dépôt non soluble**

La densité de dépôt non soluble (DDNS) correspond à la quantité de produits polluants non soluble présente dans une couche de pollution. Elle s'exprime en  $\text{mg/cm}^2$ . Les mesures de DDNS s'accompagnent également souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [14].

### **II.7. Méthodes d'essais sous pollution**

Afin de comparer les performances de divers types d'isolateurs et de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Ces derniers peuvent être réalisés sous conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire. Nous distinguons, ainsi, deux principales méthodes d'essais sur les isolateurs pollués.

- Les essais sous pollution naturelle;
- Les essais sous pollution artificielle.

#### **II.7.1. Essais sous pollution naturelle**

Ces essais consistent à installer, dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on étudie le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs.

Comme la pollution naturelle est un phénomène à évolution lente, l'essai sous pollution naturelle peut prendre de deux à trois ans. La qualité d'isolement des isolateurs placés sous la même tension est déterminée en fonction de temps au contournement.

La diversité de la nature des agents polluants impose ce type d'essais, pour étudier séparément les principales sources de pollution et leur impact sur l'isolement des ouvrages.

Ces essais ont l'avantage de tenir en compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné [13, 15]. Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais est la durée des expériences qui est relativement longue (plusieurs années), pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs. C'est pourquoi, des méthodes de laboratoire furent proposées et sont largement utilisées.

### **II.7.2. Essais sous pollution artificielle**

Vu leur rapidité et leur coût relativement bas, de nos jours, sont largement utilisés par les chercheurs. Ils sont basés sur la reproduction de la couche de pollution par des solutions réparties à la surface de l'isolateur et dont la conductivité peut être modifiée. Afin de valider les essais sous pollution artificielle, il a été indispensable de comparer les performances des isolateurs testés au laboratoire à celles des isolateurs en exploitation, dans des conditions naturelles de pollution.

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Méthodes de la couche solide;
- Méthode du brouillard salin;
- Méthode de la chambre de poussière.

#### **II.7.2.1 Méthodes de la couche solide**

Dans ces méthodes, une couche de pollution solide à base de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte, généralement le kaolin, le kieselguhr (terre d'infusoire, diatomées) ou la silice, est appliquée par pulvérisation sur la surface isolante de

l'isolateur. La conductivité de cette suspension est ajustée par réglage de la concentration de chlorure de sodium.

Notant que si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini comme étant la densité de dépôt de sel en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini comme étant la conductivité de la couche polluante. Par ailleurs, certains chercheurs utilisent une couche semi-conductrice comme agent polluant [17].

### **II.7.2.2. Méthode du brouillard salin**

Dans cette méthode, la surface isolante, alimentée par une tension de service (maintenue constante durant tous les essais), est placée dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité de pollution. Ce taux peut être caractérisé soit, par le poids de sel contenu dans un litre d'eau en  $\text{g}/\text{l}$ , soit par la mesure de la résistivité ou de la densité de la solution saline. Le degré de salinité exprimé en  $\text{kg}$  de sel par  $\text{m}^3$  de solution, définit le paramètre de sévérité. Les valeurs de salinité appliquée en référence aux conditions de pollution sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

La méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble, ou bien la pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [20].

### **II.7.2.3. Méthode de la chambre de poussière**

Afin de représenter le niveau de pollution et la distribution des polluants, de la même manière que dans les conditions naturelles, on génère dans une chambre d'essai un débit d'air lent transportant du sel et des matériaux inertes avec une distribution uniforme que possible, l'objet d'essai étant positionné au milieu de la chambre. Un vaporisateur va mouiller le dépôt de pollution généré précédemment [20, 21].

### II.7.3. Critiques de ces méthodes d'essais

La méthode du brouillard salin est d'une grande facilité de mise en œuvre et permet d'obtenir une bonne reproductibilité des essais est donc la plus utilisée. De plus, sa validité a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières et zones industrielles. La méthode de la chambre de poussière offre un atout considérable pour les essais au laboratoire en tension continue. Cependant, son utilisation est limitée, vu les complexités qu'elle présente en terme de faisabilité. Notant que, ces méthodes sont moins représentatives pour simuler la pollution désertique [15].

## II.8. Techniques de lutte contre la pollution

Nous présentons brièvement dans cette section, les principaux moyens de lutte utilisés contre la pollution, afin de prévenir autant que possible les incidents lorsque la ligne est en service. Ces moyens de lutte sont basés sur des mesures de sévérité de pollution. Cependant, un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant devant une nouvelle source de pollution (travaux routiers, construction d'une nouvelle usine) [19].

Les différentes techniques utilisées pour la lutte contre la pollution sont :

### II.8.1. Allongement de la ligne de fuite

Cette technique permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux méthodes sont utilisées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [22].

### II.8.2. Utilisation des isolateurs plats

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En outre, ces derniers sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de

pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [15].

### **II.8.3. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)**

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [19].

### **II.8.4. Revêtement à base de silicone**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage.

### **II.8.5. Les isolateurs composites**

Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté, une haute résistance mécanique et de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollutions très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère, voient leurs caractéristiques changer au cours du temps. Ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service [23].

### **II.8.6. Nettoyages sous ou hors tension**

Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage hors tension, peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures.

Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce lavage est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter, afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [21].

Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certains pays (Amérique du Nord, en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs.

## **II.9. Conclusion**

La pollution est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension.

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, 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.

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux types d'isolateurs, revêtements hydrophobes, ...), permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

**Chapitre III :**  
Principaux travaux sur les  
isolateurs pollués

### III.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, les principaux travaux de recherche effectués dans le domaine de la pollution des isolateurs. La plus part 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 des décharges électriques mis en jeu.

#### III.1. Modèle de J.Danis [25]

Ce modèle est constitué d'une plaque de verre isolante, de forme géométrique simple, munie de deux électrodes rectangulaires identiques, et placées aux deux extrémités de la plaque (Figure III. 1).

Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, J.Danis a considéré plus d'une zone sèche. L'auteur décrit à l'aide de photographie à vitesse, les différentes étapes précédant le contournement.

Ainsi l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches, et se déplace vers les zones humides (Fig. III. 1.b).
- Cet arc commence d'une façon aléatoire le long de la zone sèche et aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.
- Les positions des arcs développées sont différentes, lorsque l'expérience est répétée.
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche voisine.
- Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Ces arcs disparaissent, ensuite, lorsque le courant augmente. Un seul arc dominant persiste au cours des étapes suivantes. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide.

- A travers ces considérations, l'auteur a conclu que la rupture des zones sèches survient d'une manière aléatoire. Comme la tension de contournement dépend de la rupture de ces zones sèches, celle-ci possède également le même caractère, c'est à dire obéit aux lois statistiques.

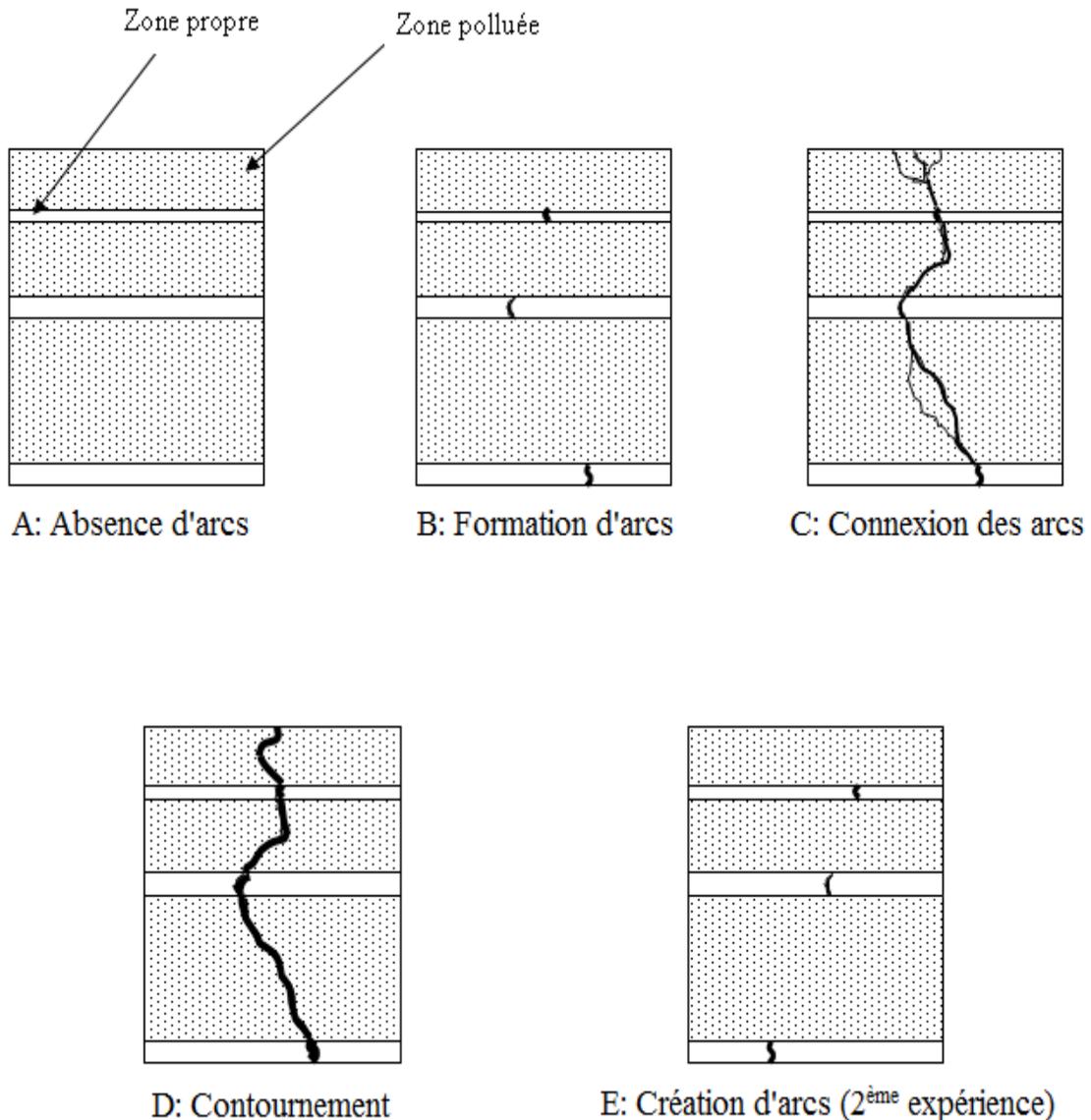


Figure III. 1 : Modèle de J.Danis

### III.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh [26]

Ce modèle est constitué d'une électrode placée au-dessus d'une plaque isolante, à une distance  $S$  variable, considérée égale à la largeur de la zone sèche [26]. Cette plaque est placée sur quatre colonnes uniformément polluées et situées à une distance  $L-S$  de la terre (Figure III.2). Une tension alternative de fréquence 50 Hz est appliquée au modèle.

## Chapitre III principaux travaux sur les isolateurs pollués

---

Les auteurs se sont intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur  $S$  de la zone sèche, pour plusieurs conductivités de la pollution appliquées aux colonnes. Ils ont abouti aux résultats suivants :

- La tension de contournement  $U_c$  en fonction de la distance  $S$  atteint un minimum, correspondant à une largeur  $S_{min}$  située à environ 45-50 % de la longueur totale ; ce sont des courbes en forme de  $V$ .
- Pour une même largeur de la zone sèche, la tension de contournement diminue lorsque la conductivité des couches polluantes augmente.
- La tension de contournement de l'ensemble zone sèche–zone polluée semble être confondue avec celle de la zone polluée lorsque  $S < S_{min}$ , et avec celle de la zone sèche pour  $S > S_{min}$ .
- La tension de contournement de l'isolateur dépend du rapport des largeurs des zones sèche et polluée.
- Les mêmes allures et les mêmes constatations sont faites pour le contournement à 50 Hz, avec un minimum beaucoup moins marqué que dans le cas où la tension est de nature impulsive.
- La tension de contournement totale ne représente pas la somme des tensions de contournement partielles zone sèche – zone polluée.
- La rigidité augmente lorsque la largeur de la zone sèche préétablie devient supérieure à la largeur critique, à partir de laquelle aucun arc stable ne peut être observé.

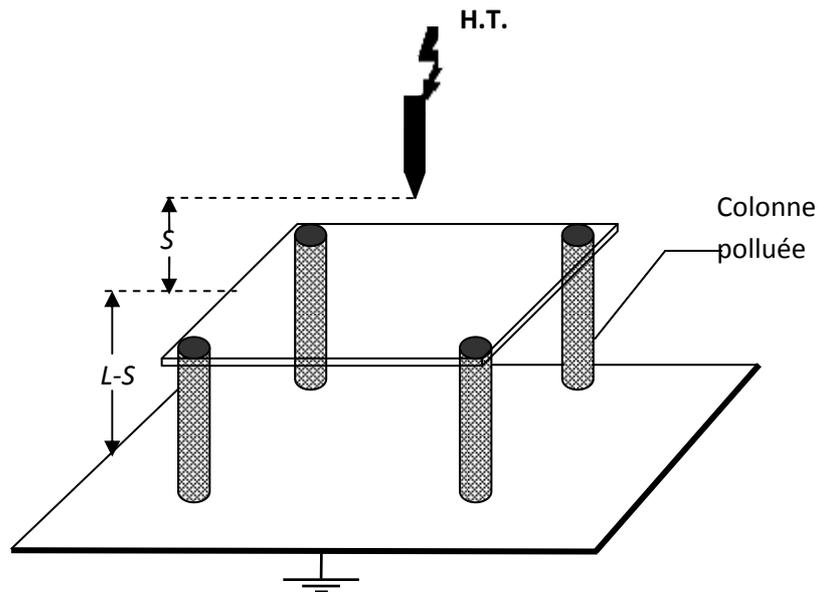


Figure III. 2 : Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh

### III.3. Modèle de D. Namane [14]

Afin d'examiner le comportement des surfaces isolantes sous pollution discontinue, D.Namane [14] a proposé un modèle plan rectangulaire (Figure. III.3). Les différentes contraintes auxquelles est soumis son modèle de laboratoire sont : la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution, la position de la pollution par rapport aux électrodes ainsi que la conductivité de la couche polluante appliquée sur la plaque.

L'influence de ces contraintes sur le courant de fuite, sur la tension d'entretien de l'arc électrique et sur la tension de contournement ainsi que le processus de contournement, est alors examinée.

Les principaux résultats qui ont été obtenus sont les suivants :

- Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est caractérisé par une pollution de 90% de la surface de l'isolateur.

- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre. Ceci est dû au phénomène de la conduction dans la zone sèche et à l'effet de couronne. En effet, lorsque la zone sèche est de côté haute tension, le rayon de courbure de l'électrode circulaire provoque un champ électrique, vraisemblablement plus intense que celui de l'électrode rectangulaire. Par conséquent, on obtient une augmentation du courant de fuite.
- La position de la couche polluante vue des électrodes a peu d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement pour les conductivités utilisées.
- Il existe une longueur critique d'arc à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur est évaluée au tiers de la longueur totale de la plaque isolante et diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par Claverie et Porcheron dans le cas d'une pollution continue. Cette longueur, est toutefois indépendante de la conductivité de la couche polluante.
- Il existe une conductivité limite, selon l'auteur, à partir de laquelle, en cas de zones sèches préétablies, la couche polluante peut être considérée comme court-circuitée. Cette conductivité est comprise entre 500 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

L'auteur a proposé un modèle théorique, décrivant l'isolateur en pollution discontinue. Ce modèle est basé sur le calcul de deux impédances équivalentes à la zone sèche et à celle polluée.

Une bonne corrélation a été constatée entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique tant que la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement. Au-delà, le modèle théorique montre ses limites et ne convient plus puisque celui-ci ne tient pas compte de la variation de l'impédance de la zone sèche avec la tension reportée à ses bornes.

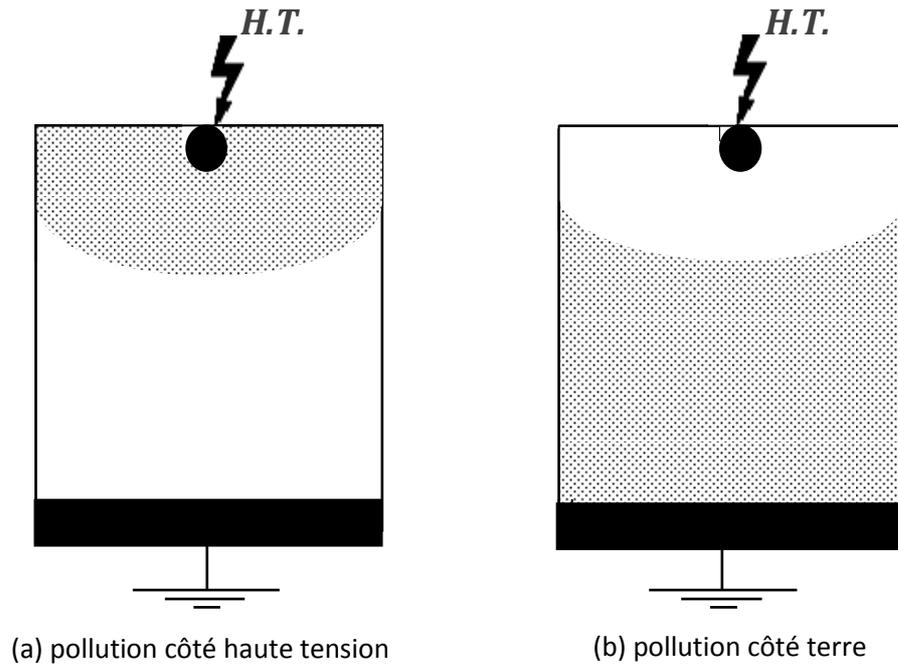


Figure III.3 : Modèle expérimental selon D.Namane

#### III.4. Modèle de P.Claverie et Y.Porcheron

Pour étudier les isolateurs pollués sous tension alternative, plusieurs modèles expérimentaux ont été élaborés. La plus connu est celui de P.Claverie et Y.Porcheron [27]. L'isolateur de forme complexe est remplacé par un isolateur plan (Figure III.4).

Ces auteurs ont montré que, pour un tel modèle, la tension d'arc est donnée par :

$$U_{arc} = \frac{100X}{\sqrt{I}} \quad (\text{III.1})$$

et la tension minimale d'entretien de l'arc  $U_{cx}$  est :

$$U_{cx} = \frac{800 X}{\sqrt{I}} \quad (\text{III.2})$$

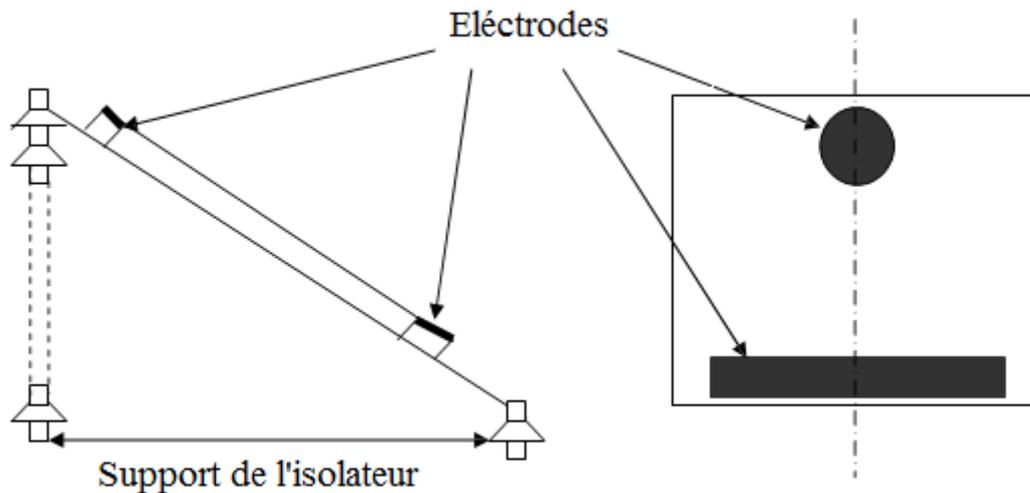


Figure III.4: Modèle expérimental de P.Claverie et Y.Porcheron

### III.5. Modèles de M.Teguar

#### III.5.1. Cas de pollution continue

M. Teguar [17] a élaboré un modèle statique sous tension alternative. Son modèle est basé sur celui de P.Claverie et Y.Porcheron, et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite d'amorçage, il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K-100}{K} \frac{U}{I} = \rho F_P \quad (\text{III.3})$$

Tels que :

$\rho$  : la résistivité de la couche de pollution,

$R_p$  : la résistance de la couche polluante en série avec l'arc,

$K$  : la constante de la caractéristique statique de l'arc.

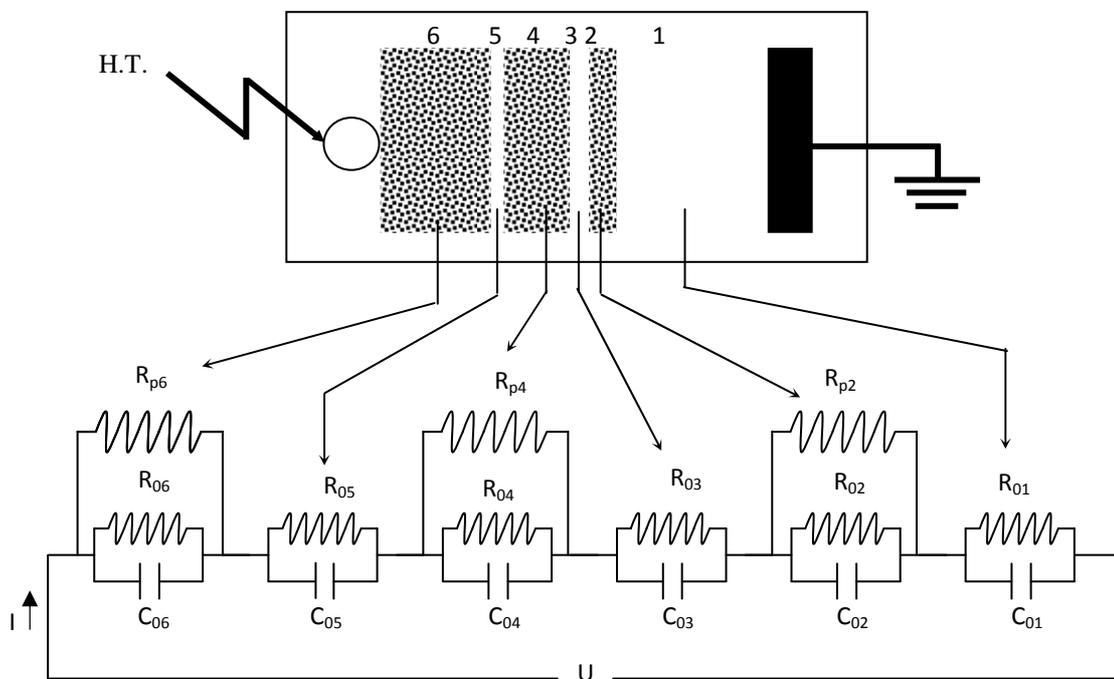
Cette équation lui a permis d'évaluer la longueur critique de l'arc et par suite tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par M.Teguar [17] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

### III.5.2. Cas d'une pollution discontinue

M.Teguar [17] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques (Figure III.5). Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée.

Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.



**Figure III.5 :** Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon M.Teguar

La figure ci-dessus représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande  $i$  ( $i=1$  à  $6$ ) est constituée d'une résistance  $R_{0i}$  en parallèle avec une capacité  $C_{0i}$ . Pour chaque bande polluée  $i$  ( $i=2, 4, 6$ ), ces circuits sont shuntés par une résistance  $R_{pi}$  représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite).

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaires et selon la recommandation de la CEI-60-1 [27], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{SP} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{SP} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \quad (\text{III.4})$$

Avec  $i=2, 4, 6$ .

$R_{pi}$  : la résistance de la couche polluante,

$dl$  : l'élément de longueur,

$L_i$  : la longueur de pollution,

$b$  : la largeur de la couche de pollution,

$f$  : le facteur de forme.

Les résultats simulés concordent parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de la couche polluante.

### III.6. Modèle de A.Mekhaldi et S.Bouazabia

Les équations, correspondant au modèle de P.Claverie et Y.Porcheron [28], ont été proposées par A.Mekhaldi et S.Bouazabia [29]. Utilisant les équations de l'électromagnétisme classique (équation de poisson), ces auteurs ont établi, en assimilant le modèle à un système cylindrique (Figure III.6), l'expression du courant de fuite suivante :

$$I = \frac{U \sigma \alpha \epsilon}{\ln \left[ \frac{a+L}{a+x} \right]} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$\alpha = 2 \tan^{-1} (d/2(\alpha + L)),$$

$\sigma$ : la conductivité du milieu pollué,

U : la tension d'alimentation,

a : le rayon de l'électrode circulaire,

L : la distance inter électrodes,

x : la longueur de l'arc,

e : l'épaisseur de l'électrode,

d : la longueur de l'électrode circulaire.

Les auteurs ont déduit la résistance de la couche de pollution :

$$R_p = \frac{\ln\left[\frac{a+L}{a+x}\right]}{\sigma a e} \quad (\text{III.6})$$

Quelques comparaisons avec des résultats expérimentaux sont alors effectuées, montrant une assez bonne concordance entre les deux approches (théorique et pratique), pour les faibles niveaux de tension et pour les grandes épaisseurs de la couche de pollution.

Pour les tensions élevées et les faibles épaisseurs de la pollution, la corrélation est plutôt mauvaise. Le modèle serait alors assimilé à un système pointe-plan.

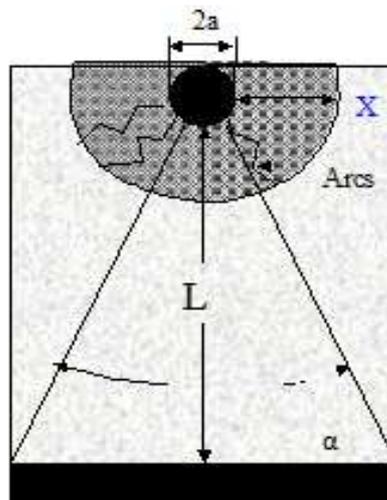
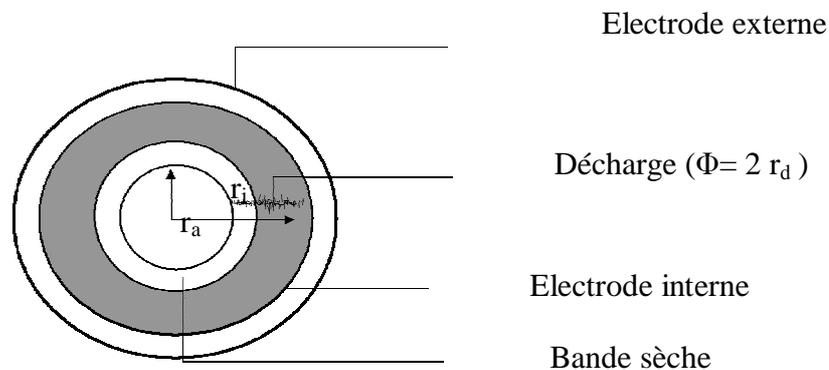


Figure III.6 : Modèle de A.Mekhaldi et S.Bouazabia

### III.7. Modèle de Woodson et Mc Elory

Connu sous le nom du modèle du disque circulaire, Woodson et Mc Elory [30] ont essayé de reproduire, d'une façon idéale, la surface d'un isolateur en utilisant une configuration géométrique circulaire (Figure III.7).



**Figure III.7:** Modèle de Woodson et McElroy

Utilisant certaines hypothèses, la résistivité superficielle du polluant peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R(X) = \frac{C}{\sigma_s} (r_0 - r_a)^n \quad (III.7)$$

$r_0$  : est le rayon de l'électrode externe,

$\sigma_s$ : la conductivité superficielle du polluant,

$r_a$ : la somme de la longueur initiale de l'arc et la longueur de l'électrode interne ( $r_i$ ),

C et n : des constantes.

Ce modèle n'a pas donné des résultats satisfaisants. Cela a été imputé à la non uniformité de la résistivité superficielle de l'isolateur.

### III.8. Modèle de la couche mixte

Comme les couches de pollution qui s'accumulent à la surface des isolateurs sont non homogènes, Obenaus et Boheme [31] ont considéré que la résistance superficielle d'un isolateur à long fût pollué ne peut être uniforme le long de sa ligne de fuite. Elle est plutôt équivalente à deux couches en série, de résistance linéique  $r_{p1}$  et  $r_{p2}$  correspondant

respectivement à la tige et aux ailettes. Ils ont décomposé ainsi la longueur totale de fuite en deux distances partielles  $L_1$  et  $L_2$  correspondant respectivement à la tige et aux ailettes (Figure III.8).

En appliquant le critère de Hampton, ils ont pu déduire la relation ci-dessous, donnant le gradient du contournement critique en fonction de deux paramètres :

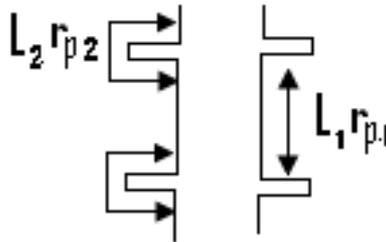
$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{Ar_{p1}} \quad (\text{III.8})$$

où  $A=80\text{VA/cm}$  et  $r_{p1} > r_{p2}$

Par application du critère d'Hesketh, l'expression précédente devient :

$$\frac{U_c}{L} = 0.8(Lr_p I) \quad (\text{III.9})$$

où  $r_p$  est la résistance linéique sur une longueur  $L_1$  ou  $L_2$ .



**Figure III.8 :** Modèle à long fût selon Boehme et Obenaus

### III.9. Conclusion

Nous avons résumé, dans ce chapitre, un certain nombre de travaux de recherche qui préoccupent les chercheurs dans le domaine de la pollution des isolateurs. En effet, nous avons rappelé les principaux travaux rapportés dans la littérature, en vue de décrire les phénomènes d'arcs sur des surfaces polluées.

Dans le prochain chapitre, nous présentons les techniques expérimentales relatives aux essais que nous avons effectués au Laboratoire de Haute de Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, permettant de juger les performances de l'isolateur capot et tige type 1512L, artificiellement pollué.

**Chapitre IV :**  
**Techniques expérimentales**

## IV.1. Introduction

Afin d'étudier l'influence de la nature et la conductivité de la pollution sur le comportement de l'isolateur capot et tige type 1512L artificiellement pollué, nous l'avons soumis à des essais au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Pour cela, de nombreuses couches de pollution, sous formes de solutions chimiques préparées au Laboratoire de l'Environnement du Département de Génie de l'Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique, de différentes conductivités, ont été appliquées. Pour une même conductivité, deux solutions saline (composée de l'eau distillée et NaCl) et alcaline (composée de l'eau distillée et NaOH) ont été adoptées. L'effet de l'eau minérale ayant une conductivité donnée a été aussi examiné et comparé à celui des deux solutions à la même conductivité. Les résultats ainsi trouvés ont été comparés à ceux obtenus dans le cas de l'application d'une eau distillée.

En outre, deux répartitions de la pollution ont été considérées :

- Une pollution continue.
- Une pollution discontinue contenant deux configurations ; pollution du côté terre et pollution du côté haute tension.

En effet, pour une configuration donnée, nous avons étudié l'influence de la tension appliquée, de la conductivité ainsi que la nature de la couche de pollution sur la tension de contournement, le courant de fuite, l'impédance électrique équivalente vue des électrodes et le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée.

## IV.2. Dispositif expérimental

### IV.2.1. Circuit d'essais au laboratoire de l'ENP

Le Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique est muni d'une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque "HAEFELY" composée des équipements (Figure IV.1) suivants :

- Un transformateur d'essai 500V/300kV, 50Hz.
- Un transformateur de réglage 50kVA.

- Un diviseur de tension capacitif constitué d'une capacité  $C_1 = 400 \mu\text{F}$  en série avec une capacité  $C_2$  variable selon le calibre de mesure.
- Des appareils de mesures et de protection.
- L'objet d'essai.

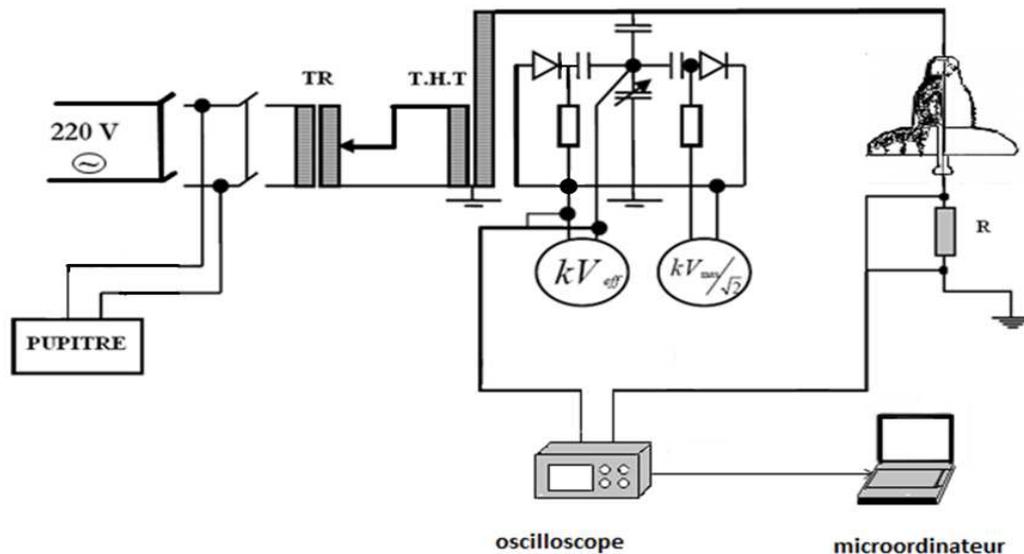


Figure IV.1 : Circuit d'essais de laboratoire de haute tension

#### IV.2.1.1. Transformateur d'essais

Il délivre la tension appliquée à l'objet d'essai. Il est de type monophasé, ces caractéristiques sont les suivantes :

- Tension primaire nominale  $U_{1n} = 500\text{V}$  (50Hz).
- Tension secondaire nominale  $U_n = 300\text{kV}$ .
- Puissance apparente nominale  $S_n = 50\text{kVA}$ .
- Tension de court-circuit  $U_{cc} = 5.46\%$ .

#### IV.2.1.2. Transformateur de réglage

Il permet le réglage de la tension secondaire à la sortie du transformateur d'essai de zéro à la pleine tension. Le réglage est fait manuellement à l'aide d'un volant. Ces caractéristiques sont :

- Tension primaire nominale  $U_{1n} = 220V$ .
- Tension secondaire réglable (de 0 à 500V).
- Puissance apparente nominale  $S_n = 50kVA$ .

#### **IV.2.1.3. Diviseur capacitif de tension**

Il est alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes du voltmètre installé sur le pupitre de commande. Le diviseur capacitif est composé d'une capacité  $C_1 = 400 \mu F$  en série avec une capacité  $C_2$  variable. Cette dernière permet de contrôler la tension de sortie, afin d'obtenir les calibres de mesures : 75kV, 150kV et 300kV.

La tension recueillie aux bornes de la capacité variable est mesurée à l'aide d'un voltmètre électrostatique donnant la valeur efficace de la tension.

#### **IV.2.1.4. Pupitre de commande**

Celui-ci est alimenté en 220V indépendamment du régulateur de tension et du transformateur d'essai à travers un transformateur d'isolement.

#### **IV.2.1.5. Appareils de mesure et de protection**

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire. Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par des fusibles et un relais thermique.

#### **IV.2.1.6. Objet d'essai**

L'isolateur réel 1512L en verre trempé est montré à la figure IV.2.



a- Vue latérale

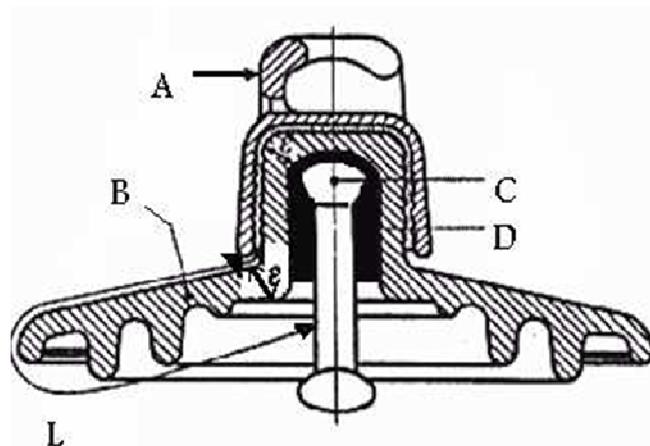


b- Vue supérieure

**Figure IV.2** : Isolateur 1512L en verre trempé

Il est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dans la tête conique est également scellée dans le verre. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant et y être maintenue par une goupille.

L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique (figure IV.2) [9].

**Figure IV.3** : Schéma de l'isolateur 1512L

**A** : le capot.

**B** : le diélectrique (verre trempé ou céramique).

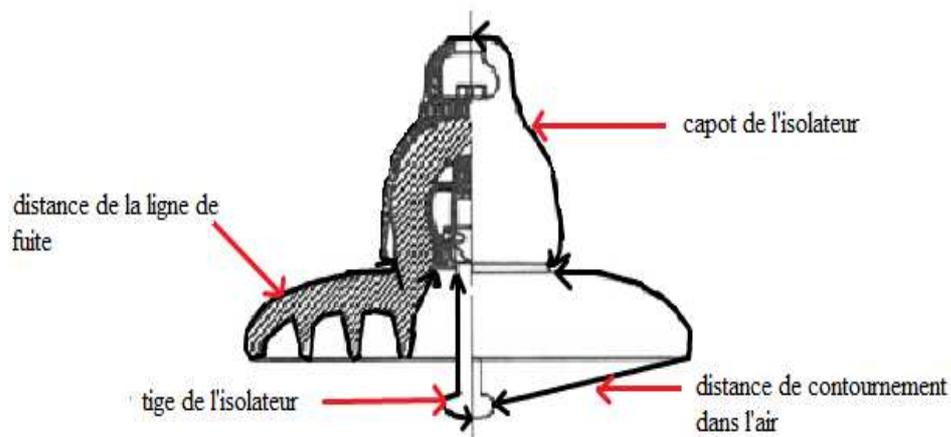
**C** : la tige.

**D** : le ciment de fixation.

**L** : la plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.

$\epsilon$  : la longueur du canal de perforation,  $\epsilon \ll L/2$ .

Les dimensions de l'isolateur réel 1512L en verre trempé utilisé lors de nos essais, sont mesurées à l'aide d'un mètre ruban non extensible. Nous avons mesuré la longueur de la ligne de fuite, la distance de contournement dans l'air, la tige de l'isolateur et le capot de l'isolateur (Figure IV.4). Ces grandeurs sont représentées dans le tableau IV.1.



**Figure IV.4** : Grandeurs mesurées

Grandeur	Valeur (mm)
Longueur de la ligne de fuite	292
Distance de contournement dans l'air	230
Capot de l'isolateur	244
Tige de l'isolateur	125

**Tableau IV.1** : Grandeurs mesurées de l'isolateur 1512L

### IV.3. Préparation des solutions polluantes

Les solutions polluantes ont été préparées au Laboratoire de l'Environnement du Département de Génie de l'Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique. Nous avons utilisé deux solutions de différente nature : une solution saline (à base de NaCl) et une autre alcaline (à base de NaOH).

Pour la solution saline, nous avons rajouté à l'eau distillée, versée dans un bécher mis sous agitation magnétique, des quantités de chlorure de sodium pour préparer la solution saline, et des quantités d'hydroxyde de sodium pour préparer la solution alcaline. La conductivité est mesurée en plongeant dans le bécher la sonde conductimètre. Nous fixons, à chaque fois, la conductivité de la solution à la valeur désirée grâce à un conductimètre, soit en variant la concentration de NaOH ou de NaCl dans l'eau distillée. Les conductivités ainsi choisies sont les suivantes : 265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 2.7  $\text{mS}/\text{cm}$ . En effet, nous pouvons, non seulement étudier l'influence de la nature de pollution, mais également, l'impact de la conductivité sur le comportement de l'isolateur en question.

Par ailleurs, la conductivité de l'eau distillée ainsi utilisée est de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , et celle de l'eau minérale est de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### IV.4. Préparation de l'isolateur réel 1512L

Avant chaque essai, l'isolateur est bien nettoyé avec de l'eau distillée et séché en utilisant des serviettes en papier. Un deuxième nettoyage est effectué à l'aide d'un coton imbibé d'alcool chirurgical à 70°, afin d'assurer une propreté quasi-totale de l'isolateur.

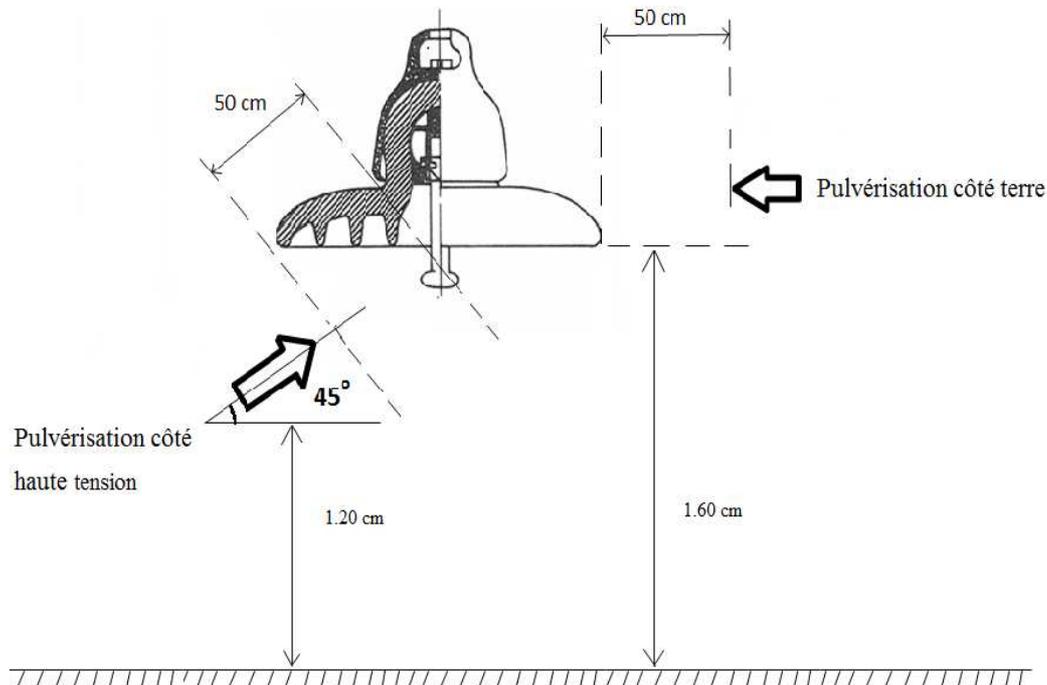
### IV.5. Méthode de pulvérisation

La méthode de pulvérisation a été choisie pour polluer artificiellement la surface du l'isolateur.

En effet, nous avons pulvérisé uniformément les surfaces inférieures et supérieure (pollution continue) ou la surface inférieure ou supérieure (pollution discontinue) de l'isolateur, selon le cas, pour assurer une répartition uniforme et une bonne reproductibilité de la couche polluante.

Pour cela, nous avons gardé, durant tous les essais, le même nombre de pulvérisations (huit pulvérisations) pour les deux côtés : haute tension (surface inférieure) et/ou terre (surface supérieure).

La figure IV.5 illustre le mode de pulvérisation.



**Figure IV.5 :** Mode de pulvérisation de l'isolateur

#### IV.6. Mesure de la tension de contournement

A l'état pollué, la mise en service de la tension entre les deux électrodes de l'isolateur, a été effectuée quatre minutes après avoir humidifié l'isolateur par les solutions utilisées. La mesure de la tension de contournement du système isolant a été relevée, pour les deux répartitions ainsi que pour toutes les conductivités et les compositions chimiques de la pollution. Conformément aux normes utilisées, la valeur considérée représente la moyenne arithmétique de cinq mesures [24]. Cette valeur moyenne permet, non seulement de connaître l'influence de la nature chimique de la pollution, mais également de déterminer les paliers de tension à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite.

### **IV.7. Enregistrement du courant de fuite et de la tension appliquée**

L'enregistrement du courant de fuite, par l'intermédiaire de l'onde de tension captée aux bornes d'une résistance non-inductive de 1 k $\Omega$  insérée entre le capot et la terre, et de la tension au secondaire du transformateur s'effectue à l'aide d'un oscilloscope numérique de marque TEKTRONIX.

Pour éviter l'influence du champ électrique, qui pourrait introduire des parasites dans le signal recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique en aluminium mise à la terre.

### **IV.8. L'évolution du courant de fuite en fonction du temps**

Afin d'étudier de l'évolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, nous fixons la tension appliquée aux bornes de l'isolateur, pendant dix minutes, ainsi nous relevons, à chaque minute, la valeur de l'amplitude du courant de fuite.

### **IV.9. Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée**

La mesure du déphasage est effectuée à l'aide de l'oscilloscope TEKTRONIX à fréquence d'échantillonnage de 500 MHz, ayant deux canaux d'acquisition des signaux l'un pour la tension appliquée et l'autre pour le courant de fuite.

En effet, l'enregistrement simultané de l'onde du courant de fuite et celle de la tension appliquée permet l'obtention de l'angle de déphasage. Ce dernier peut être affiché sur l'écran de l'oscilloscope.

### **IV.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'objectif de notre travail, le matériel que nous avons utilisé ainsi que les méthodes d'essais. En effet, la station d'essais à fréquence industrielle (50 Hz) du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, composée essentiellement d'un transformateur d'essai de 300kV, d'un transformateur de réglage, d'un diviseur capacitif, des appareils de mesures et de

protection, permet d'examiner le comportement de l'isolateur capot et tige 1512L soumis à divers paramètres électrochimiques.

Pour cela, nous nous sommes intéressés à l'étude de la variation de tension de contournement et courant de fuite en fonction de la tension appliquée, conductivité, ainsi que la nature de la couche de pollution.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats ainsi obtenus.

**Chapitre V :**  
**Résultats expérimentaux**  
**et interprétations**

### V.1. Introduction

Nous présentons, dans ce chapitre, les résultats expérimentaux relatifs à l'influence de la nature, de la conductivité et de la distribution de la pollution sur le comportement d'un isolateur capot et tige de type 1512L. Plusieurs solutions (alcaline à base de NaOH, saline à base de NaCl, eau distillée et eau minérale), différentes conductivités (10  $\mu\text{S/cm}$ , 265  $\mu\text{S/cm}$ , 465  $\mu\text{S/cm}$ , 840  $\mu\text{S/cm}$  et 2.7  $\text{mS/cm}$ ) et deux répartitions de la pollution (continue et discontinue en pulvérisant la surface supérieure puis, la surface inférieure de l'isolateur) ont été appliquées. Nous avons examiné l'influence de ces paramètres sur la tension de contournement, le courant de fuite, l'impédance électrique équivalente vue des électrodes et le déphasage courant-tension.

Notons que les essais de contournement effectués nous permettent, non seulement, de connaître la tension de contournement de l'isolateur, mais également, de déterminer les paliers de tension à appliquer lors de la mesure du courant de fuite et du déphasage courant-tension.

### V.2. Phénomènes observés lors des essais

Lors de nos essais, nous avons remarqué que le courant de fuite (en termes d'amplitude, de forme et de déphasage par rapport à la tension) dépend de plusieurs paramètres, à savoir la tension appliquée, l'état de la surface de l'isolateur, la nature de la couche de pollution et son emplacement, la conductivité de la couche de pollution et l'instant de mesure considéré.

Pour la majorité des cas, le courant de fuite a, au début, une forme quasi sinusoïdale, ceci durera quelques instants. Cette durée varie très rapidement (instantanément) pour les fortes conductivités. Cependant, elle peut atteindre les quelques secondes pour les faibles conductivités, avant que les décharges aient lieu. L'apparition de décharges électriques engendre la diminution de l'amplitude du courant de fuite, la déformation (distorsions) de sa forme et l'augmentation de son déphasage par rapport à la tension à cause de l'assèchement de la pollution.

Dans le cas d'une conductivité très forte (840  $\mu\text{S/cm}$ , 2.7  $\text{mS/cm}$ ), des pics de décharges commencent à apparaître à partir du niveau 15kV. Ces pics sont accompagnés par un bruit sonore. Pour le niveau suivant, cet effet apparaît bien avant,

avec des décharges plus importantes, le nombre de décharges augmente avec le temps d'application de la tension ; après un certain temps l'intensité du bruit commence à diminuer ainsi que l'amplitude du courant et le nombre des pics.

Lors de la mesure de la tension de contournement, nous avons entendu un bruit qui croît avec l'augmentation de la tension jusqu'au contournement de l'isolateur. Ce bruit est dû à l'effet de couronne qui est une première phase de contournement. Par ailleurs, et exceptionnellement pour les conductivités inférieures ou égales à  $265 \mu\text{S}/\text{cm}$ , le contournement se produit directement sans apparition au préalable de décharges préliminaires.

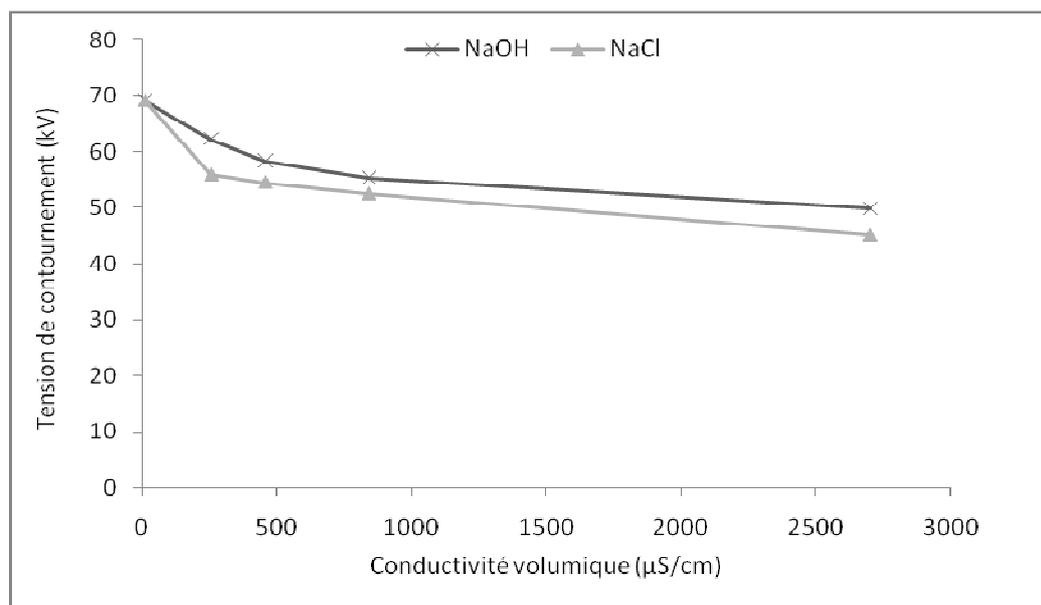
### V.3. Pollution continue

#### V.3.1. Tension de contournement

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité et de la nature de la pollution.

##### V.3.1.1. Influence de la conductivité

La figure (V.1) représente l'évolution de la tension de contournement en fonction de la conductivité des solutions alcaline et saline ainsi utilisées.



**Figure V.1 :** Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique

Pour les deux solutions (alcaline et saline), nous remarquons que la tension de contournement diminue en fonction de la conductivité volumique.

En effet, pour une même solution, lorsque la conductivité augmente, la tension de contournement décroît rapidement pour des conductivités inférieures à 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et plus lentement au-delà de cette conductivité, en tendant vers une limite propre à chaque solution.

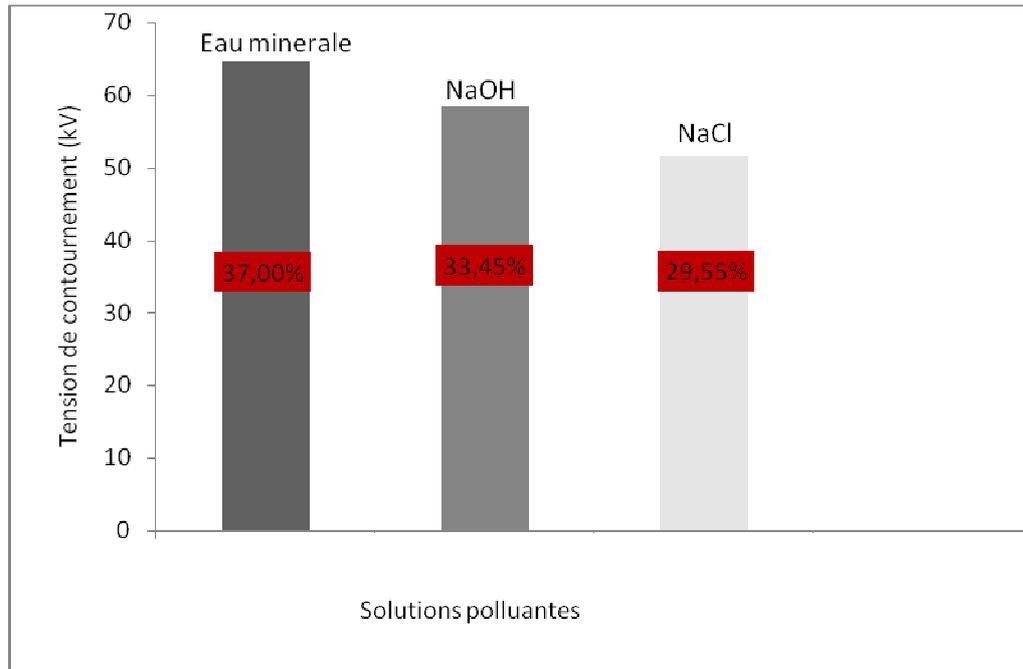
La valeur maximale (69.2 kV) de la tension de contournement est obtenue pour une conductivité de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette dernière correspond à la conductivité volumique de l'eau distillée utilisée et prise comme référence.

En effet, il est tout à fait évident que la tension de contournement prélevée dans le cas de l'utilisation de l'eau distillée est plus élevée par rapport à celles obtenues dans le cas de l'application des solutions.

Par ailleurs, les tensions de contournements relatives à la solution alcaline sont plus élevées que celles obtenues lors de l'application de la solution saline. Pour une même conductivité volumique, nous pouvons déduire que le système isolant (l'isolateur) est plus rigide lorsqu'il est pulvérisé par une solution alcaline. Par voie de conséquence, le cas le plus défavorable, correspondant à une tension de contournement la plus faible, est obtenue lorsqu'une solution saline est appliquée sur l'isolateur en question.

### **V.3.1.2. Influence de la nature de pollution**

Nous avons comparé la tension de contournement dans le cas de l'utilisation de l'eau minérale, de la solution de NaOH et de la solution de NaCl pour la même conductivité (465  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Nous remarquons que la tension de contournement est affectée par la nature de la pollution, car elle diffère pour les trois cas. Elle est plus élevée lors de l'utilisation de l'eau minérale, et plus faible dans le cas où l'isolateur est pulvérisé par la solution de NaCl (Figure V.2).



**Figure V.2 :** Tension de contournement cas des trois solutions (de NaCl, de NaOH et l'eau minérale), pour une conductivité de  $465\mu\text{S}/\text{cm}$

Sur la figure (V.2), nous pouvons bien remarquer que la tension de contournement obtenue dans le cas de la solution à base de NaOH est relativement élevée à celle prélevée lorsque la solution à base de NaCl est appliquée. Cela peut être justifié par la mobilité et la conductance des ions dans les solutions.

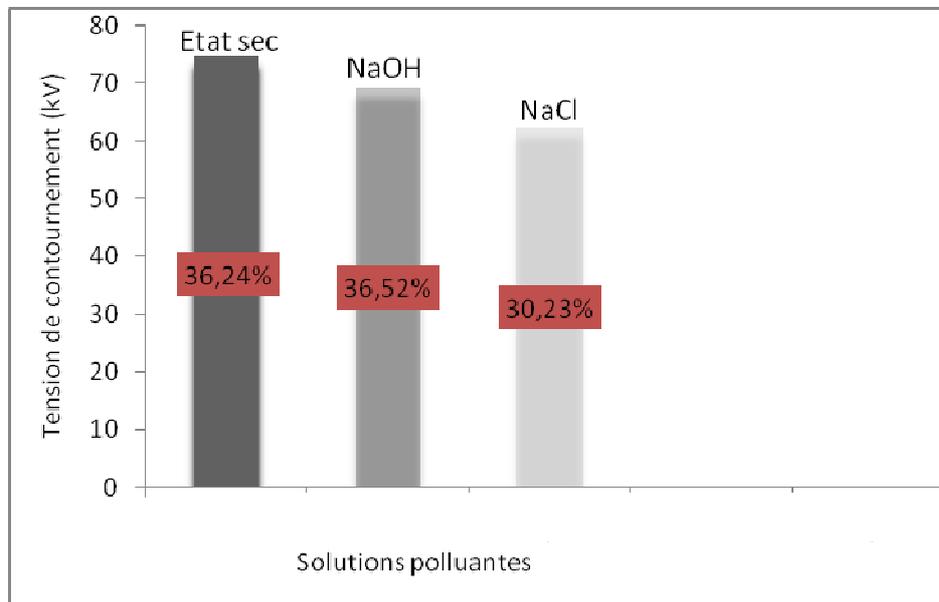
En effet, la polarité de la molécule entière se déduit de la grandeur de son moment dipolaire qui est un vecteur joignant le barycentre des charges négatives à celui des charges positives. La polarité moléculaire augmente avec la valeur de la charge en ces centres et avec la distance qui les sépare. Les moments dipolaires devraient normalement être exprimés en Coulomb multiplié par mètre (C.m).

Quand des molécules d'eau sont placées dans un champ électrique, elles tendent à orienter leurs moments dipolaires dans la direction de ce champ. C'est ce qui se passe quand on dissout du sel de cuisine dans l'eau. Le chlorure de sodium (NaCl) se dissocie instantanément en ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) et chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), créant d'intenses champs électriques. Les molécules d'eau s'assemblent autour de ces ions et forment un nombre variable (en général deux) de couches d'hydratation concentriques. La tension de contournement dépend de la mobilité des ions constituant la solution.

### V.3.1.3. Influence de l'état de surface

Nous présentons à la figure (V.3), la valeur moyenne de la tension de contournement à l'état sec (propre), et à l'état humide. Pour ce dernier cas, nous avons choisi les solutions de NaOH et de NaCl à la conductivité la plus faible ( $265 \mu\text{S/cm}$ ).

Nous remarquons que la tension de contournement est affectée par l'état de surface de l'isolateur. La moyenne de la tension de contournement est grande dans l'état sec qu'à l'état humide. Par conséquent, l'isolateur est moins rigide lorsqu'il est humide. En effet, la pollution engendre une diminution de la rigidité diélectrique du système isolant.



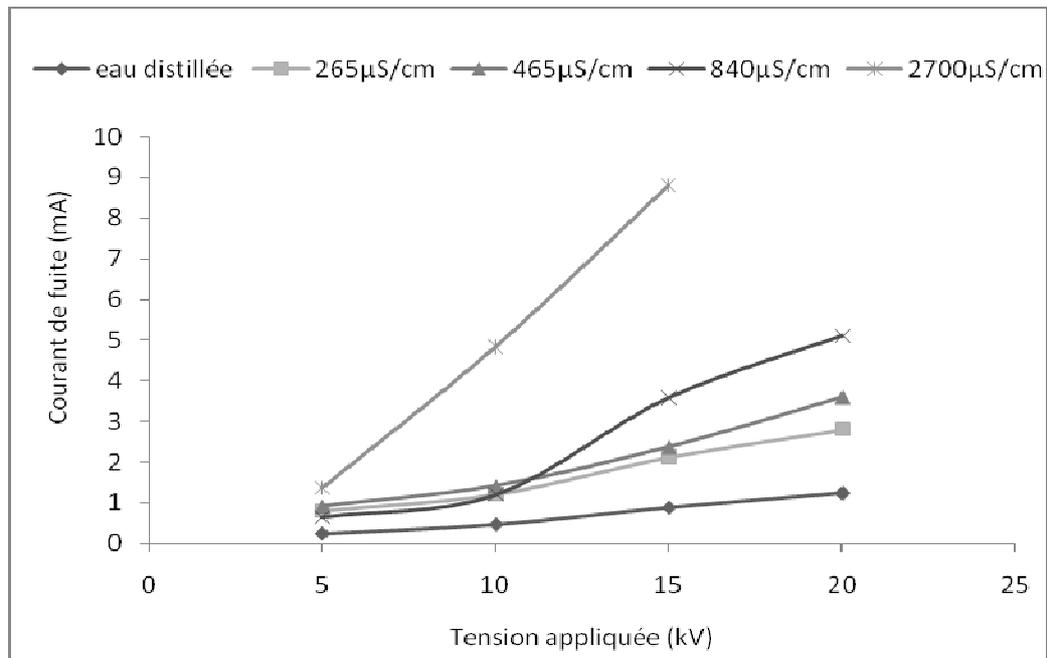
**Figure V.3 :** Tension de contournement à l'état sec et humide (cas des solutions de NaOH et de NaCl à  $265 \mu\text{S/cm}$ )

### V.3.2. Courant de fuite

#### V.3.2.1. Influence de la tension appliquée

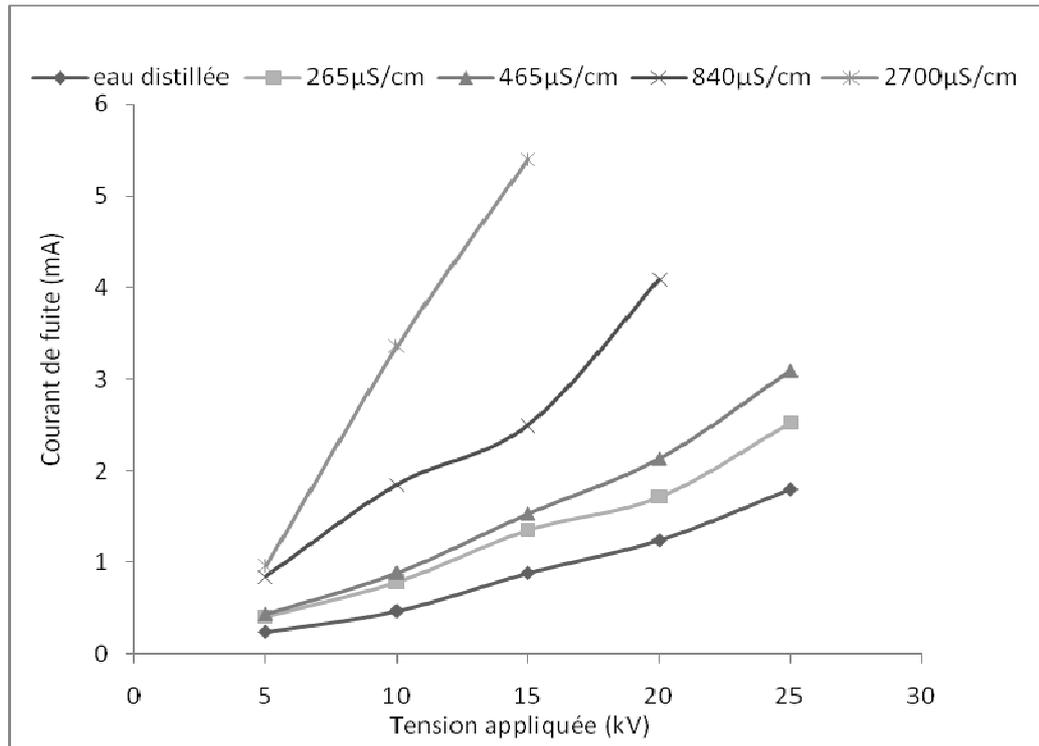
Nous présentons aux figures (IV.4 et IV.5), la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, respectivement pour les deux solutions chimiques polluantes saline et alcaline, et ce pour toutes les conductivités que nous avons choisies.

Dans le but de faire une comparaison quantitative propre à chaque solution, nous avons tracé, en outre, la caractéristique courant-tension obtenue lors de l'application de l'eau distillée. Vu la faible conductivité de cette dernière eau, il est évident qu'elle présente, pour une tension donnée, un faible courant de fuite relativement à ceux obtenus lorsque l'isolateur est pulvérisé par une des solutions chimiques ainsi adoptées.



**Figure V.4 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl

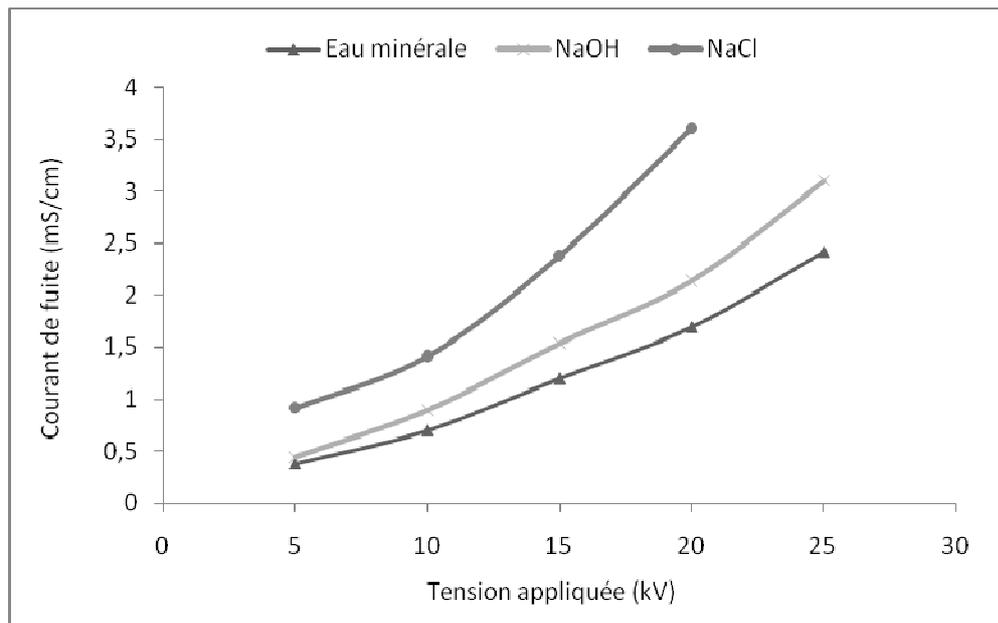
Nous remarquons aussi que le courant de fuite augmente avec la conductivité, pour les deux solutions chimiques de NaOH et NaCl.



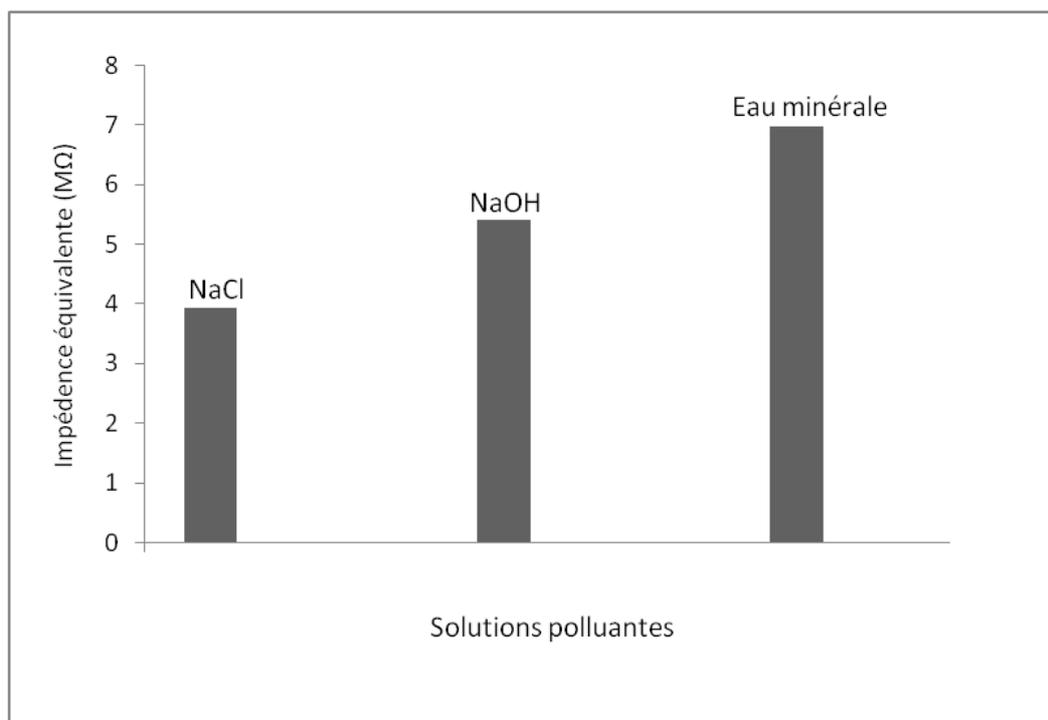
**Figure V.5:** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH

### V.3.2.2. Influence de la nature de pollution

Nous remarquons d'après la figure (V.6) que, quelle que soit la solution chimique polluante, le courant de fuite croît avec la tension appliquée. Cette augmentation peut être assimilée à une droite dont la pente varie en fonction de la solution polluante utilisée. En effet, la différence dans les pentes des trois caractéristiques peut être justifiée par la contribution de chaque solution sur le comportement de l'isolateur, c'est-à-dire que chaque solution polluante a sa propre impédance électrique équivalente vue des électrodes. Par voie de conséquence, nous pouvons, dans ces conditions, déterminer les impédances électriques équivalentes correspondantes.



**Figure V.6 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour une conductivité de 465 µS/cm

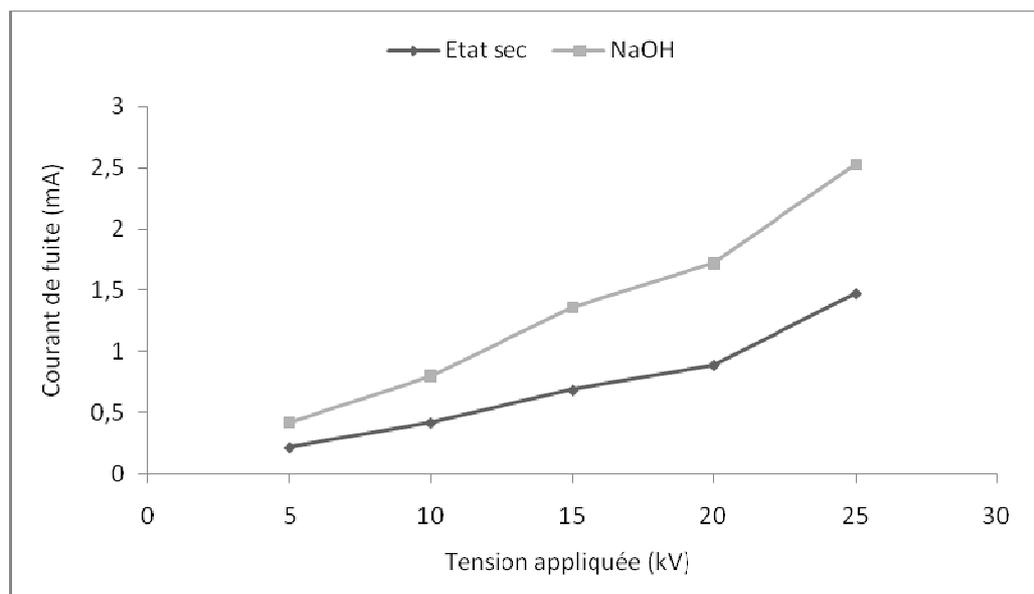


**Figure V.7 :** Impédance équivalente de l'isolateur des trois solutions (eau minérale, NaCl, NaOH)

### V.3.2.3. Influence de l'état de la surface

Afin d'étudier l'effet de la pollution sur le comportement de l'isolateur, nous sommes en mesure de comparer, pour une tension donnée, le courant de fuite obtenu lors de l'application d'une solution polluante à celui prélevé lorsque l'isolateur est à l'état propre et sec. Afin de bien illustrer quantitativement cette comparaison, nous avons choisi la solution NaOH avec une conductivité de  $265\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En effet, nous avons tracé à la figure (V.8) la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, dans le cas où l'isolateur est pulvérisé par une solution de NaOH ayant une conductivité de  $265\mu\text{S}/\text{cm}$  et dans le cas où l'isolateur est à l'état sec et propre. Cette figure nous permet, en fait, d'examiner la contribution de la solution alcaline sur le courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur en question.



**Figure V.8 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée

En se basant sur la figure précédente, nous constatons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée, et ce pour les deux cas présentés.

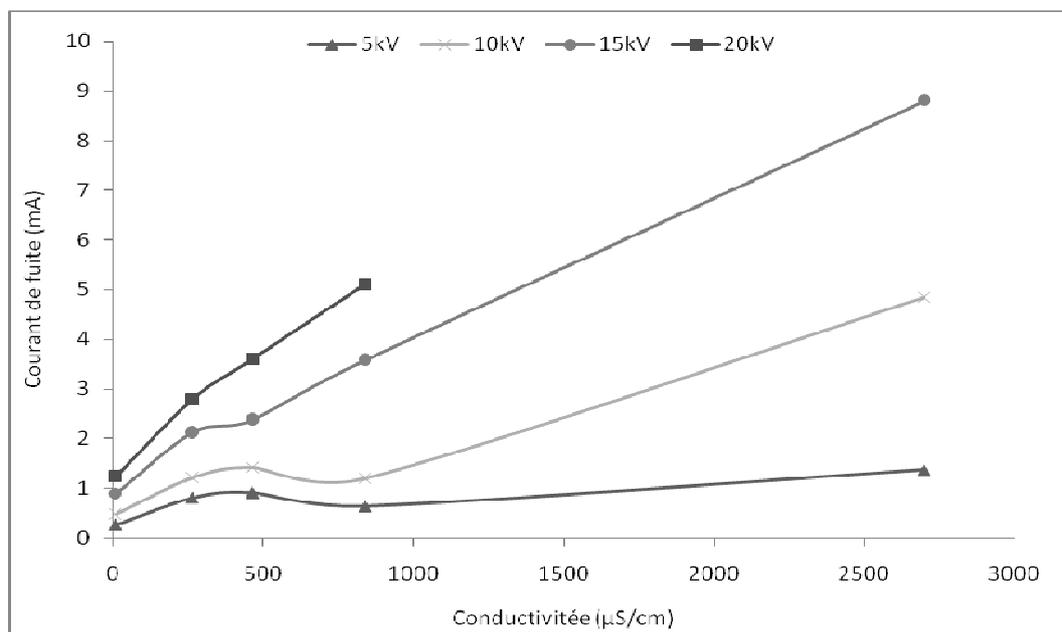
Il est évident que les valeurs de courant de fuite obtenues à l'état sec sont relativement faibles à celles correspondantes au cas où l'isolateur est pulvérisé par la solution de NaOH possédant une conductivité de  $265\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### V.3.2.4. Influence de la conductivité

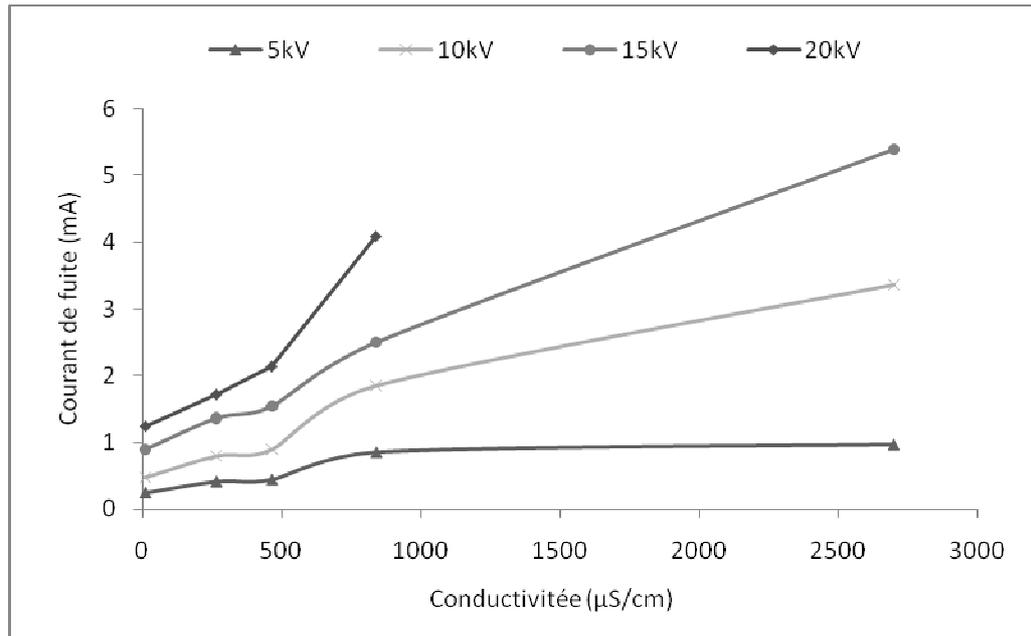
Nous présentons aux figures (V.9 et V.10), la variation du courant de fuite en fonction de la conductivité des solutions polluantes de NaCl et de NaOH, pour chaque niveau de tension.

Nous remarquons que, pour un niveau de tension donné, le courant de fuite augmente avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

Pour une conductivité donnée, nous remarquons que la valeur du courant de fuite obtenue dans le cas où l'isolateur est pulvérisé par la solution de NaCl est relativement élevée à celle prélevée lors de l'application de la solution de NaOH. A titre d'exemple, pour le niveau de tension de 15 kV, la valeur du courant de fuite lors de l'application de la solution de NaCl atteint 9 mA contre 5.6 mA obtenu dans le deuxième cas (cas de la solution alcaline). Il est important de signaler qu'en général, cette différence augmente avec la tension appliquée.



**Figure V.9 :** Courant de fuite en fonction de la conductivité, cas de la solution de NaCl



**Figure V.10 :** Courant de fuite en fonction de la conductivité, cas de la solution de NaOH

### V.3.2.5. Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension

Dans cette partie, nous étudions l'évolution de courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension. Pour cela, nous avons fixé un niveau de tension pendant dix minutes, et avons relevé le courant de fuite chaque minute.

La figure (V.11) représente la variation du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension lorsque l'isolateur est pulvérisé par l'eau distillée de conductivité de  $10 \mu\text{S/cm}$ . Cette figure montre que le courant de fuite évolue d'une manière pratiquement linéaire en fonction de temps.

Pour les niveaux de tension relativement faibles (inférieurs ou égaux à 10 kV), nous remarquons que l'amplitude de courant de fuite est presque constante. Ceci s'explique par le fait que ces niveaux de tension n'atteignent pas le seuil qui permet la création des décharges électrique (le champ électrique est faible). En effet, l'état de surface de l'isolateur n'a pas subit un changement remarquable.

Pour les niveaux de tension relativement élevés (supérieurs à 10 kV) et pour la même solution (eau distillée), le courant de fuite décroît quasi-linéairement en fonction de temps. Cela peut être justifié par l'apparition des zones sèches sur la surface d'isolateur, qui augmente l'effet capacitif, diminuant ainsi le courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur.

Pour les solutions utilisées (NaCl, NaOH, et l'eau minérale), nous remarquons, en général, que l'amplitude du courant de fuite décroît, puis se stabilise en tendant vers une valeur limite, et ce en fonction du temps d'application de la tension (Figure V.11 à V.20). Il est à noter que plus le niveau de tension est élevé, plus cette décroissance du courant de fuite est accentuée.

Cette diminution du courant de fuite peut être justifiée par l'assèchement rapide de la couche polluante, notamment pour les tensions appliquées élevées durant les premiers instants. Il est évident que ce courant tend vers une limite obtenue dans le cas où l'isolateur est propre et sec correspondant à l'assèchement total de la couche polluante, constituée d'une des solutions chimiques susmentionnées, à la surface de l'isolateur en question.

Pour une même conductivité et un même niveau de tension, les courants de fuite obtenue lors de l'application des solutions saline (de NaCl) et alcaline (de NaOH), évoluent de la même manière.

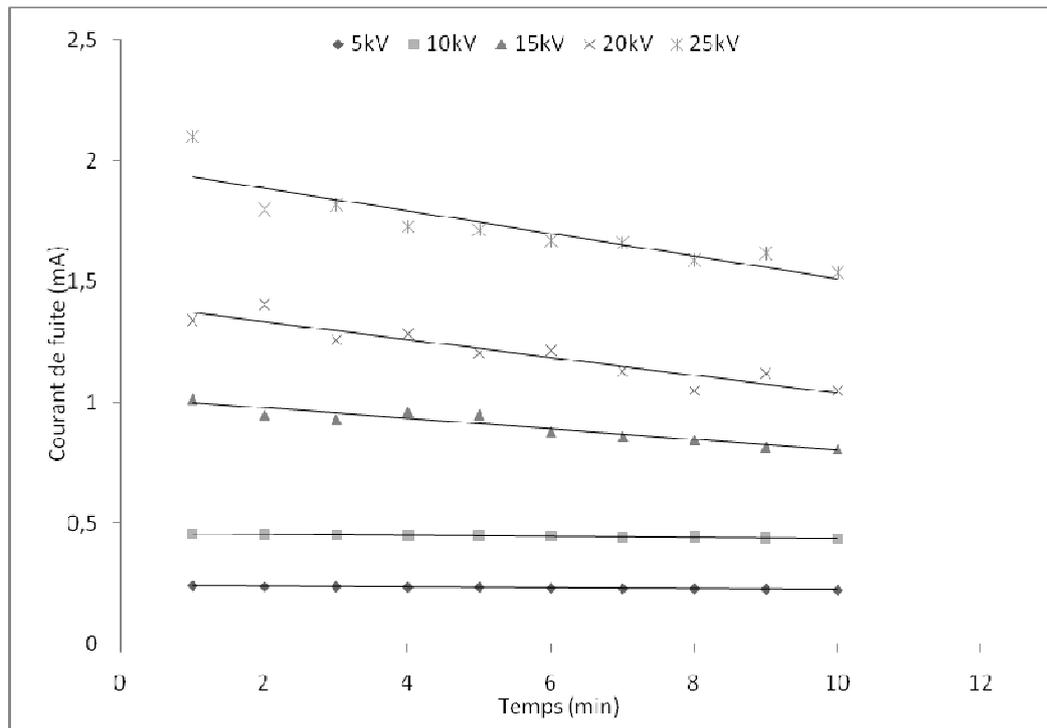


Figure V.11 : Courant de fuite en fonction du temps d’application la tension, cas de l’eau distillée

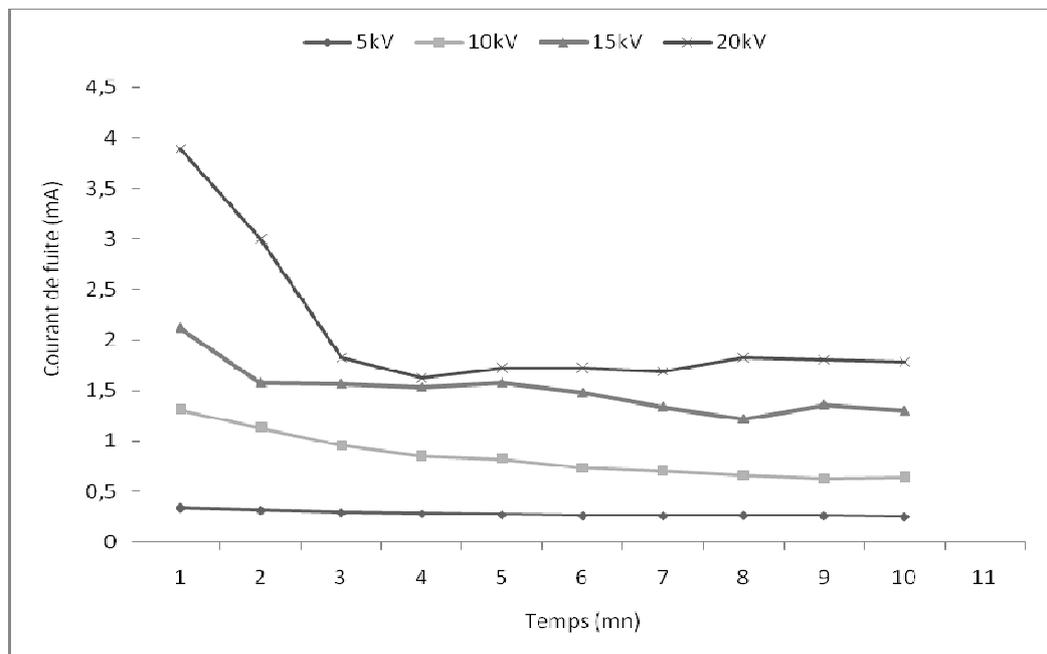
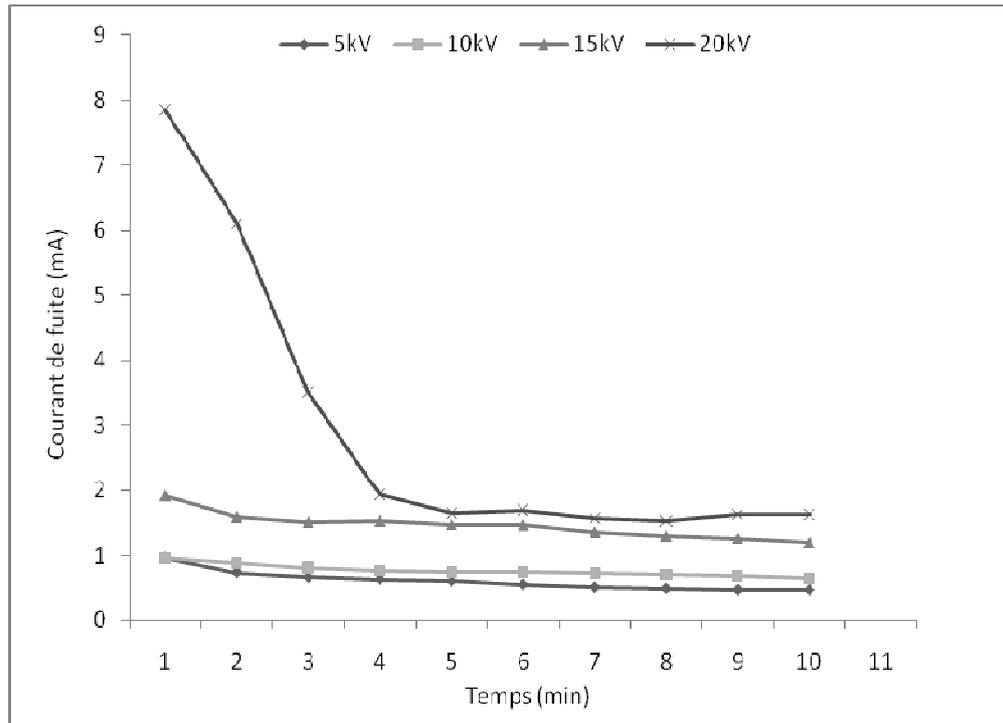
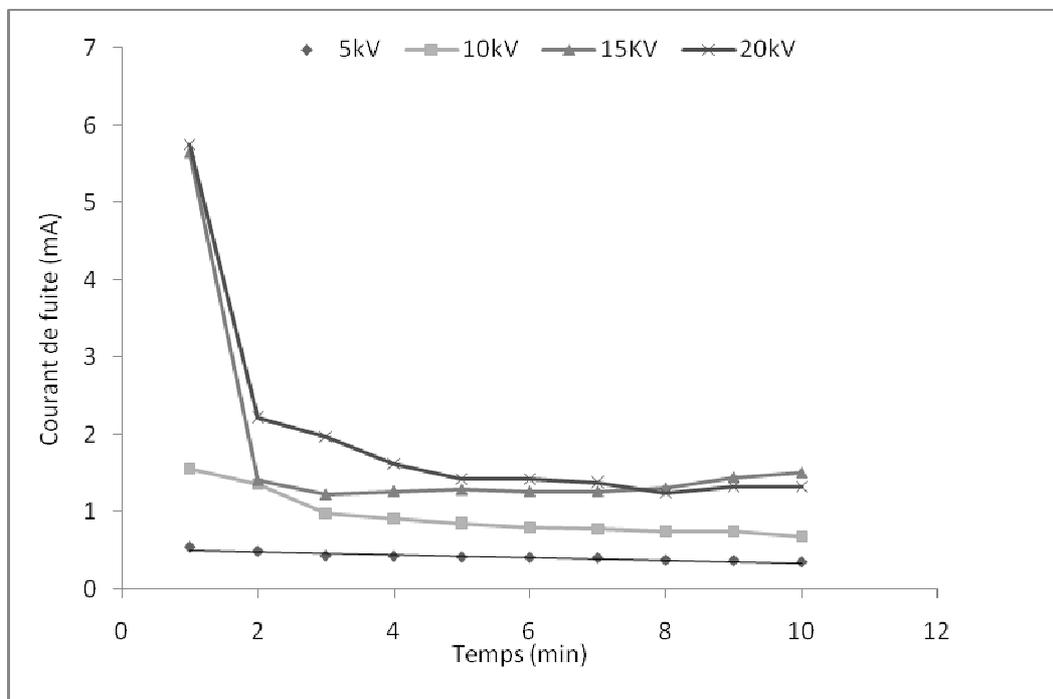


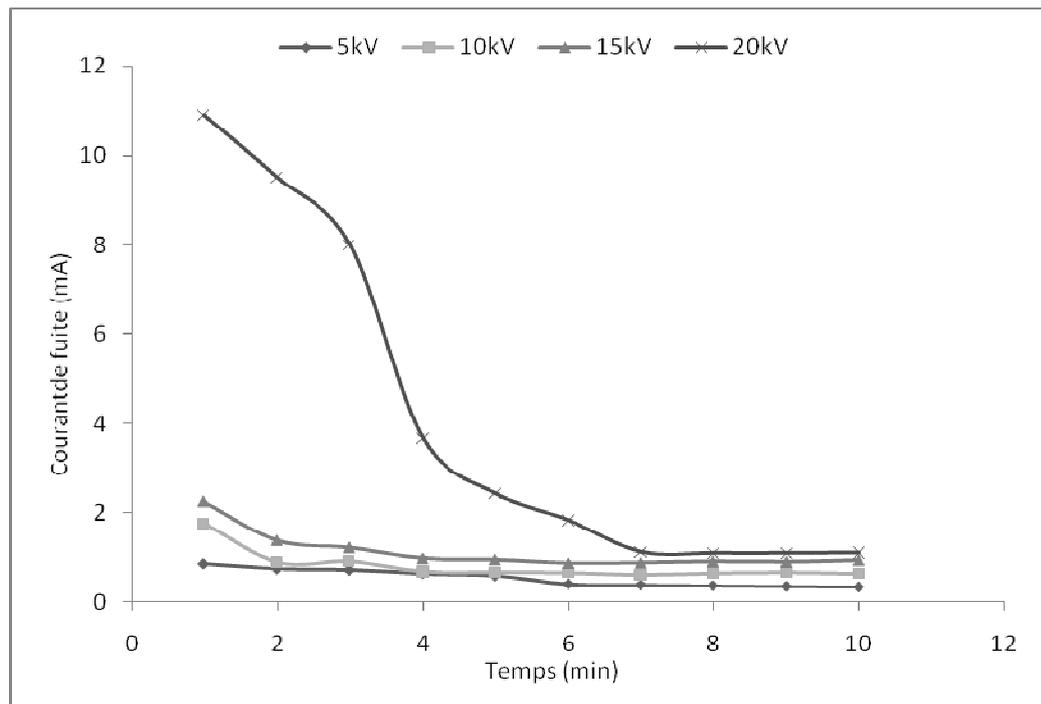
Figure V.12 : Courant de fuite en fonction du temps d’application de la tension, cas de l’eau minérale



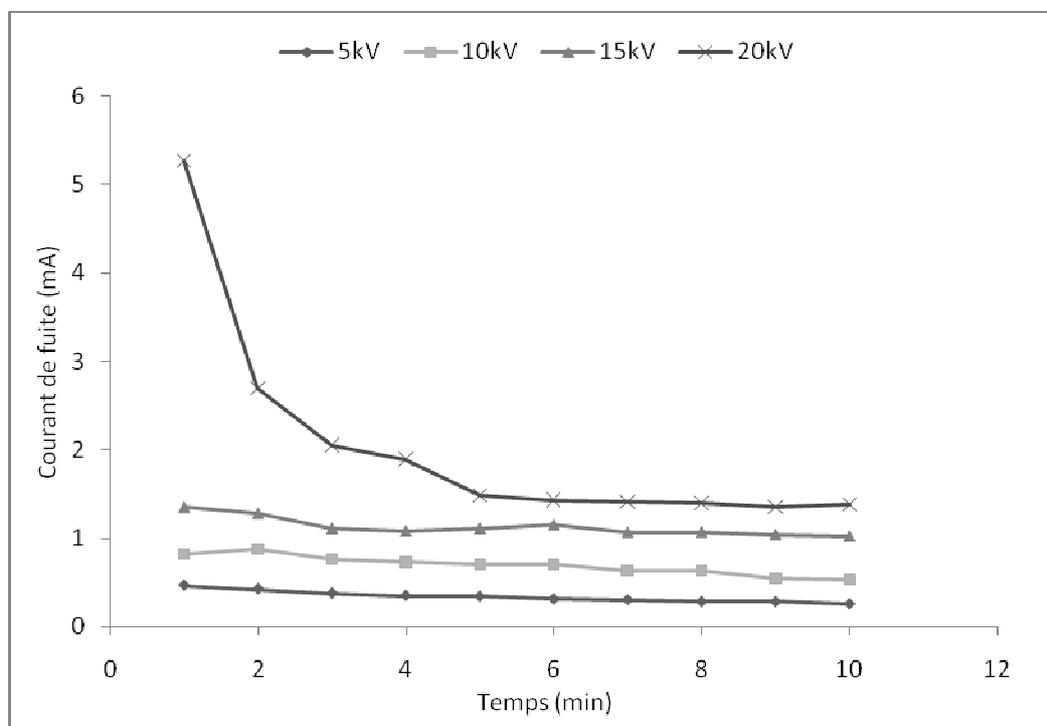
**Figure V.13 :** Courant de fuite en fonction du temps d’application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$



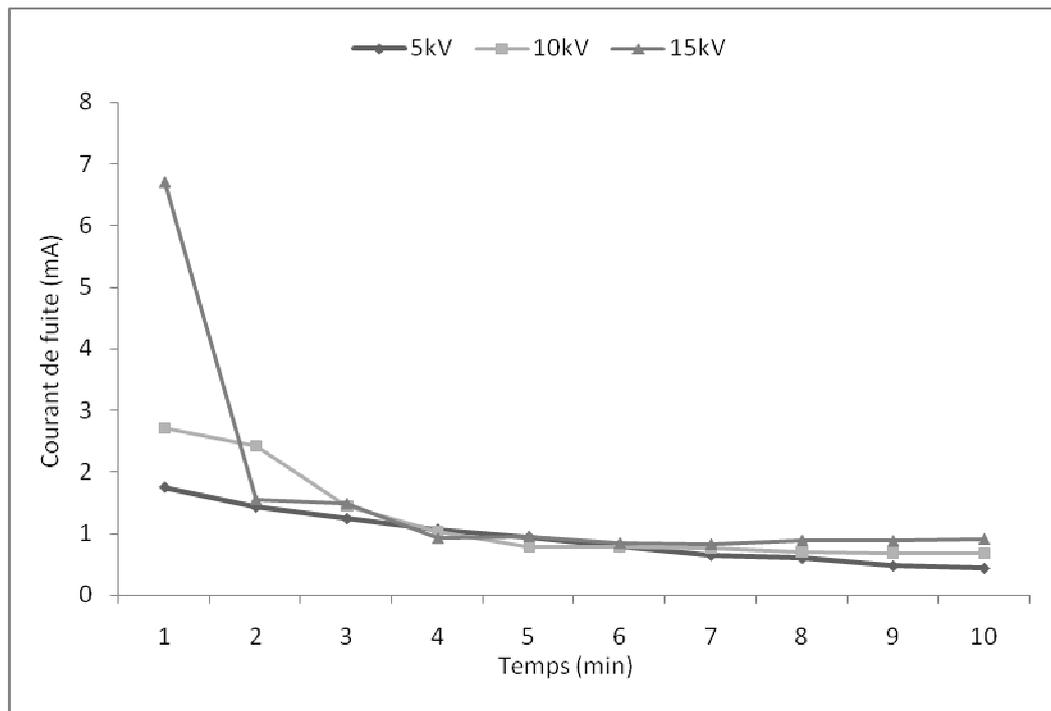
**Figure V.14 :** Courant de fuite en fonction du temps d’application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$



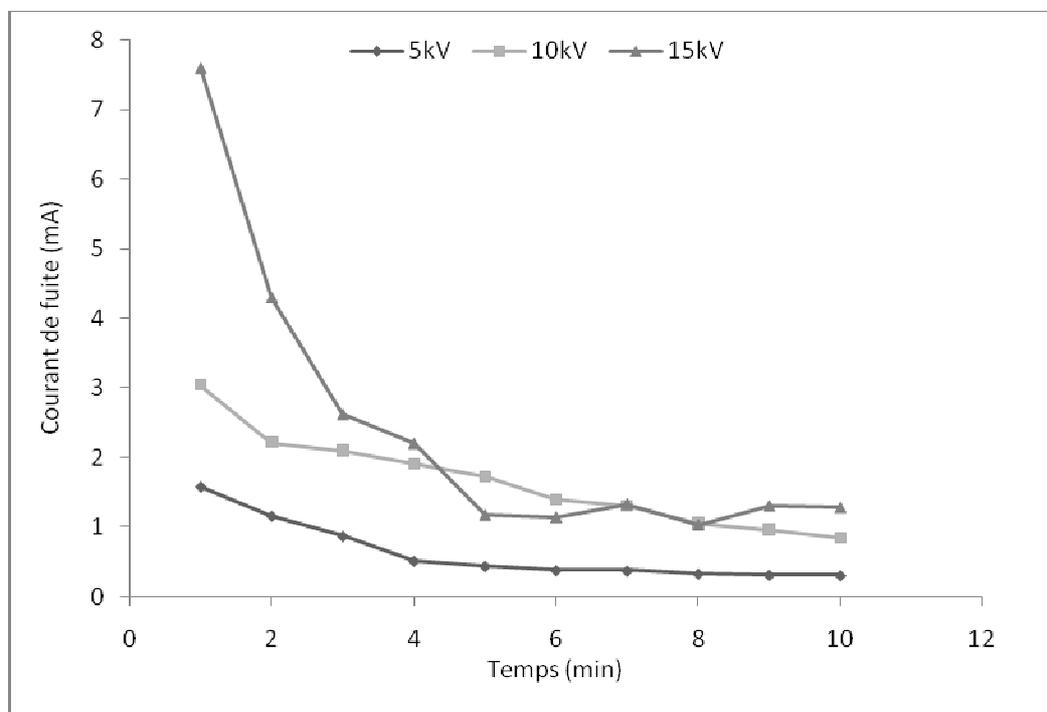
**Figure V.15 :** Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de  $265 \mu\text{S}/\text{cm}$



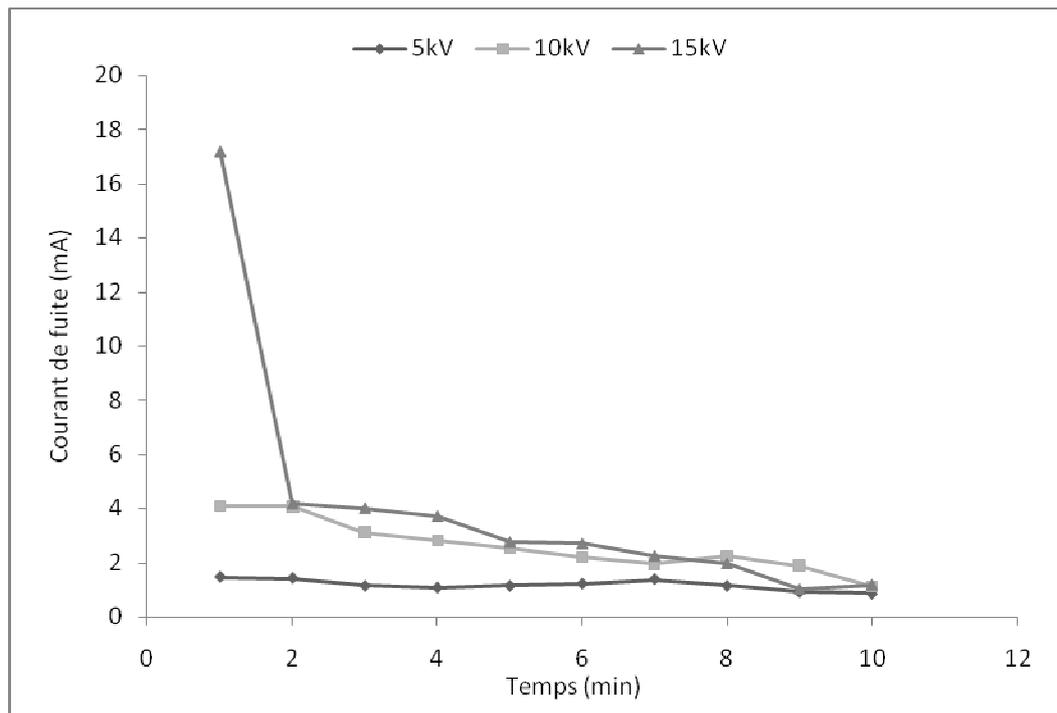
**Figure V.16 :** Courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de  $265 \mu\text{S}/\text{cm}$



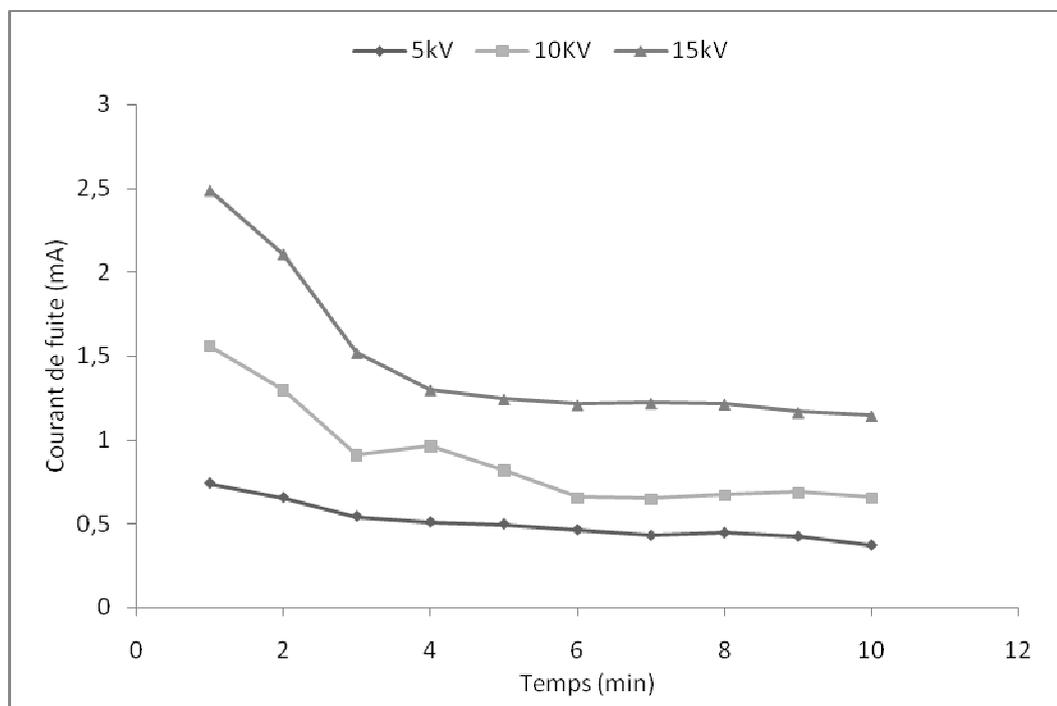
**Figure V.17 :** Courant de fuite en fonction du temps d’application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$



**Figure V.18 :** Courant de fuite en fonction du temps d’application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$



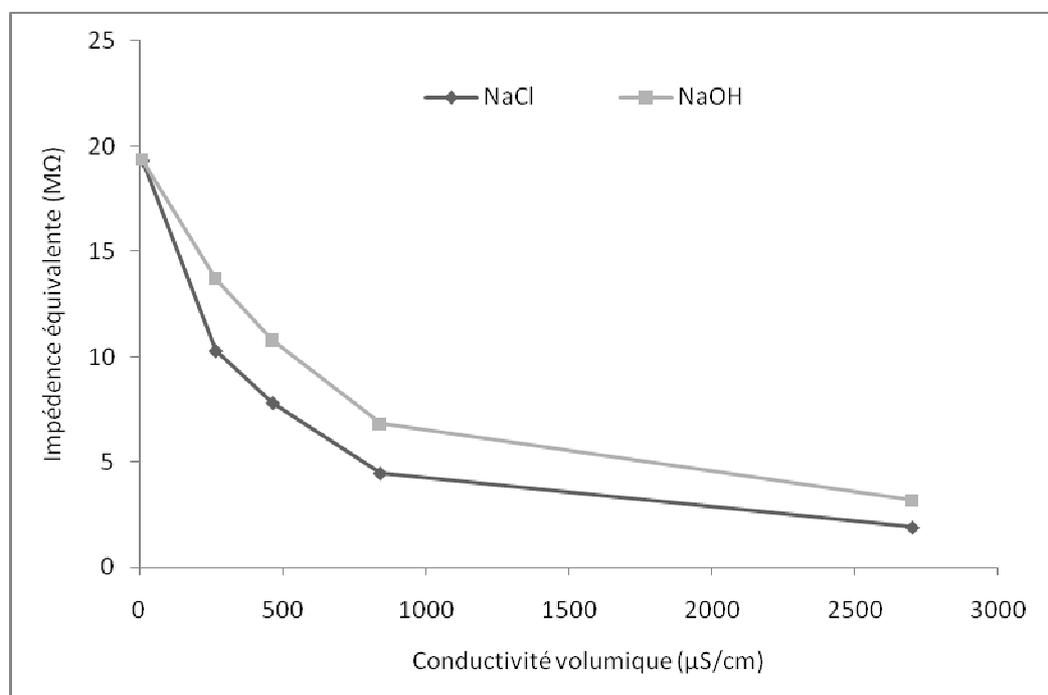
**Figure V.19 :** Courant de fuite en fonction du temps d’application de la tension, cas de la solution de NaCl de conductivité de 2700 µS/cm



**Figure V.20 :** Courant de fuite en fonction du temps d’application de la tension, cas de la solution de NaOH de conductivité de 2700 µS/cm

### V.3.3. Impédance électrique équivalente

En adoptant, dans les limites des tensions considérées, l'hypothèse que les points mesurés sur les caractéristiques courant de fuite en fonction de la tension appliquée représentées par les figures IV.4 et IV.5, sont distribués de manière approximativement linéaire, pour chaque conductivité, autour d'une droite ayant pour pente le rapport moyen courant/tension. Cette pente représente, en fait, l'admittance de l'isolateur vue des électrodes. C'est ainsi, que nous pouvons calculer l'impédance électrique totale à partir de ces pentes. En effet, cette hypothèse nous permet ainsi de déterminer l'impédance électrique équivalente du système isolant dont la variation en fonction de la conductivité est présentée à la figure IV.21.



**Figure V.21 :** Impédance équivalente en fonction de la conductivité, cas des deux solutions saline et alcaline

Pour une solution donnée, et avec l'augmentation de la conductivité volumique, l'impédance électrique équivalente totale entre électrodes diminue fortement pour des conductivités variant de 10 à 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et lentement ailleurs. Cette impédance tend, par la suite, vers une valeur limite.

En outre, et pour une conductivité donnée, l'impédance obtenue dans le cas de la solution saline est plus faible que celle obtenue lors de l'application de la solution alcaline ; ce qui est en bon accord avec les résultats expérimentaux obtenus précédemment.

### **V.3.4. Déphasage entre le courant et la tension**

Dans cette section, nous analysons le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée, en fonction de la tension appliquée, de l'état de surface et de la nature de la pollution.

#### **V.3.4.1. Influence de la tension appliquée**

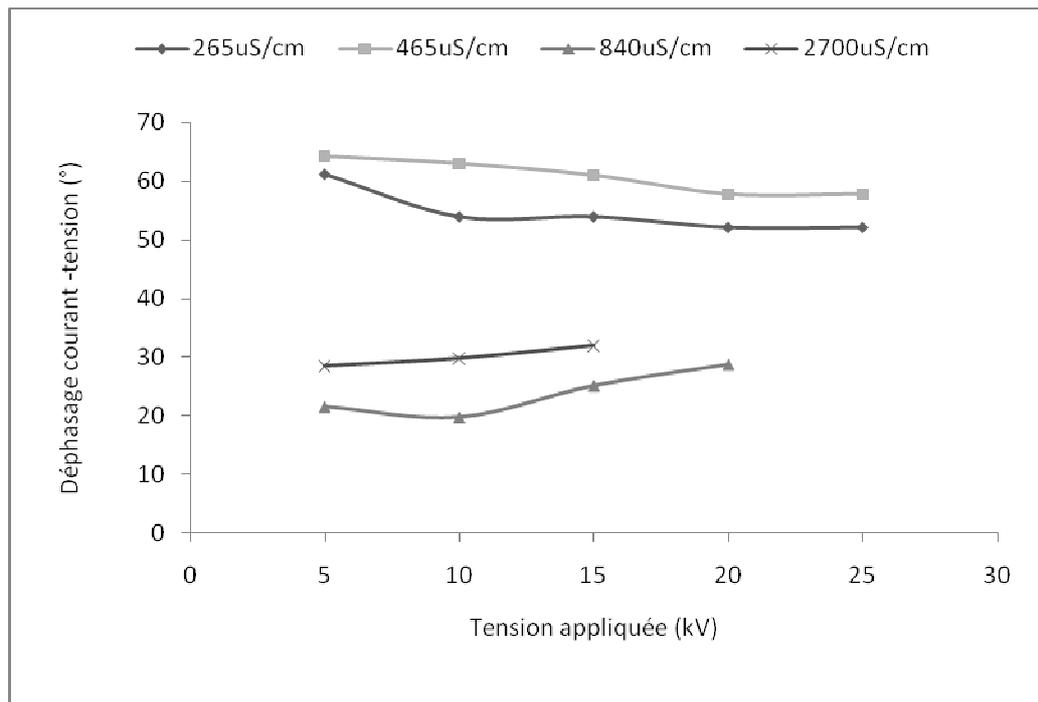
Nous présentons aux figures (V.22, V.23), l'évolution du déphasage en fonction de la tension appliquée, pour les différentes conductivités respectivement les solutions de NaOH et de NaCl.

Pour les deux solutions et pour la conductivité de  $465\mu\text{S}/\text{cm}$ , nous remarquons que le déphasage a tendance à diminuer avec l'augmentation de la tension appliquée.

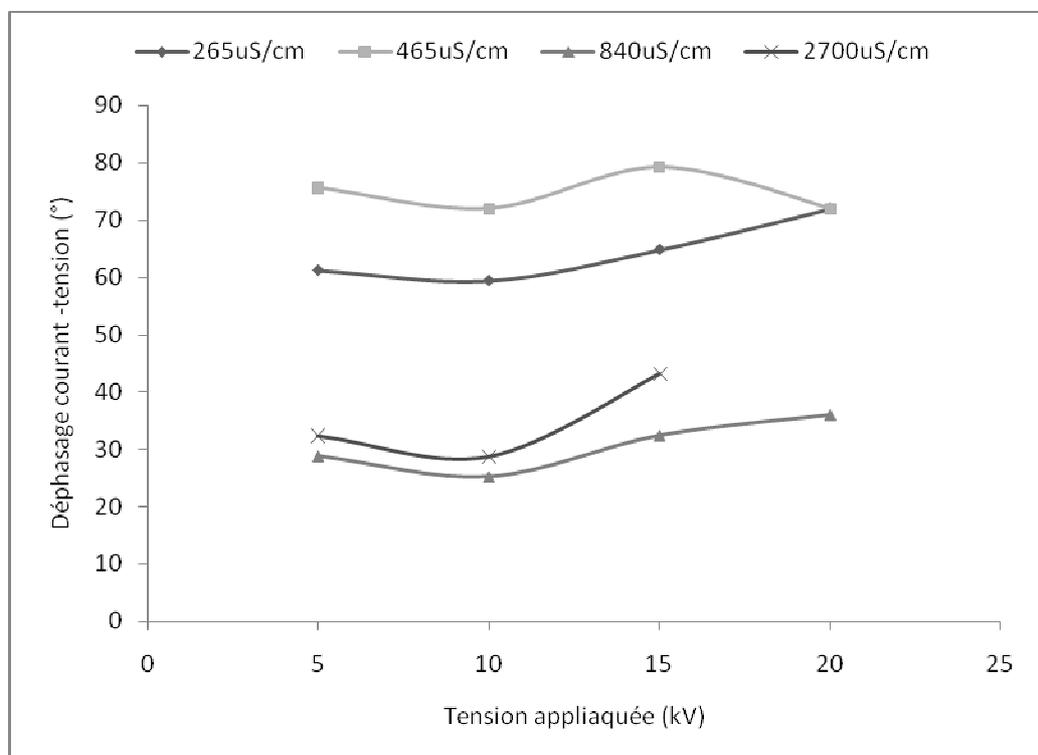
Par ailleurs, et pour les conductivités  $840\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $2700\mu\text{S}/\text{cm}$ , nous remarquons que le déphasage augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. L'augmentation de déphasage s'expliquerait par l'assèchement de la surface de l'isolateur. Cet assèchement, accentué pour les grandes conductivités (supérieures ou égales  $840\mu\text{S}/\text{cm}$ ), implique l'augmentation du caractère capacitif de l'isolateur.

Le déphasage est faible pour le niveau de tension relativement faible à cause de l'humidification de la surface de l'isolateur. Cette humidification fait augmenter le caractère résistif de l'isolateur en augmentant, même en la conductivité du milieu.

Nous pouvons déduire que l'isolateur possède un caractère résistif pour les grandes conductivités ( $840\mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $2700\mu\text{S}/\text{cm}$ ), et un caractère plus capacitif pour les petites conductivités ( $265\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $465\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



**Figure V.22 :** Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH



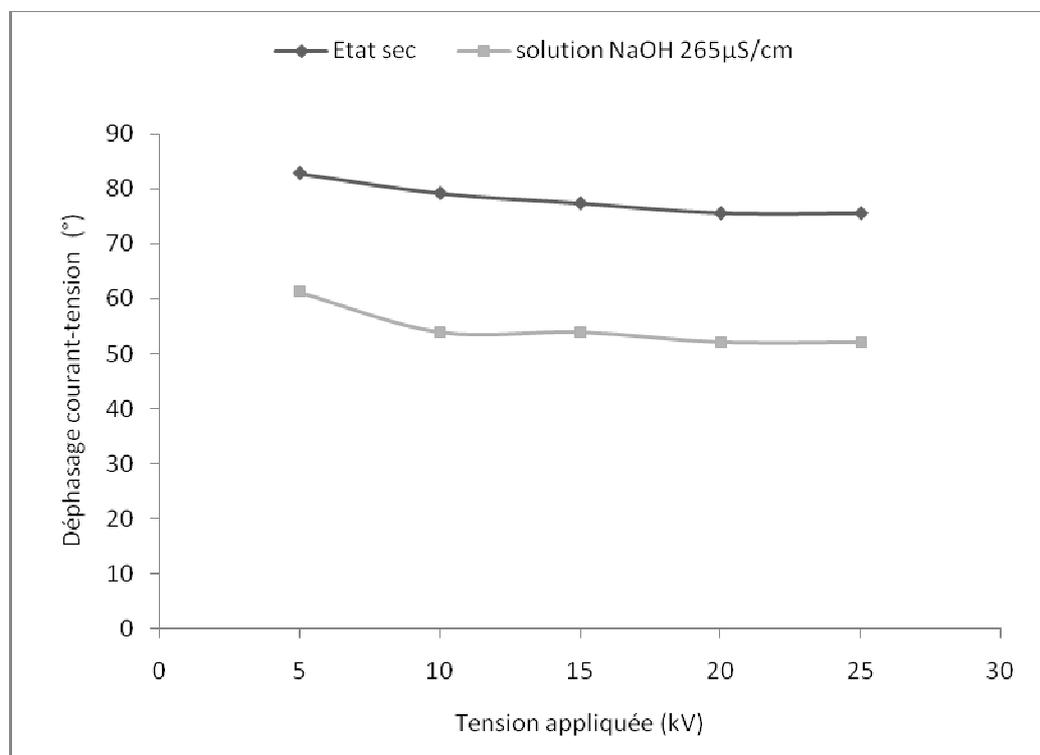
**Figure V.23 :** Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas de solution de NaCl

### V.3.4.2. Influence de l'état de surface

Dans le but d'examiner l'influence de l'état de surface de l'isolateur sur le déphasage courant-tension, nous avons tracé à la figure (V.24) l'évolution de ce déphasage en fonction de la tension, dans deux cas différents. Le premier correspond à l'état propre et sec, et le deuxième au cas où l'isolateur est pulvérisé par une solution alcaline de  $265 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette dernière solution a été prise comme exemple, pour d'étudier la contribution d'une telle solution alcaline sur le déphasage courant-tension.

Nous remarquons bien que l'état de la surface de l'isolateur a une influence sur le déphasage courant-tension.

Pour l'état sec et propre, le déphasage diminue légèrement en fonction de la tension appliquée. Quand nous humidifions la surface de l'isolateur par une solution de NaOH (à conductivité  $265 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) le déphasage diminue. Cette diminution est justifiée par l'apparition de l'effet résistif de l'isolateur, dû à l'existence d'une telle solution à sa surface.



**Figure V.24 :** Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas propre et sec, et cas de la solution alcaline ayant une conductivité de  $265 \mu\text{S}/\text{cm}$

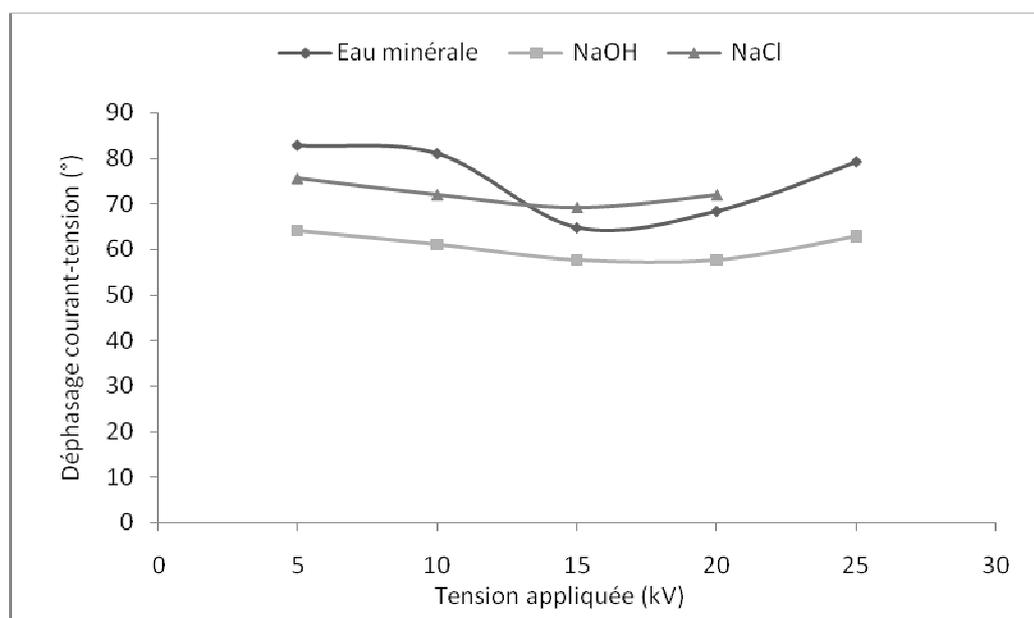
### V.3.4.3. Influence de la nature de pollution

Nous présentons à la figure V.25, l'évolution de déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, dans le cas des trois solutions (eau minérale, alcaline et saline) utilisées pour une conductivité de  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Après l'humidification de la surface de l'isolateur par la solution de NaCl, de NaOH et de l'eau minérale, nous remarquons une légère diminution du déphasage, pour des tensions inférieures ou égales à 15 kV. Cette décroissance peut être justifiée par l'humidification de la surface de l'isolateur, qui donne un caractère résistif supplémentaire à l'isolateur.

Au-delà de 15 kV, le déphasage commence à augmenter. Cette augmentation peut être justifiée par l'apparition des zones sèches sur la surface de l'isolateur, augmentant ainsi le caractère capacitif de l'isolateur.

Nous constatons aussi que les valeurs du déphasage, lors de l'application de la solution de NaOH, sont inférieures à celles obtenues lorsque l'isolateur est pulvérisé par la solution de NaCl.



**Figure V.25** : Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée, cas des solutions alcaline, saline et eau minérale de conductivité de  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$

## V.4. Pollution discontinue

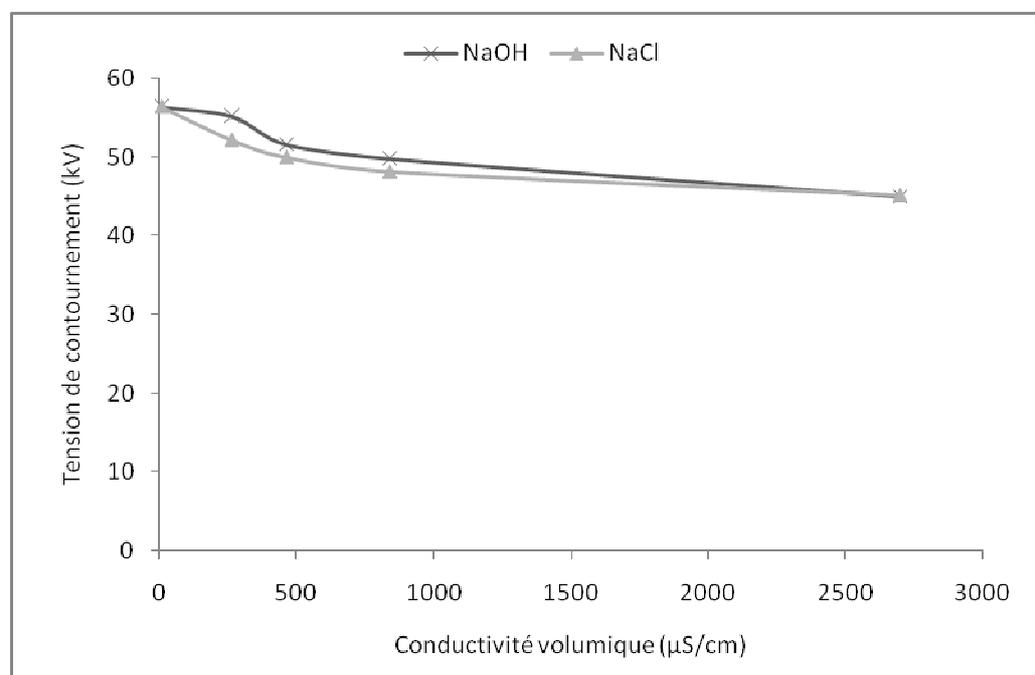
Dans le cas de la pollution discontinue, nous étudions l'influence de l'emplacement de la couche pollution (du côté terre, et du côté haute tension) sur la tension de contournement de l'isolateur, le courant de fuite et l'impédance électrique équivalente vue des électrodes et le déphasage courant-tension.

### V.4.1. Tension de contournement

#### V.4.1.1. Pollution du côté terre

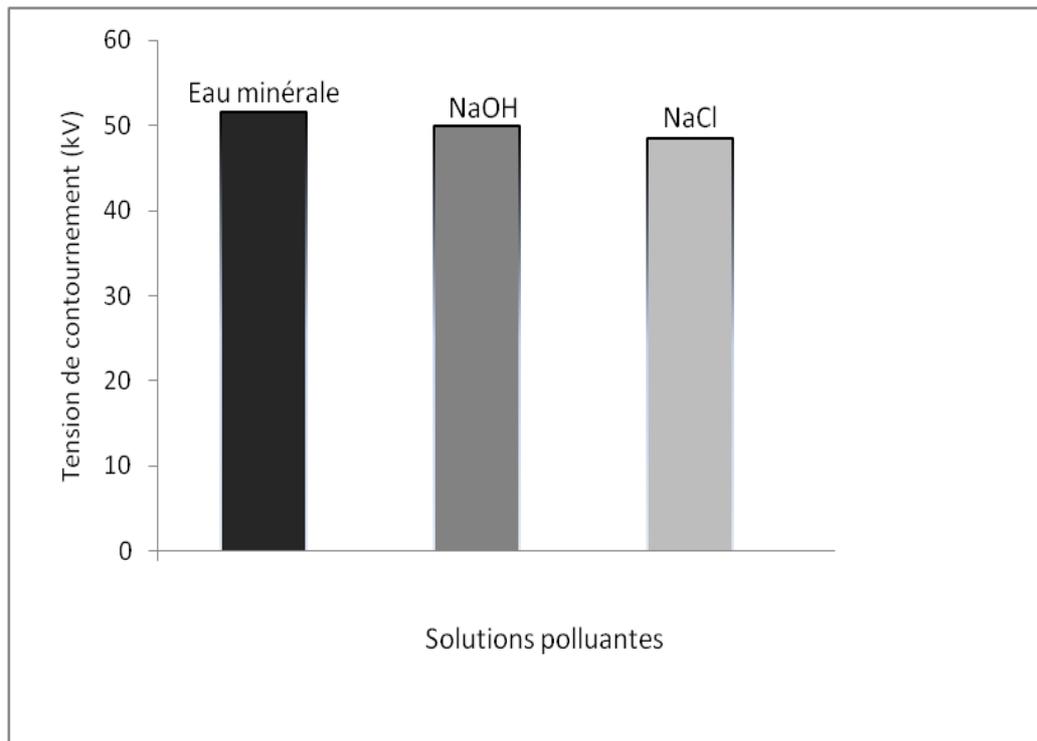
Nous présentons à la figure (V.26), la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité, cas des solutions saline (de NaCl) et alcaline (de NaOH).

En fonction de l'augmentation de la conductivité du milieu pollué, nous remarquons que la tension de contournement diminue légèrement depuis sa valeur maximale, obtenue lors de l'application de l'eau distillée de  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ , vers une valeur limite. Cette dernière change en fonction de la solution en question.



**Figure V.26 :** Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions alcaline et saline appliquées du côté terre

En comparant les caractéristiques obtenues dans les deux cas, nous pouvons déduire que, pour une conductivité donnée, la différence est faible du fait que les valeurs prélevées sont pratiquement identiques. Ceci signifie que la nature de la pollution discontinue a peu d'influence sur la tension de contournement, lorsque cette pollution est appliquée côté terre. La figure (V.27) illustre un exemple pour une conductivité de  $456 \mu\text{S}/\text{cm}$ .



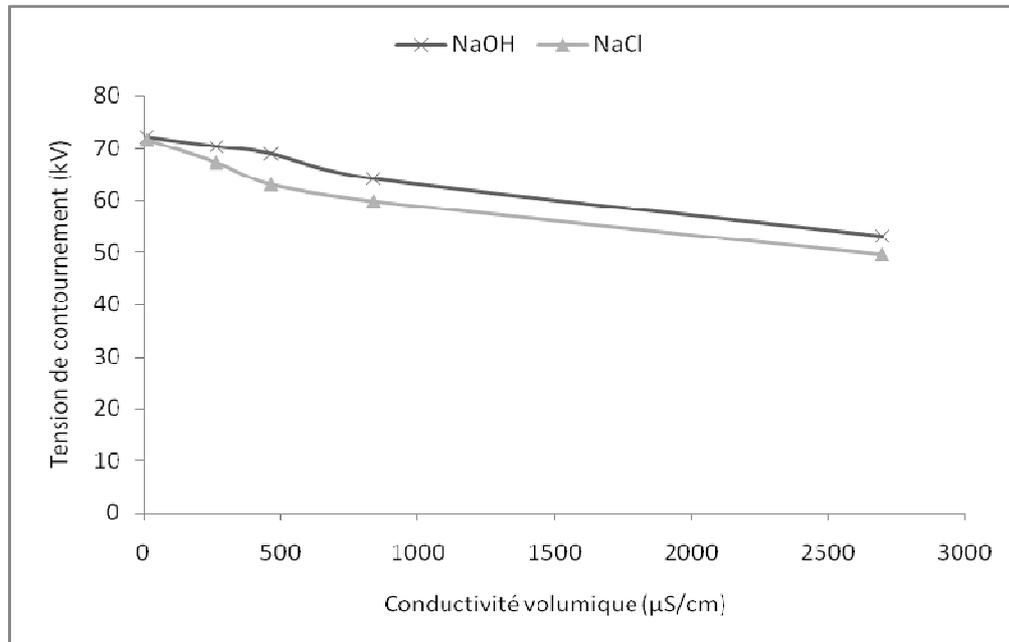
**Figure V.27 :** Tension de contournement, cas des solutions alcaline, saline et eau minérale de conductivité  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté terre

#### V.4.1.2. Pollution du côté haute tension

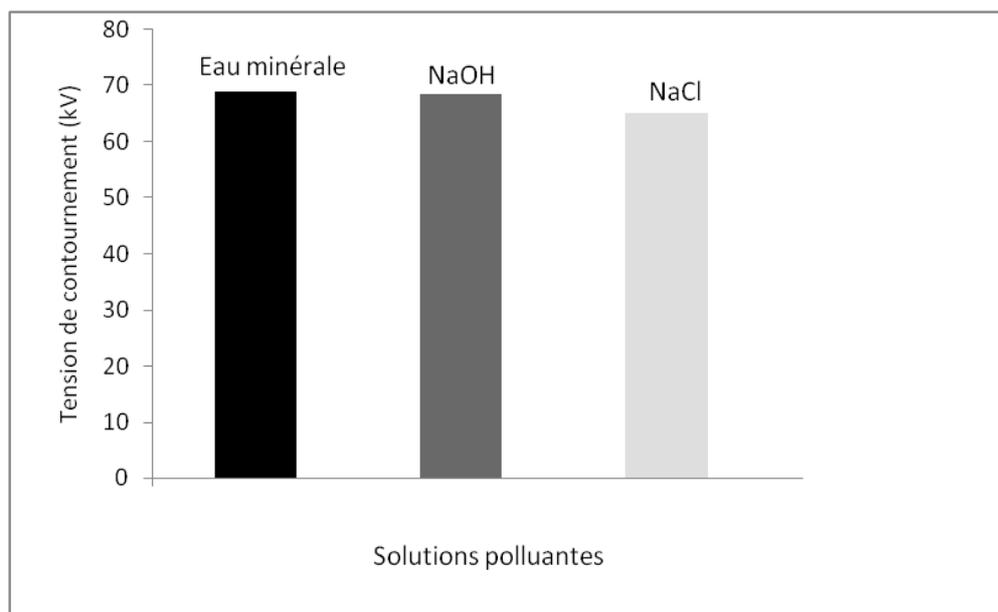
De même que précédemment, dans le cas où la pollution est appliquée du côté haute tension, la tension de contournement diminue légèrement en fonction de la conductivité du milieu pollué (Figure V.28). Cette tension de contournement tend vers une valeur limite propre à chaque solution.

Dans le but de faire une comparaison quantitative, nous présentons à la figure (V.29), les valeurs de la tension de contournement obtenues lors de l'application des deux solutions, pour une conductivité de  $456 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Il est à signaler que, pour une même valeur de la conductivité volumique, la différence dans les valeurs de la tension de contournement obtenues dans les deux cas lorsque la pollution est appliquée du côté haute tension, est relativement importante par rapport à celles correspondantes à la pollution du côté terre.



**Figure V.28 :** Tension de contournement en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions alcaline et saline appliquées du côté haute tension



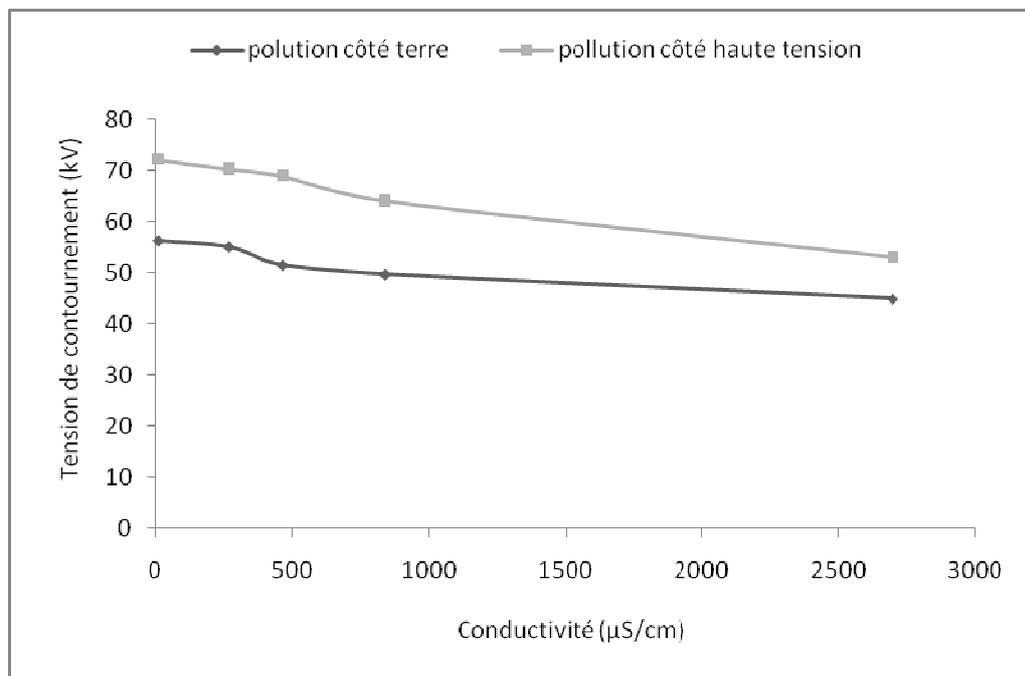
**Figure V.29 :** Tension de contournement cas des solutions alcaline, saline et eau minérale de conductivité  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté haute tension

### V.4.1.3. Influence de l'emplacement de la couche de pollution

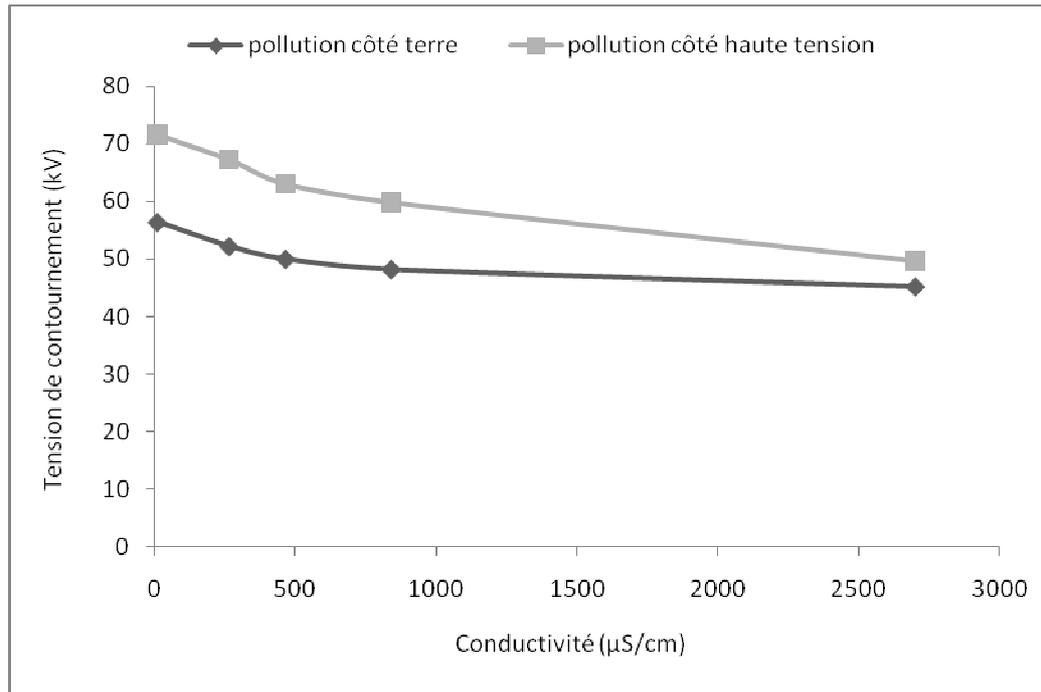
Afin de mettre en évidence l'effet de l'emplacement de la pollution sur la tension de contournement, nous présentons aux figures (V.30) et (V.31) l'évolution de cette tension en fonction de la conductivité volumique du milieu pollué, constitué de la solution alcaline ou celle saline, lorsque cette solution est appliquée du côté terre pour le premier cas, et du côté haute tension pour le second.

Cette figure montre clairement que la tension de contournement est affectée par l'emplacement de la couche polluante. Ainsi, et pour une conductivité donnée, cette tension de contournement est relativement élevée lorsque la pollution est du côté haute tension. Ceci s'expliquerait par le fait que l'humidification de la partie inférieure de l'isolateur engendre une augmentation de la ligne de fuite de cet isolateur, ce qui augmente la tension de contournement. Par conséquent, l'isolateur est plus rigide dans le cas où la pollution est du côté haute tension.

Notons que la différence entre les valeurs de la tension de contournement obtenues pour les deux configurations, diminue avec l'augmentation de la conductivité.



**Figure V.30 :** Influence de l'emplacement de la couche polluée sur la tension appliquée, cas de la solution de NaOH



**Figure V.31 :** Influence de l'emplacement de la couche polluante sur la tension appliquée, cas de la solution de NaCl

## V.4.2. Courant de fuite

### V.4.2.1. Influence de la tension appliquée

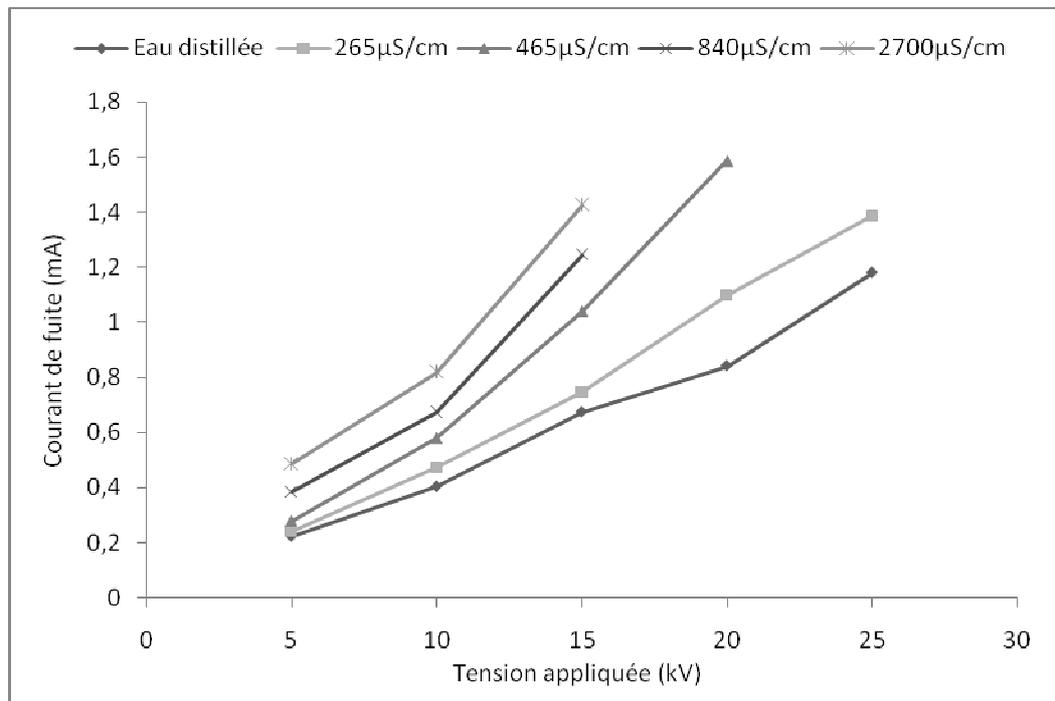
#### V.4.2.1.1. Pollution du côté terre

Pour différentes conductivités, nous illustrons aux figures (V.32) et (V.33), l'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée lors de l'application des deux solutions saline et alcaline que nous avons utilisées.

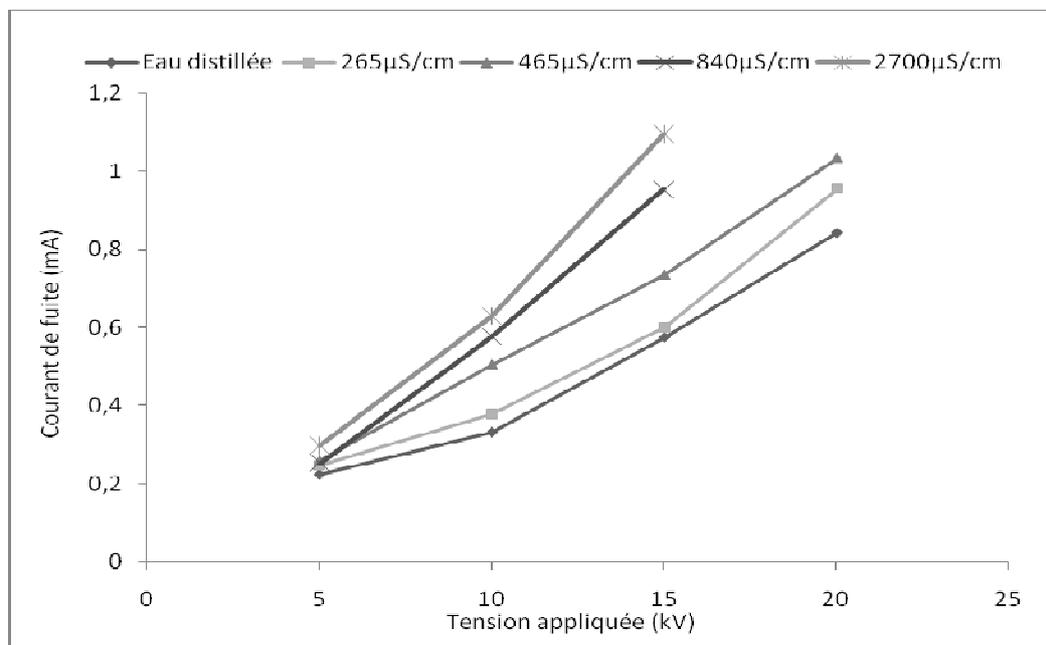
La caractéristique correspondant à variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée lorsque l'isolateur est pulvérisé par une l'eau distillée a été également présentée. Elle a été prise comme référence à laquelle nous comparons les autres caractéristiques.

Pour une conductivité donnée, nous remarquons que l'amplitude du courant de fuite augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée. Nous pouvons déterminer, dans ces conditions, les impédances électriques équivalentes correspondantes.

Par ailleurs, et pour même niveau de tension appliquée, le courant de fuite augmente aussi avec la conductivité de la pollution.



**Figure V.32 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution saline



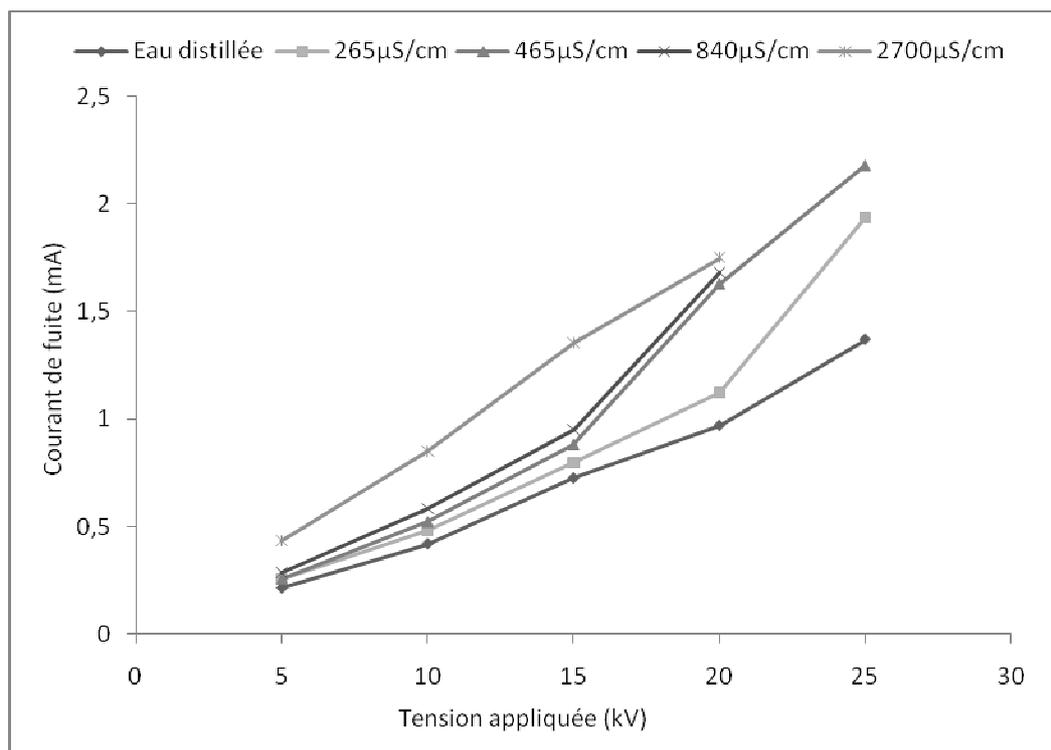
**Figure V.33 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution alcaline

### V.4.2.1.2. Pollution du côté haute tension

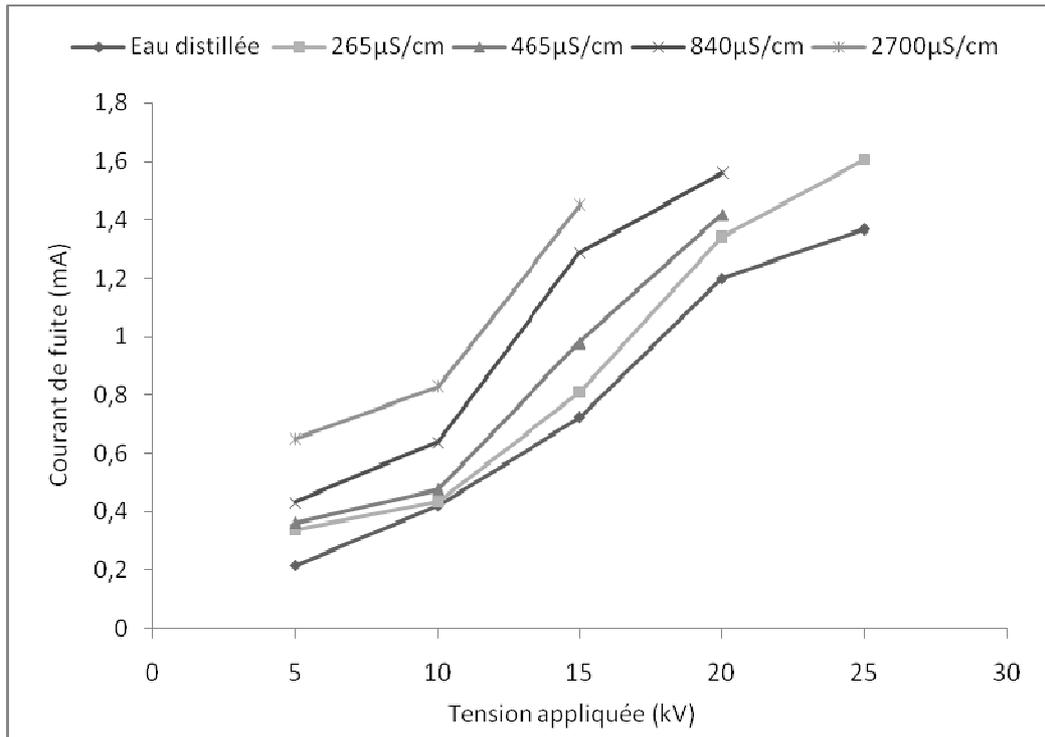
La variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour différentes conductivités des deux solutions saline et alcaline, comparée à celle obtenue dans le cas où l'isolateur est pulvérisé par une eau distillée de  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ , sont illustrées aux figures (V.34) et (V.35).

Pour les différentes conductivités des solutions que nous avons appliquées, nous remarquons que le courant de fuite croît d'une manière pratiquement linéaire en fonction de l'augmentation de la tension appliquée.

Nous remarquons aussi que, pour une tension donnée, toute augmentation de la conductivité est suivie d'une augmentation du courant de fuite. Ceci est valable quelle que soit la solution utilisée.



**Figure V.34 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution saline



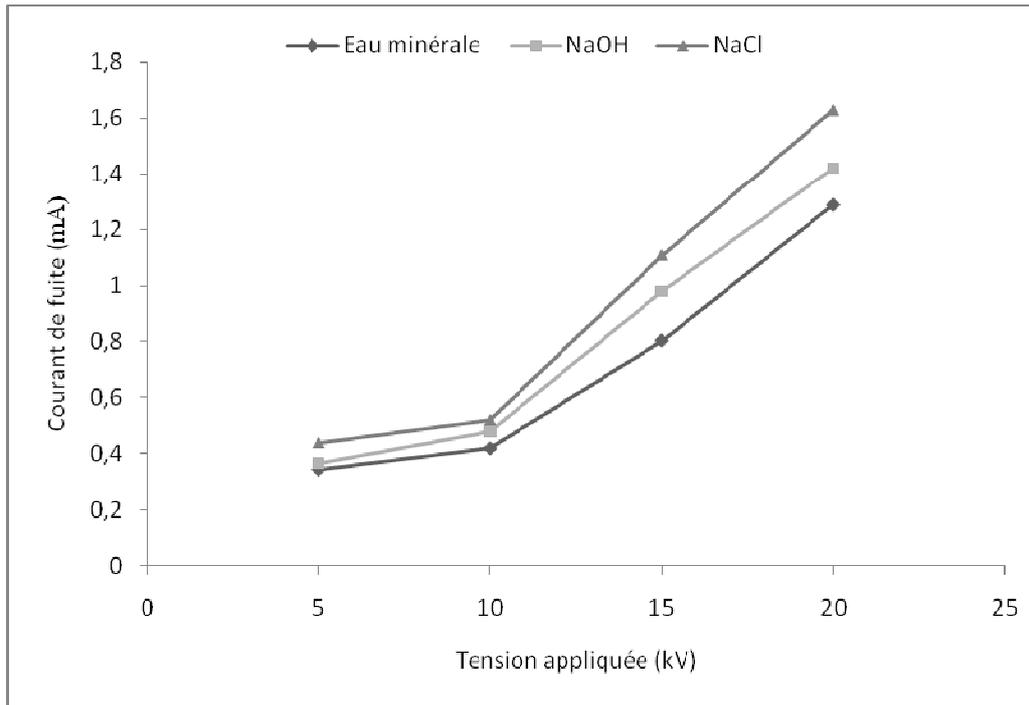
**Figure V.35 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution alcaline

#### V.4.2.2. Influence de la nature de pollution

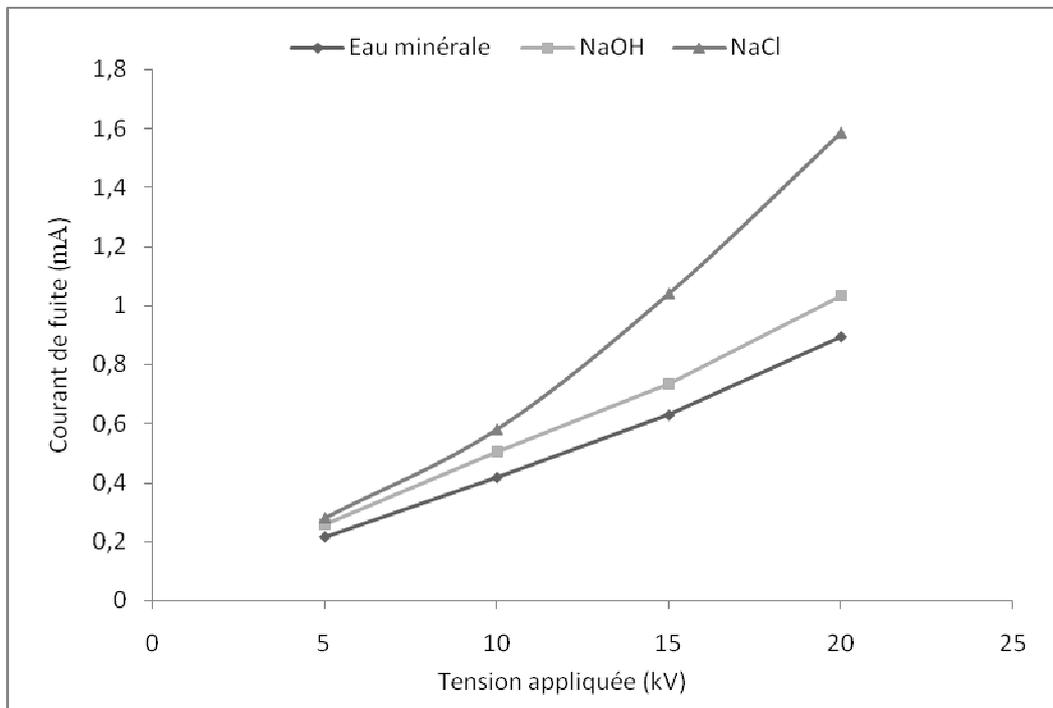
Nous illustrons aux figures (V.36) et (V.37), les caractéristiques donnant la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour les trois solutions considérées (eau minérale, solution de NaCl, solution de NaOH), pour la conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et pour les deux configurations de pollution discontinues (pollution du côté haute tension et du côté terre).

Ces figures montrent bien l'impact de la nature de la pollution, appliquée à la surface de l'isolateur, sur le comportement de celui-ci, à travers le courant de fuite qui circule à sa surface.

Mêmes constatations ont été faites, puisque le courant de fuite augmente, en général, quasi-linéairement avec la tension appliquée et ce quelle que soit la nature de la pollution.



**Figure V. 36 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions de conductivité de  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$  appliquées du côté haute tension

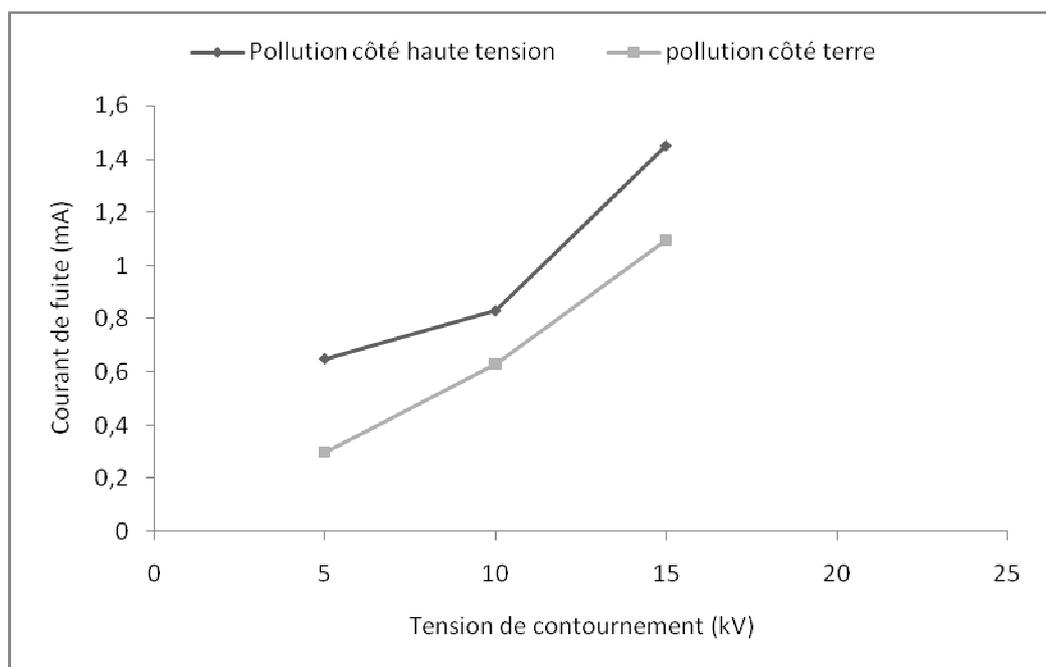


**Figure V. 37:** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions de conductivité de  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$  appliquées du côté terre

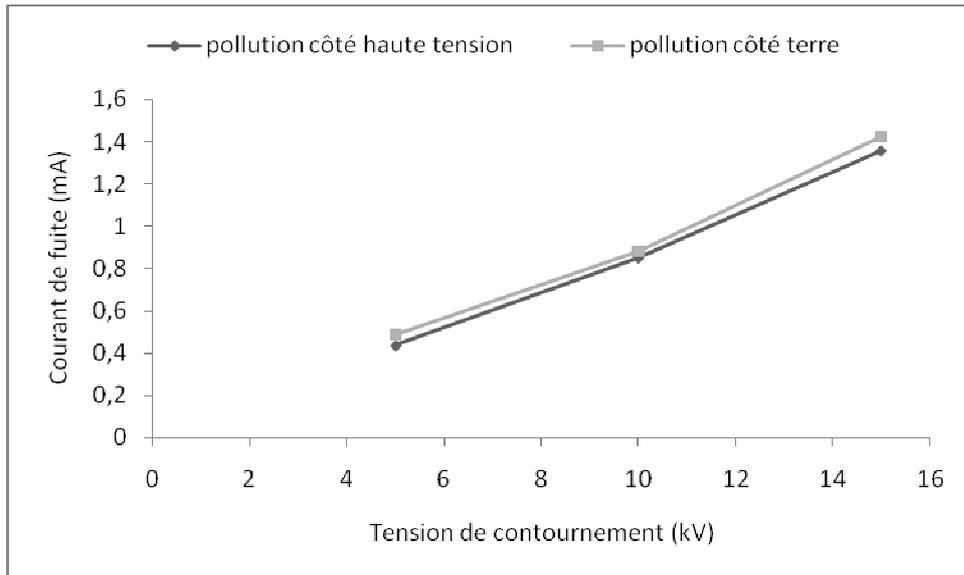
### V.4.2.3. Influence de l'emplacement de la couche polluante

Les figures (V.38) et (V.39) montre la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour les deux solutions alcaline et saline, appliquées du côté terre, dans le première figure, et du côté haute tension dans la deuxième.

Outre de l'évolution quasi-linéaire du courant de fuite, nous remarquons, pour un même niveau de tension, que la valeur de l'amplitude du courant de fuite est relativement élevée dans le cas où la pollution est appliquée du côté haute tension. Ceci est valable quelle que soit la nature de la solution ainsi utilisée.



**Figure V. 38 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH



**Figure V. 39** : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl

#### V.4.2.4. Influence de la conductivité

##### V.4.2.4.1. Pollution du côté terre

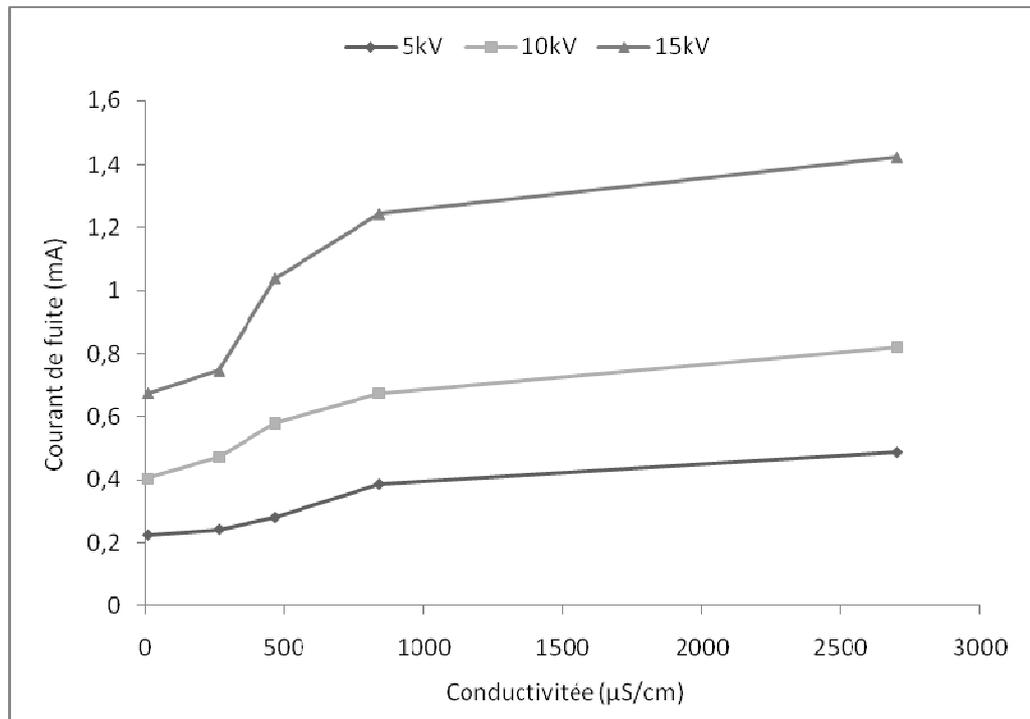
Nous représentons aux figures (V.40) et (V.41) la variation du courant de fuite en fonction de la conductivité des solutions polluantes respectivement saline et alcaline.

Comme précédemment et pour un même niveau de tension, le courant de fuite en fonction de la conductivité des solutions alcaline et saline constituant le milieu pollué. Cette augmentation est due à la diminution de l'impédance vue entre les deux électrodes de l'isolateur.

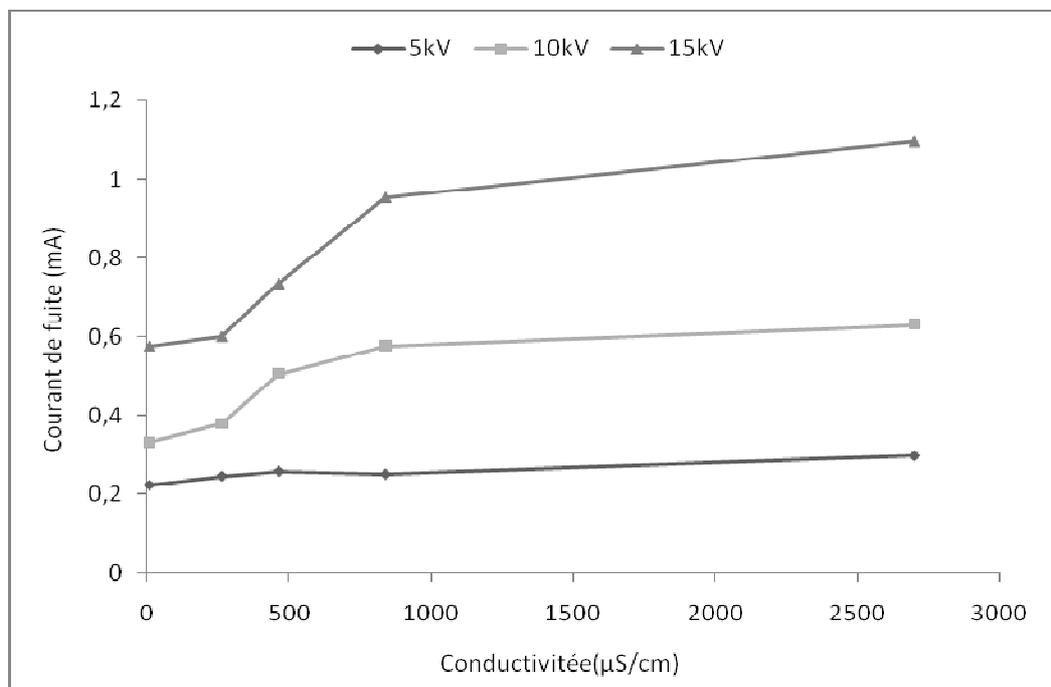
Pour une conductivité donnée, l'amplitude du courant de fuite augmente avec la tension appliquée lors des essais. Ceci est valable quelle que soit la nature de la pollution.

En comparant, pour une conductivité et un niveau de tension donnés, les valeurs du courant de fuite obtenues lors de l'application des deux solutions, nous constatons que les valeurs trouvées lorsque l'isolateur est pulvérisé par une solution

saline sont les plus importantes. Ce qui montre l'influence de la nature de pollution sur le courant de fuite, même lorsque la répartition de la pollution est discontinue.



**Figure V.40 :** Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution saline

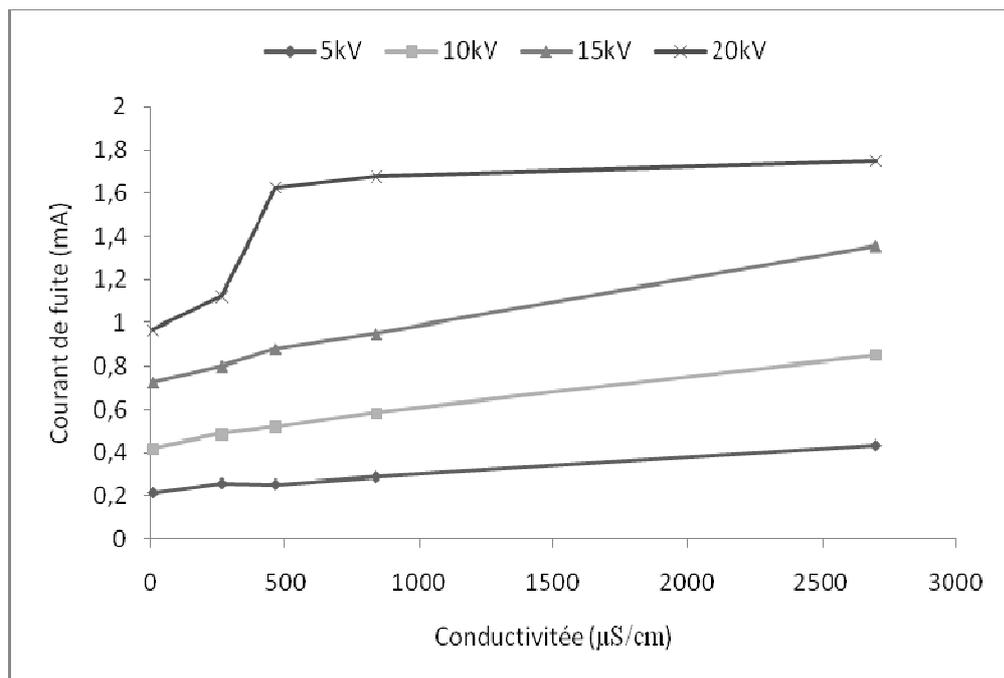


**Figure V.41 :** Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution alcaline

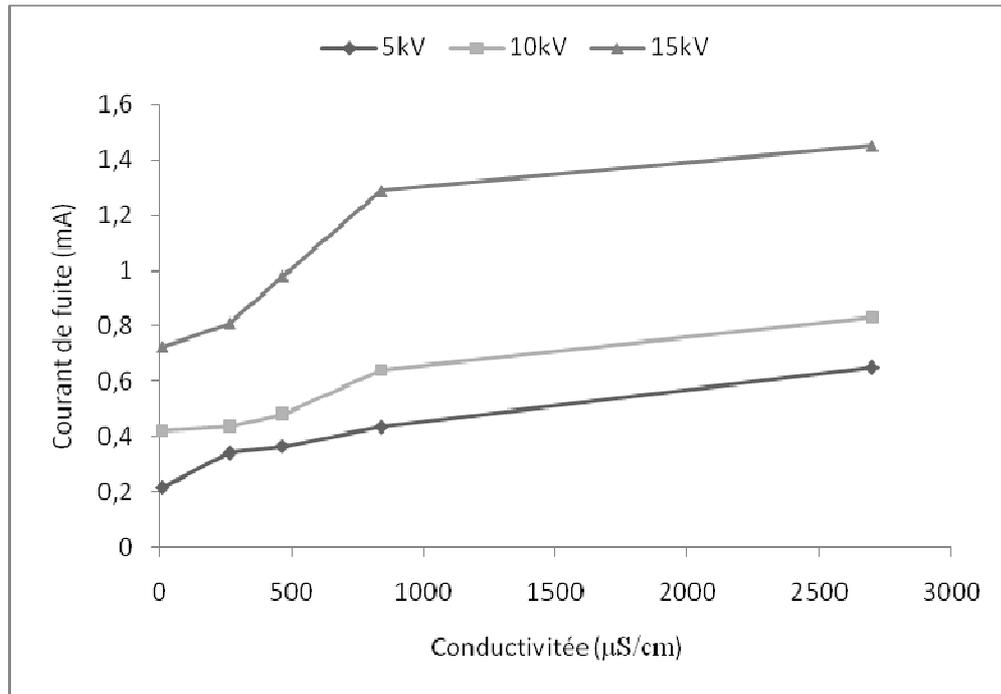
#### V.4.2.4.2. Pollution du côté haute tension

De mêmes constatations ont été faites lors de l'application de la pollution du côté haute tension. En effet, dans ce cas et pour les deux solutions saline et alcaline que nous avons considérées, les figures (V.42) et (V.43) illustrent la variation du courant de fuite en fonction de la conductivité, pour différentes tensions appliquées. Il est tout à fait logique que le courant de fuite augmente avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

Par ailleurs, les valeurs de ce courant de fuite obtenues dans le cas où l'isolateur est pulvérisé par une saline sont relativement élevées à celles prélevées lors de l'application de la solution alcaline. Ce qui met en évidence l'impact de la nature de pollution sur le courant de fuite.



**Figure V.42 :** Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution de saline



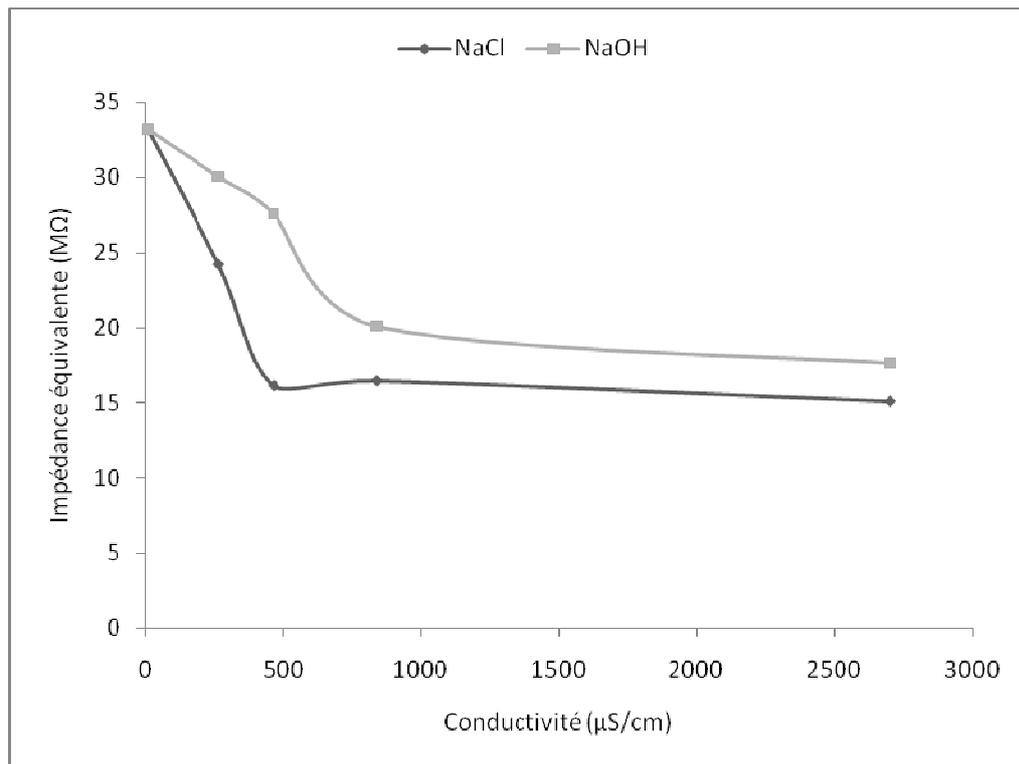
**Figure V.43 :** Courant de fuite en fonction de la conductivité volumique, cas de la solution alcaline

### V.4.3. Impédance électrique équivalente

#### V.4.3.1. Pollution du côté terre

En traçant, sur les caractéristiques courant-tension, les courbes linéaires de tendance pour chaque conductivité, nous pouvons déduire les pentes de ces mêmes courbes. Ces pentes représentent bien les admittances électriques équivalentes du système isolant pollué. C'est ainsi, qu'on peut calculer l'impédance électrique équivalente de l'isolateur, pour chaque conductivité de la pollution. Les résultats, correspondant à la variation de cette impédance en fonction de la conductivité de la pollution, ainsi obtenus sont présentés à la figure (V.44).

Avec l'augmentation de la conductivité du milieu pollué, nous constatons que l'impédance électrique équivalente vue des électrodes diminue fortement pour les conductivités inférieures ou égales à  $840 \mu\text{S/cm}$ , et faiblement ailleurs en tendant vers une valeur limite constante. Cette dernière varie en fonction de la nature de la pollution.

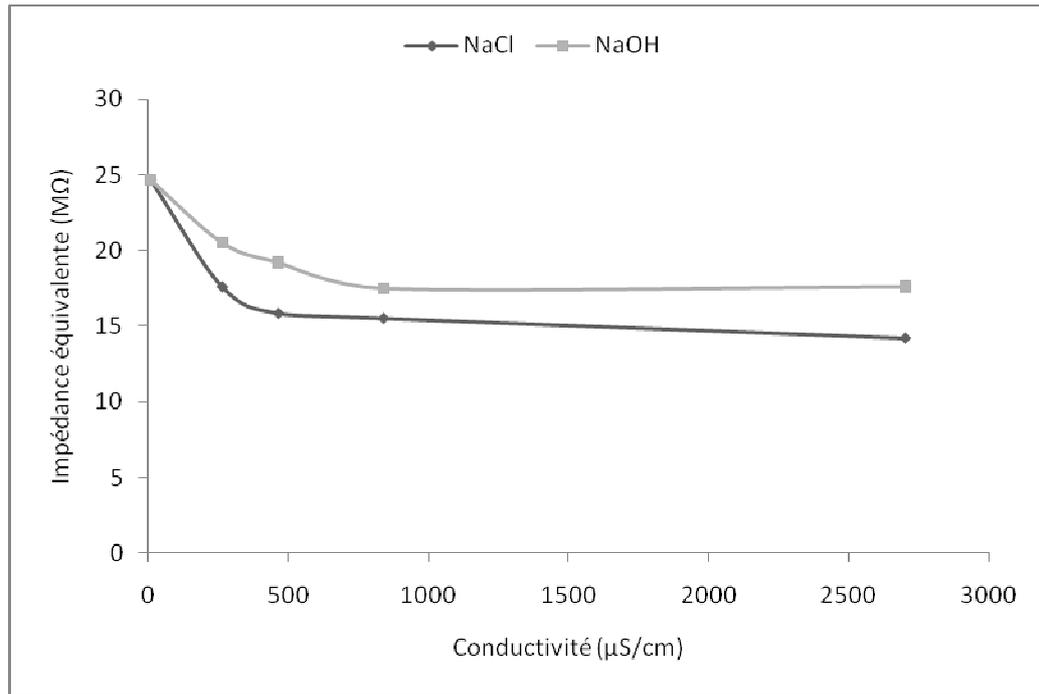


**Figure V.44 :** Impédance équivalente en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions saline et alcaline

#### V.4.3.2. Pollution du côté haute tension

Nous présentons à la figure (V.45), la variation de l'impédance électrique équivalente en fonction de la conductivité des deux solutions polluées utilisées.

Nous constatons également que l'impédance diminue en fonction de la conductivité du milieu pollué.



**Figure V.45 :** Impédance équivalente en fonction de la conductivité volumique, cas des deux solutions saline et alcaline

### V.4.3.3. Influence de la nature de pollution

En se basant sur les courbes de tendance considérées linéaires, nous pouvons ainsi calculer, à partir de leurs pentes, l'impédance électrique équivalente du système isolant pour chaque conductivité. Les valeurs obtenues dans le cas des trois solutions ayant une conductivité de  $465 \mu\text{S/cm}$ , sont présentées dans tableau (V.1).

	Impédance équivalente ( $\text{M}\Omega$ )		
	Eau minérale	Solution de NaOH	Solution de NaCl
Côté haute tension	31.3	19.2	16.2
Côté terre	21.9	27.6	16.2

**Tableau V.1 :** Impédances équivalentes obtenues lors de l'application des trois solutions à la conductivité de  $465 \mu\text{S/cm}$

Vu les résultats susmentionnés, l'impédance obtenue lors de l'utilisation de la solution saline est faible au passage du courant relativement à celle trouvée lorsque l'isolateur est pulvérisé par une solution alcaline de même conductivité. Ce qui justifie l'augmentation de courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour ce cas de figure (cas de solution saline).

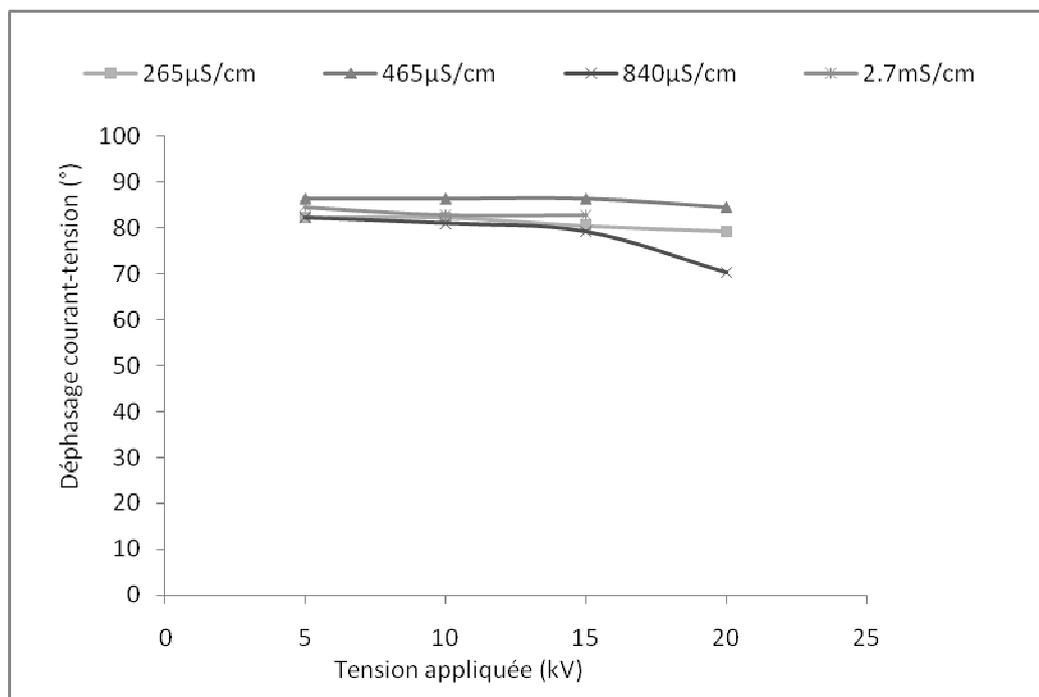
#### V.4.4. Déphasage courant-tension

##### V.4.4.1. Influence de la tension appliquée

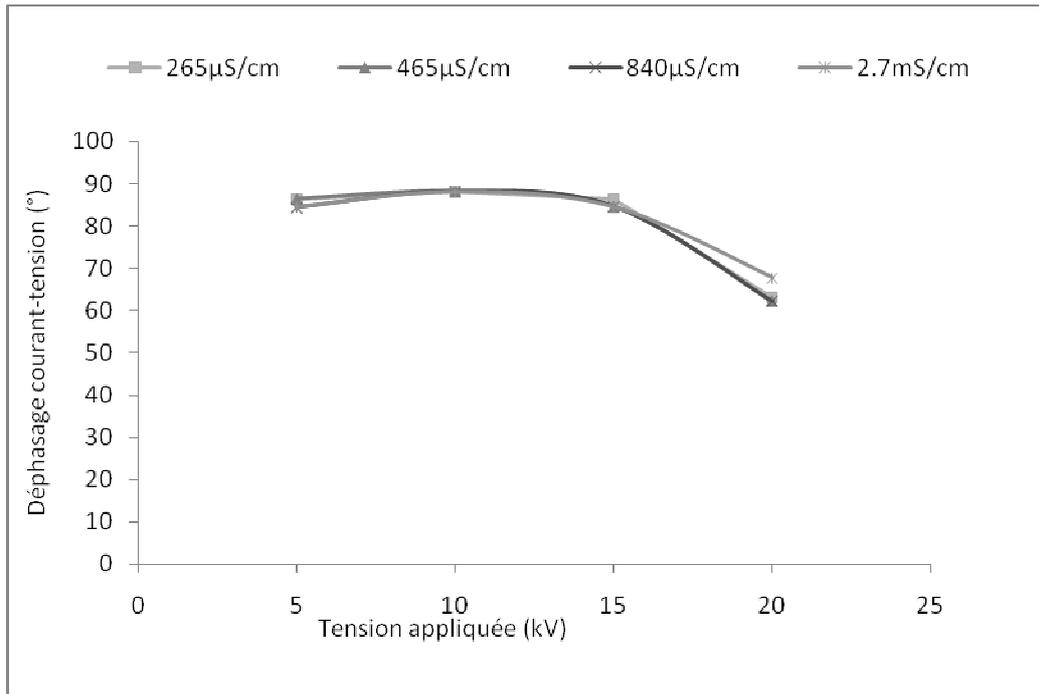
Nous analysons, dans ce qui suit, en fonction de la tension, le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée, pour les différentes répartitions de la pollution discontinue appliquées à la surface de l'isolateur (Figures V.46 à V.49).

Avec l'augmentation de la tension, une diminution du déphasage courant-tension a été obtenue, et ce quelles que soient la répartition et la nature de la pollution.

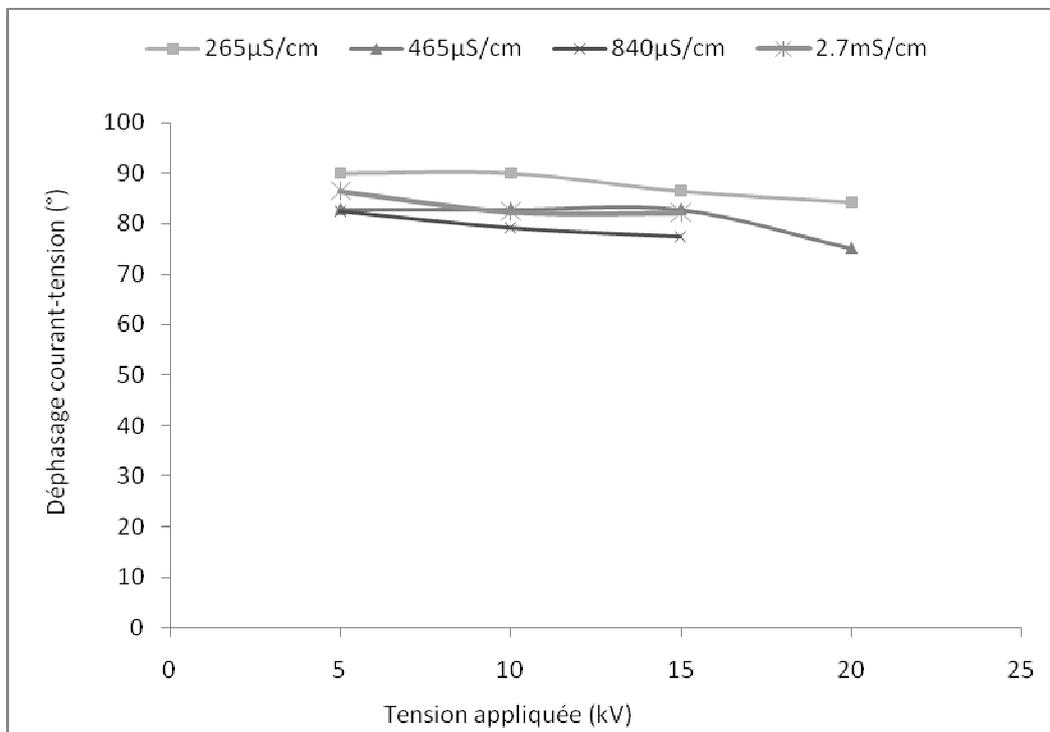
Certaines valeurs de ce déphasage avoisinent  $90^\circ$ , cela signifie que le caractère capacitif est le plus dominant. Dans ces conditions, l'humidification d'un seul côté n'a aucune pratiquement pas d'influence sur le déphasage courant-tension.



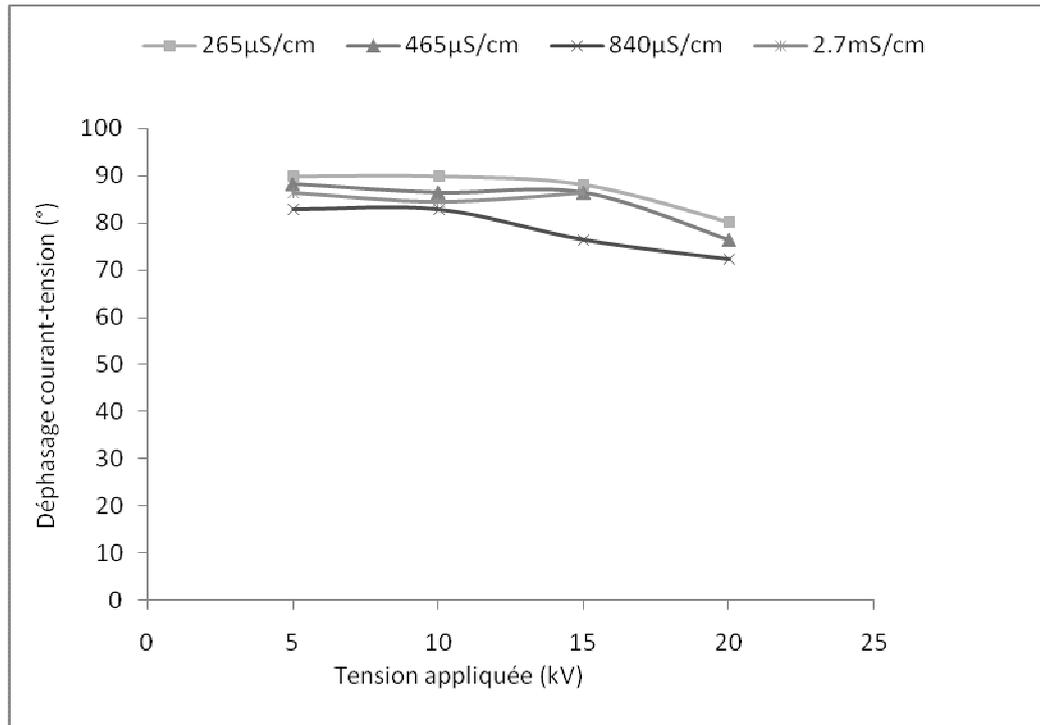
**Figure V.46 :** Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH appliquée du côté haute tension



**Figure V.47 :** Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl appliquée du côté haute tension



**Figure V.48 :** Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaOH appliquée du côté terre

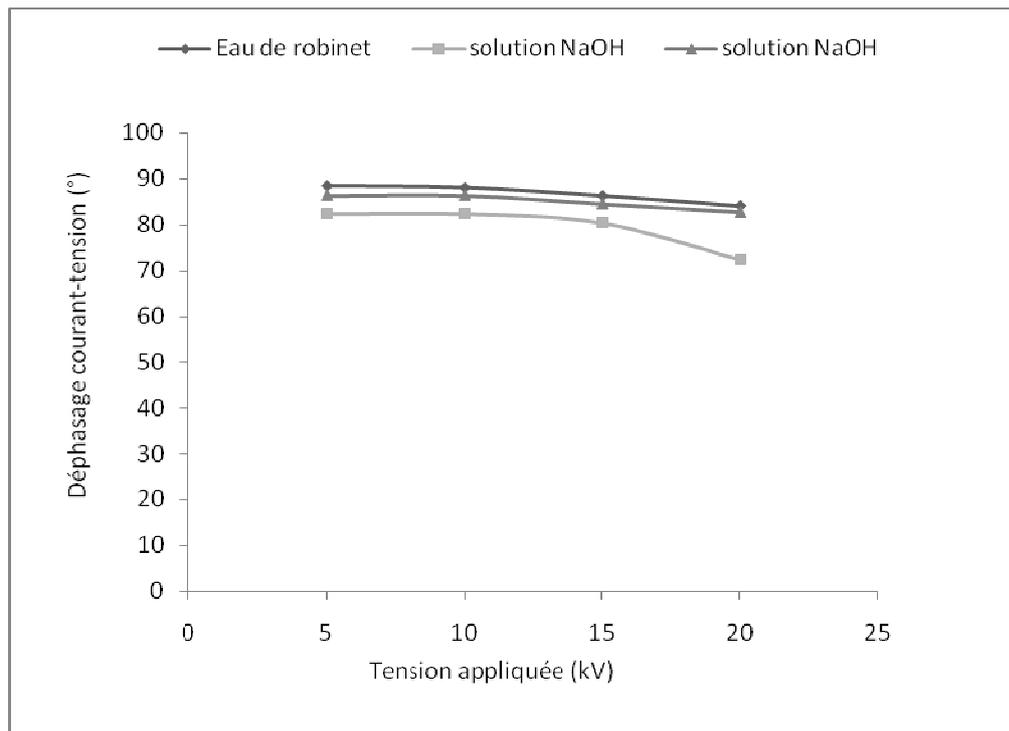


**Figure V.49 :** Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas de la solution de NaCl appliquée du côté terre

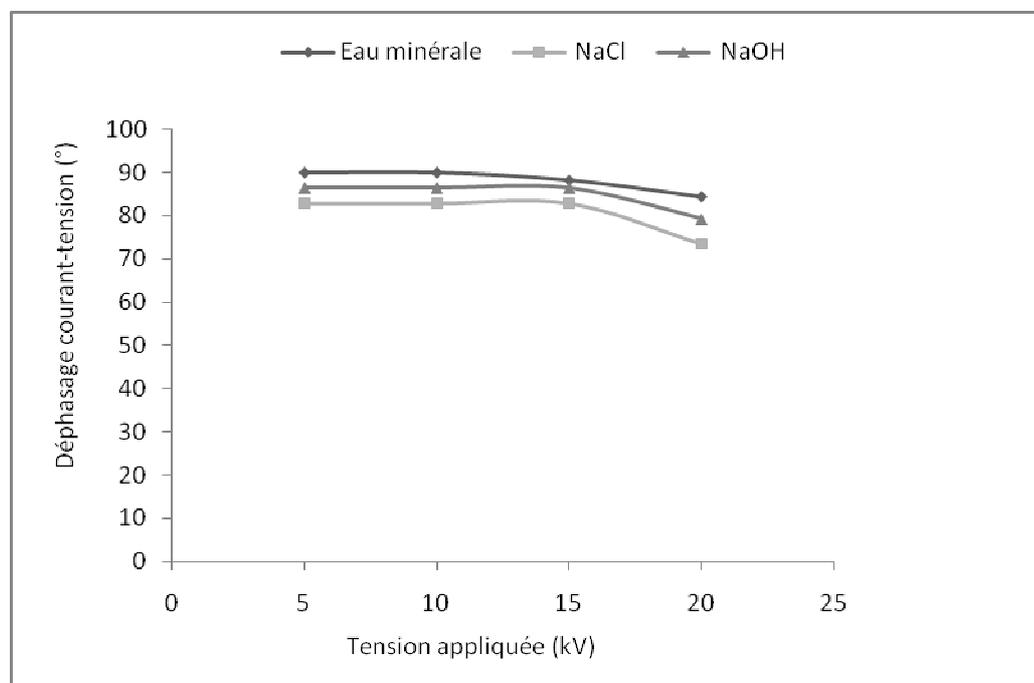
#### V.4.4.2. Influence de la nature de pollution

Aux figures (V.50) et (V.51), nous illustrons l'évolution du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour les trois solutions utilisées (eau minérale, solution saline et solution alcaline) ayant une conductivité de  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$  et appliquées du côté haute tension dans un premier cas, et du côté terre dans le deuxième.

Nous remarquons que les valeurs de déphasage prélevées dans le cas de l'utilisation de la solution de NaOH, sont inférieures à celles obtenues dans le cas de la solution de NaCl. En outre, les valeurs de déphasage lors de l'application de l'eau minérale sont relativement les plus élevées. Ceci est valable pour les deux répartitions de la pollution discontinue.



**Figure V.50 :** Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions, ayant une conductivité de  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté haute tension



**Figure V.51 :** Déphasage en fonction de la tension appliquée, cas des trois solutions, ayant une conductivité de  $465 \mu\text{S}/\text{cm}$ , appliquées du côté terre

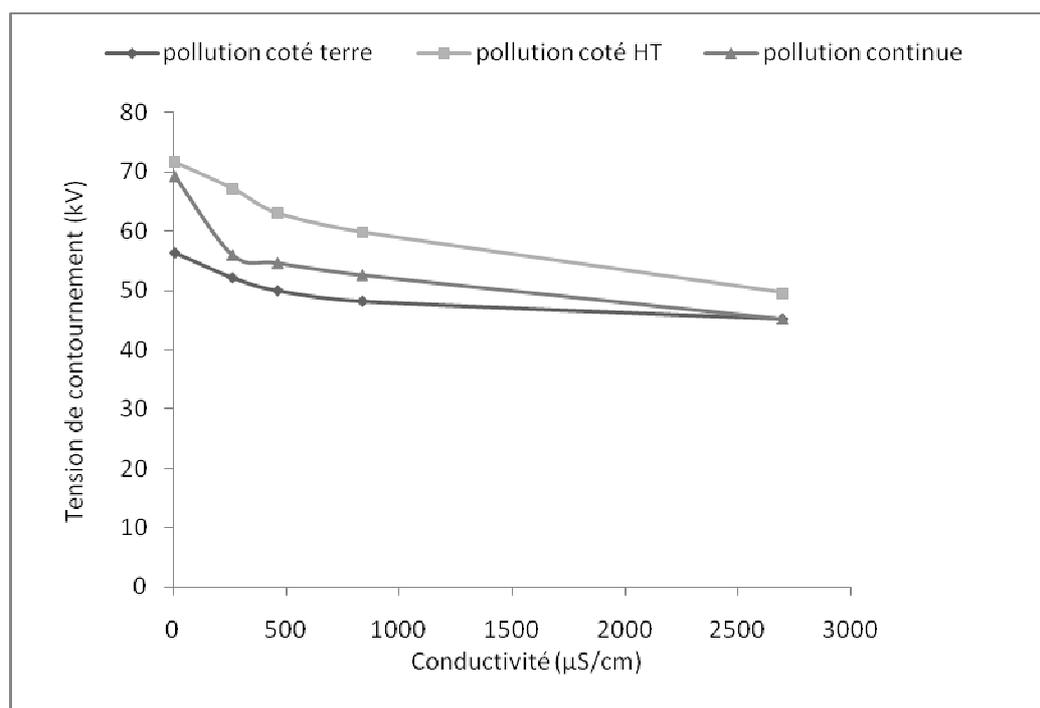
## V.5. Influence de la répartition de la pollution

### V.5.1. Sur la tension de contournement

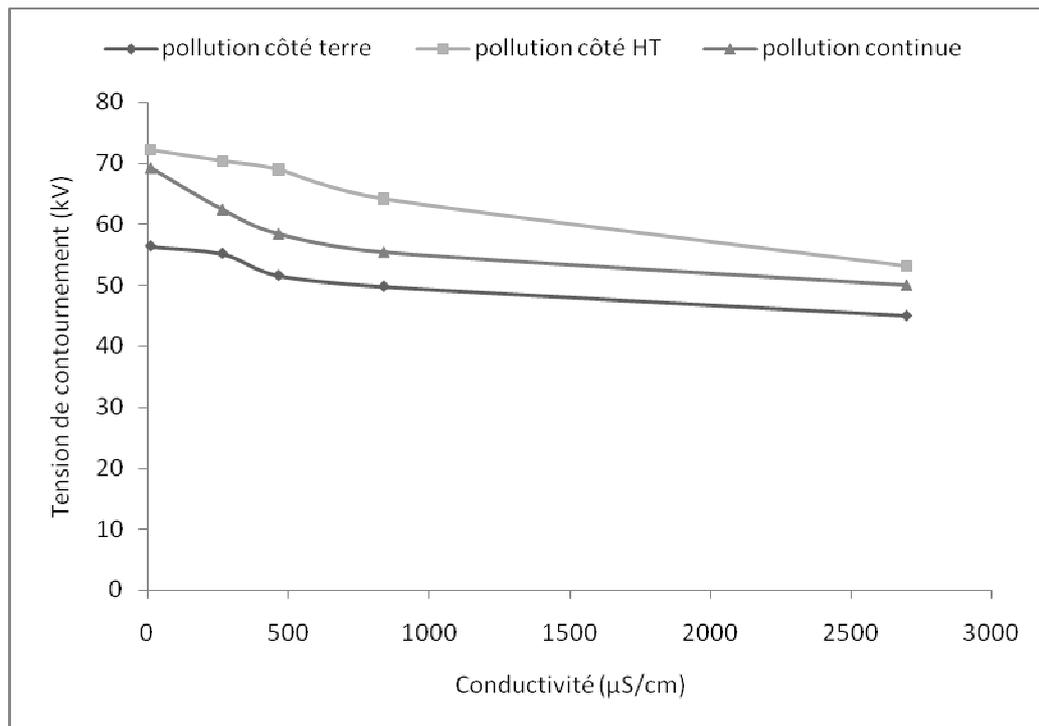
Afin de mettre en évidence l'effet de la répartition continue et discontinue de la pollution sur la tension de contournement, nous présentons aux figures (V.52) et (V.53) l'évolution de cette tension en fonction de la conductivité volumique du milieu pollué.

Pour une conductivité donnée et pour les deux solutions saline et alcaline, la tension de contournement est relativement élevée lorsque la pollution discontinue est appliquée du côté haute tension. Par ailleurs, cette tension est relativement faible lorsque la pollution discontinue est du côté terre.

En effet, la pollution continue ne représente dans toutes les circonstances, le cas le plus défavorable correspondant à la tension de contournement la plus faible.



**Figure V.52 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur la tension de contournement, cas de la solution de NaCl



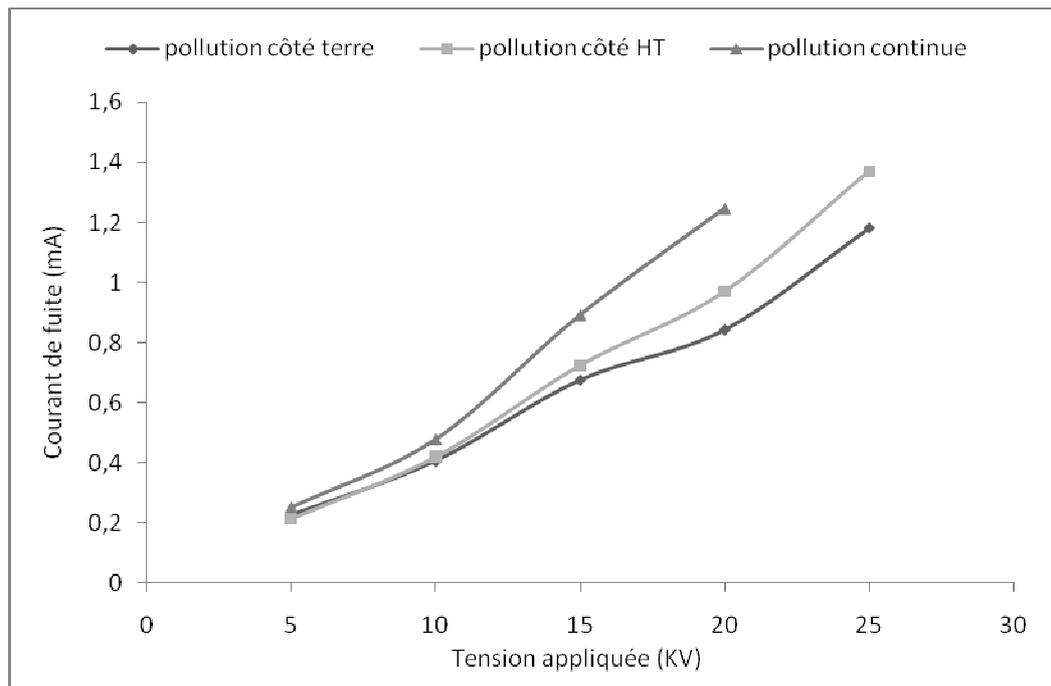
**Figure V.53 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur la tension de contournement, cas de la solution de NaOH

### V.5. 2. Sur le courant de fuite

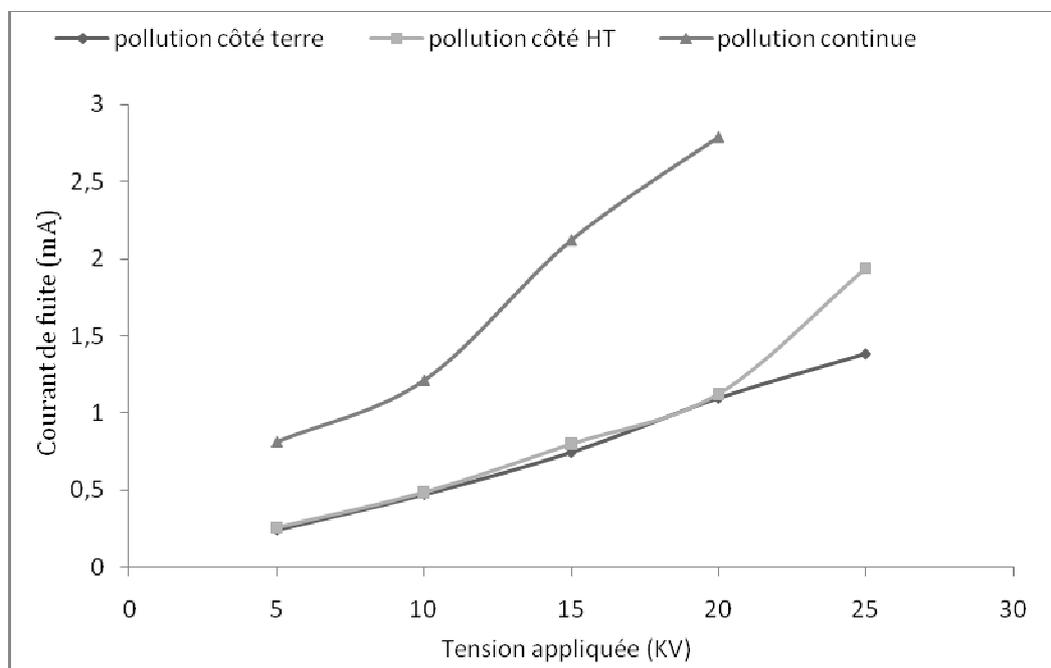
Pour les deux solutions saline et alcaline et pour les deux répartitions continue et discontinue de la pollution, nous illustrons aux figures (V.54) à (V.62), les caractéristiques donnant la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour toutes les conductivités utilisées.

Ces figures montrent bien l'impact de la répartition de la pollution sur le courant de fuite qui circule à la surface de l'isolateur

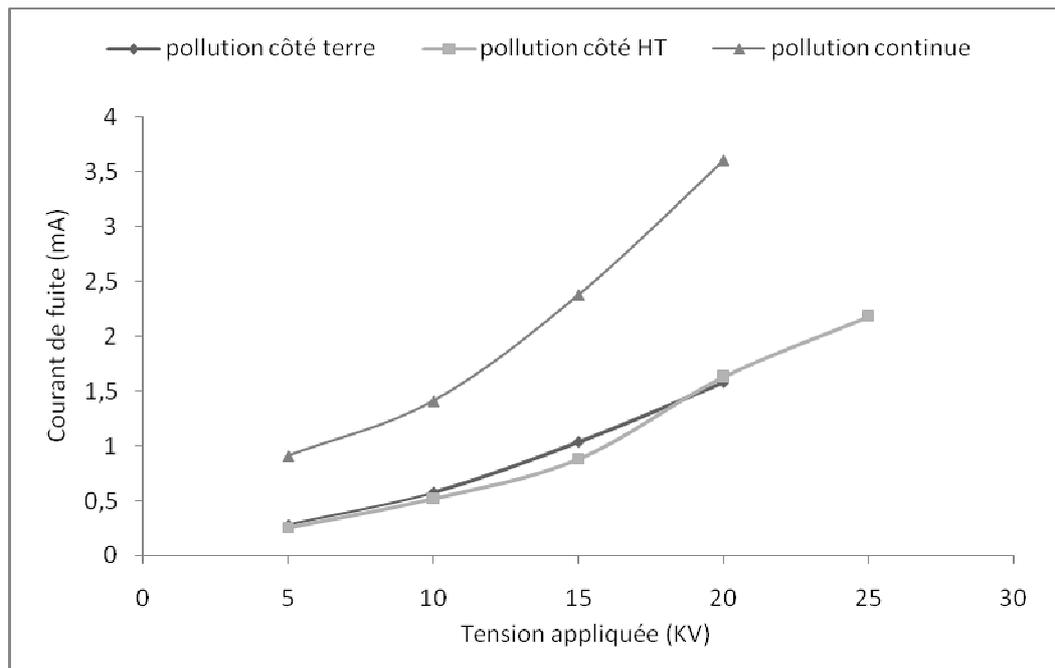
Ainsi, et pour une conductivité donnée, ce courant de fuite est le plus élevé lorsque la pollution est entièrement appliquée à la surface de l'isolateur (pollution continue). Par ailleurs, il est le plus faible lorsque la pollution discontinue est appliquée du côté terre.



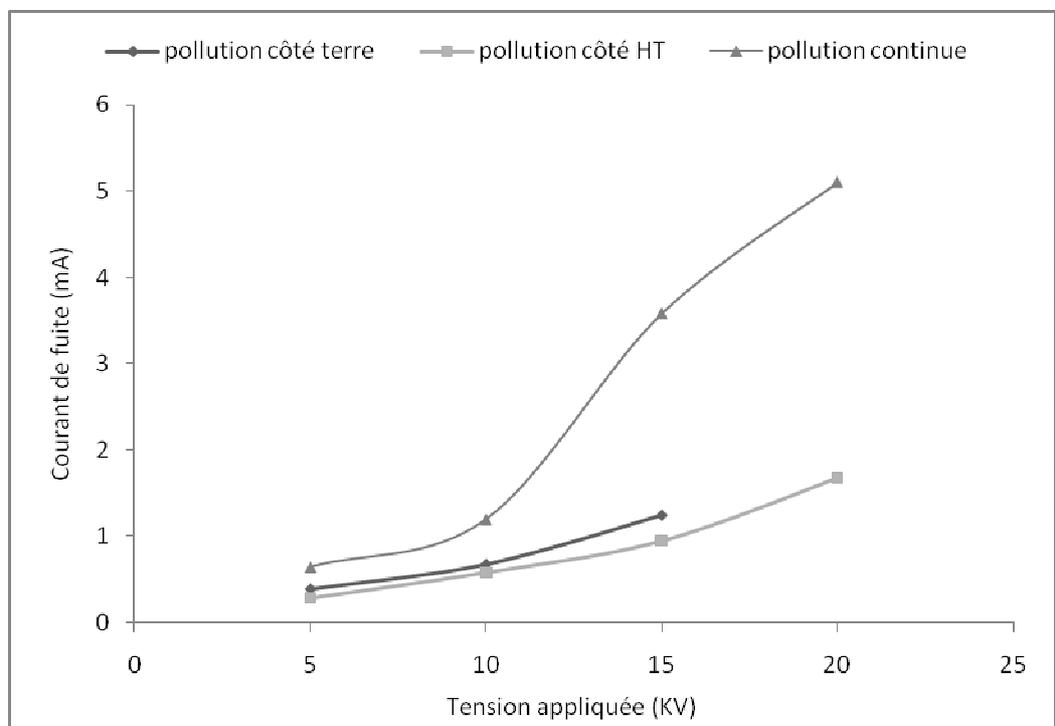
**Figure V.54 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de l'eau distillée



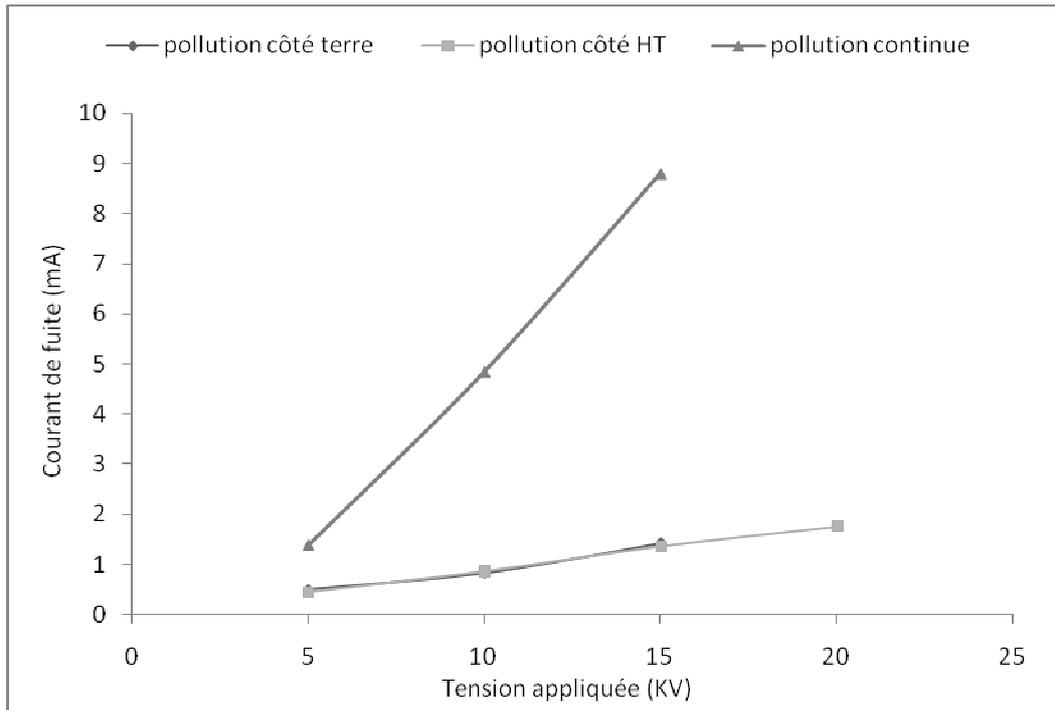
**Figure V.55 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 265 µS/cm



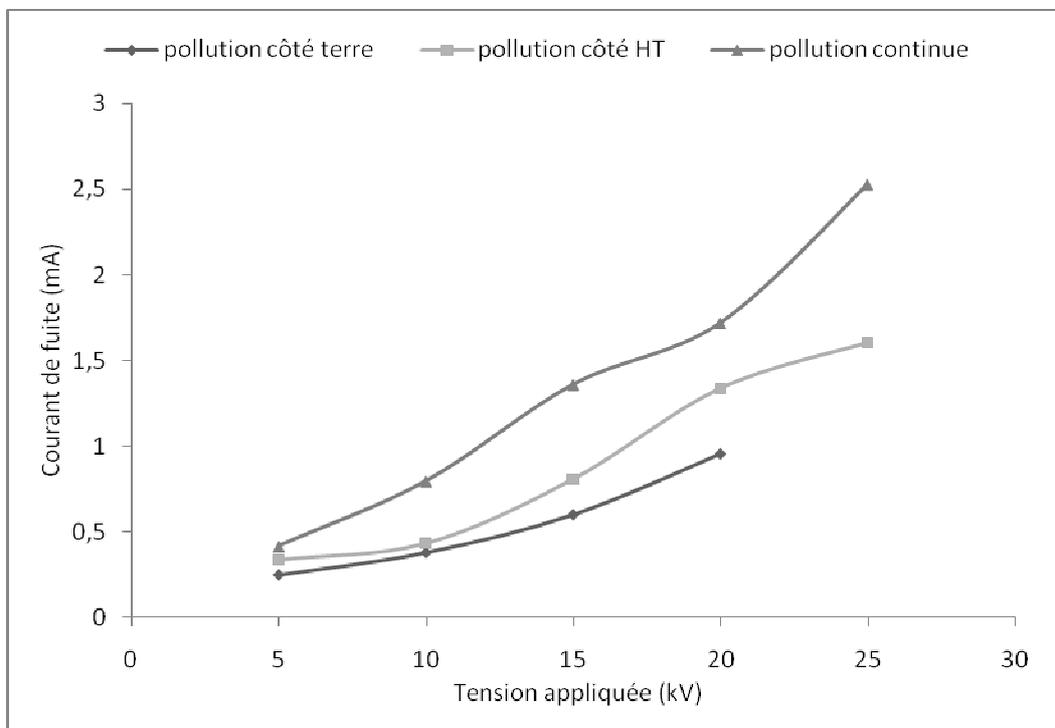
**Figure V.56 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 465  $\mu\text{S}/\text{cm}$



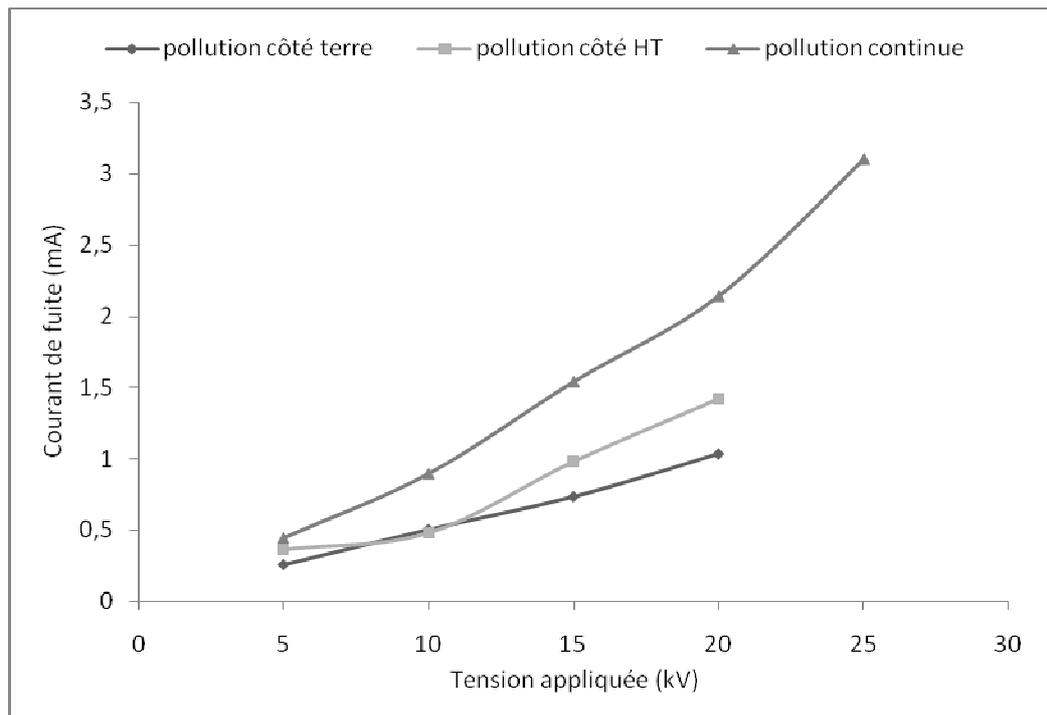
**Figure V.57 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$



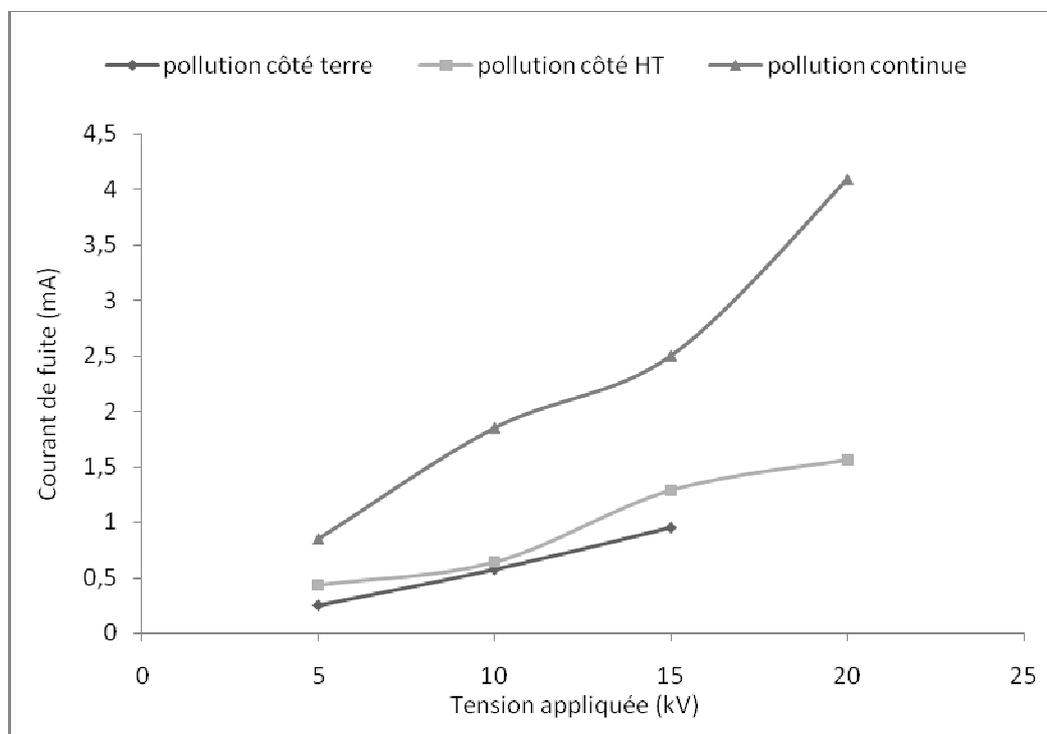
**Figure V.58 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaCl à la conductivité de 2.7 mS/cm



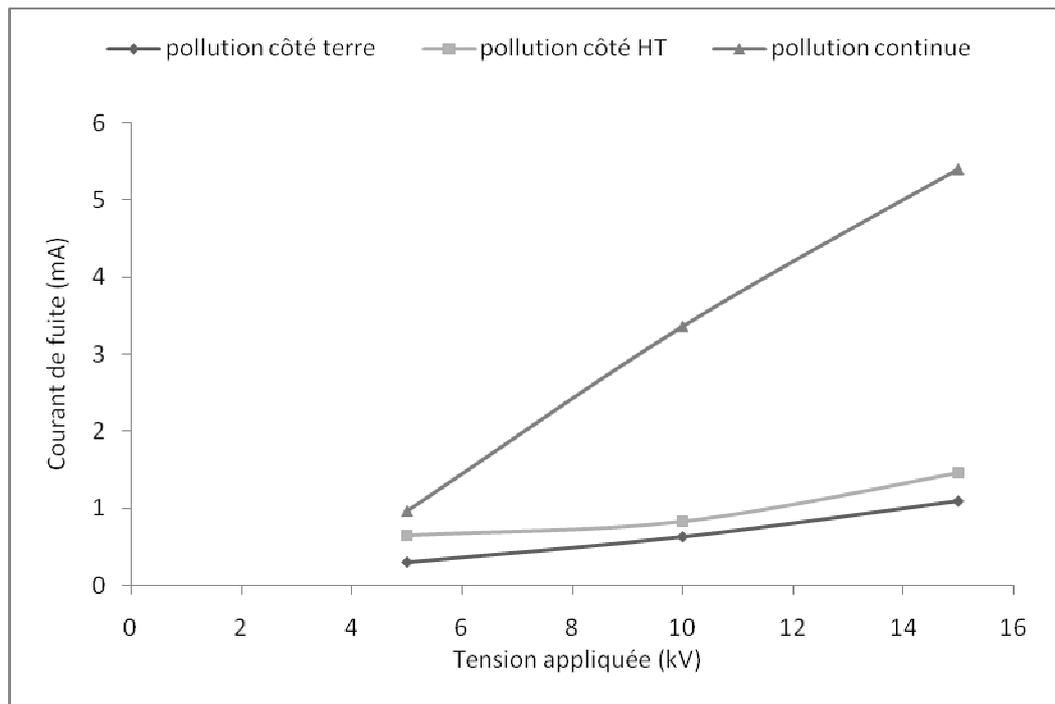
**Figure V.59:** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 265 µS/cm



**Figure V.60 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 465 µS/cm



**Figure V.61 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 840 µS/cm

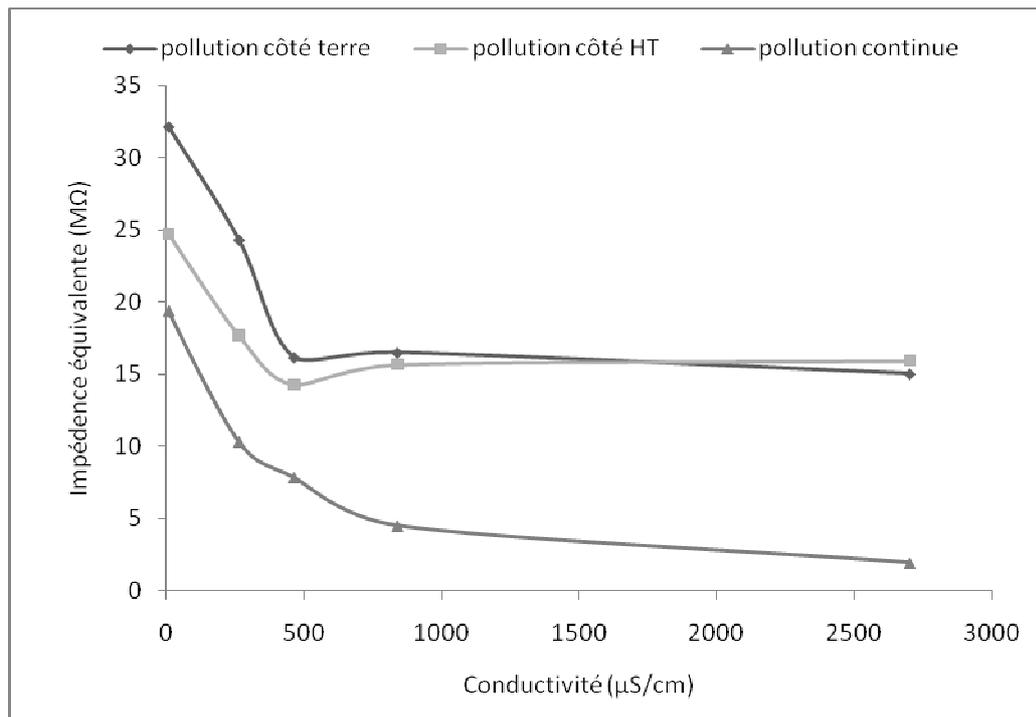


**Figure V.62:** Influence de la répartition de la couche polluante sur le courant de fuite, cas de la solution NaOH à la conductivité de 2.7 mS/cm

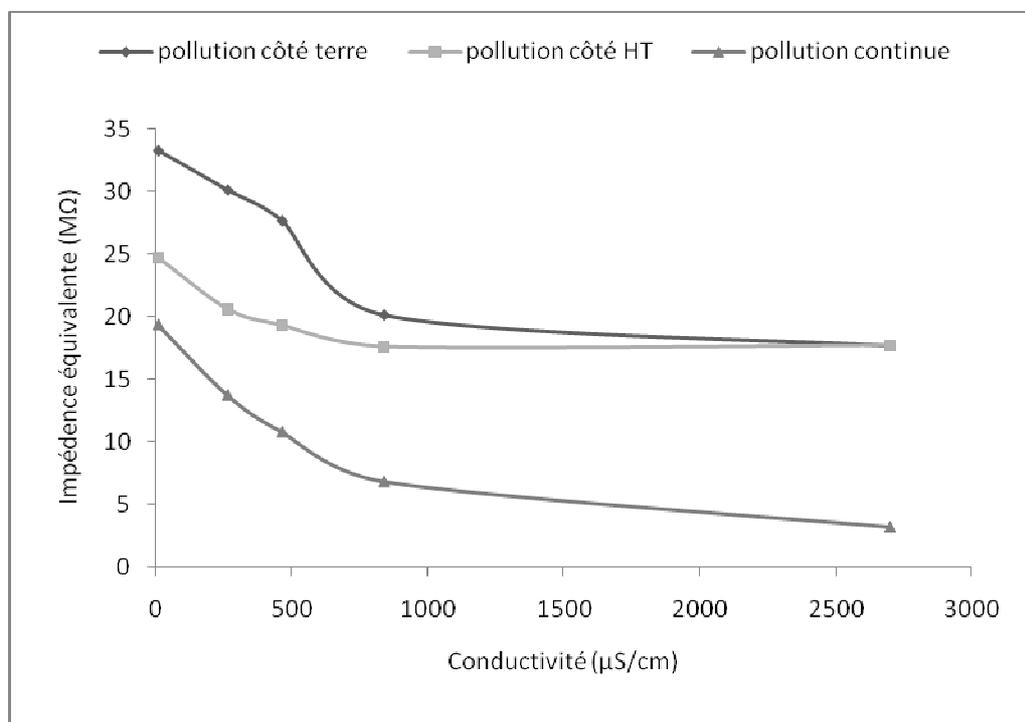
### V.5. 3. Sur l'impédance électrique

Pour les deux distributions continue et discontinue de la pollution ainsi que pour les deux solutions saline et alcaline que nous avons utilisées, les figures (V.63) et (V.64) représentent l'évolution de l'impédance électrique équivalente vue des électrodes en fonction de la conductivité volumique du milieu pollué.

Ces figures montrent clairement que l'impédance est affectée par la répartition de la couche polluante. Ainsi, et pour une tension donnée, cette impédance est relativement faible lorsque la pollution est continue, et est relativement élevée lorsque la pollution discontinue est appliquée du côté terre.



**Figure V.63 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur l'impédance, cas de la solution de NaCl



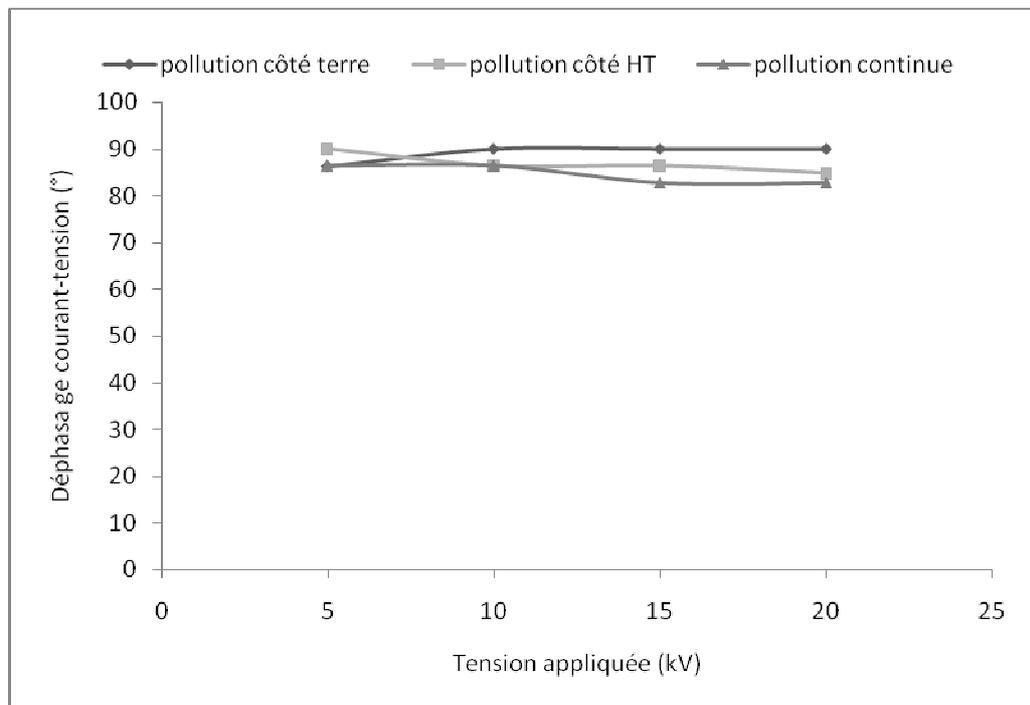
**Figure V.64 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur l'impédance, cas de la solution de NaOH

#### V.5. 4. Sur le déphasage courant-tension

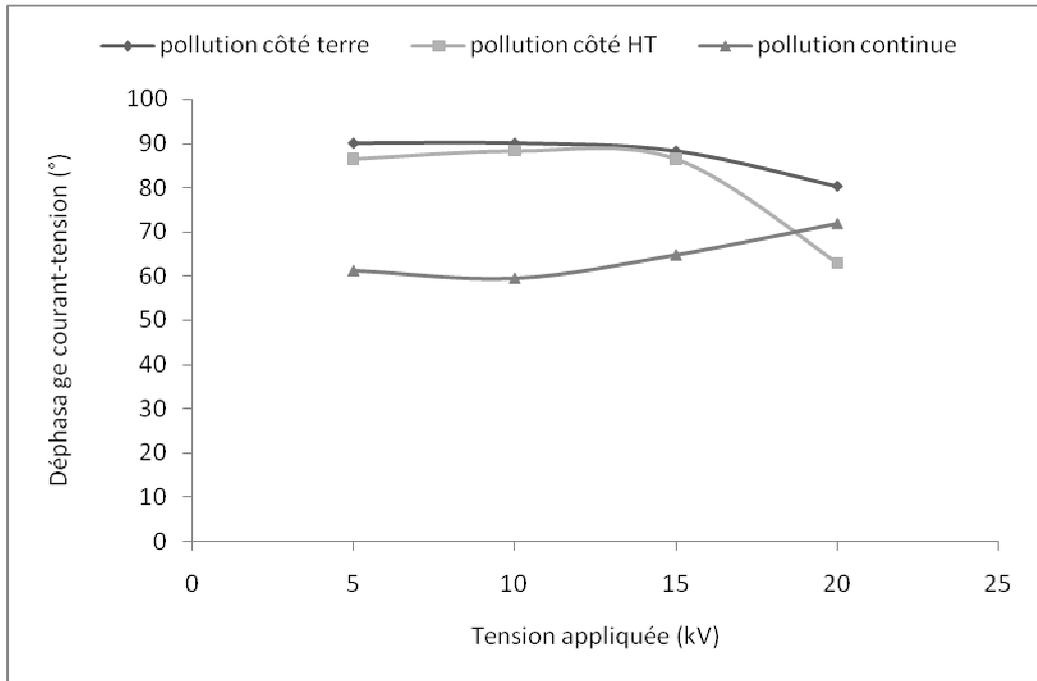
Dans le but d'examiner l'influence de la répartition de la pollution sur le déphasage courant-tension, nous avons tracé aux figures (V.65) à (V.73) l'évolution de ce déphasage en fonction de la tension, pour chaque conductivité utilisée de la solution alcaline ou saline, et ce pour les répartitions continue et discontinue de la pollution.

Nous remarquons bien que la répartition de la pollution sur la surface de l'isolateur a une influence sur le déphasage courant-tension.

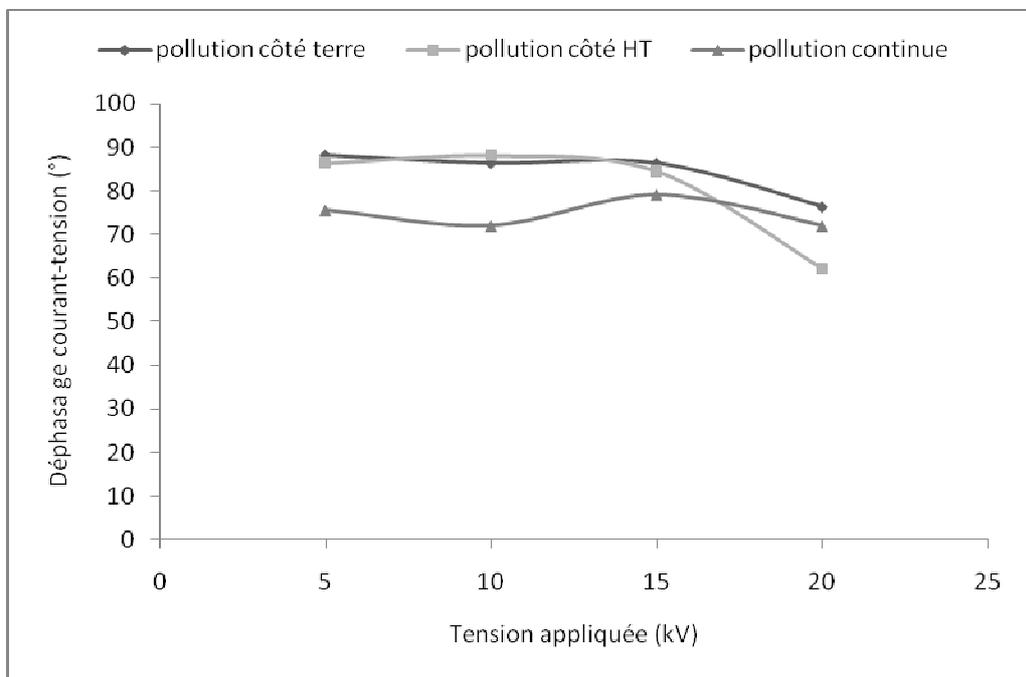
Nous remarquons, en général, que les valeurs de déphasage prélevées dans cas de pollution continue, sont inférieures à celles obtenues dans le cas de pollution discontinue. Ceci est valable pour les trois répartitions de la pollution.



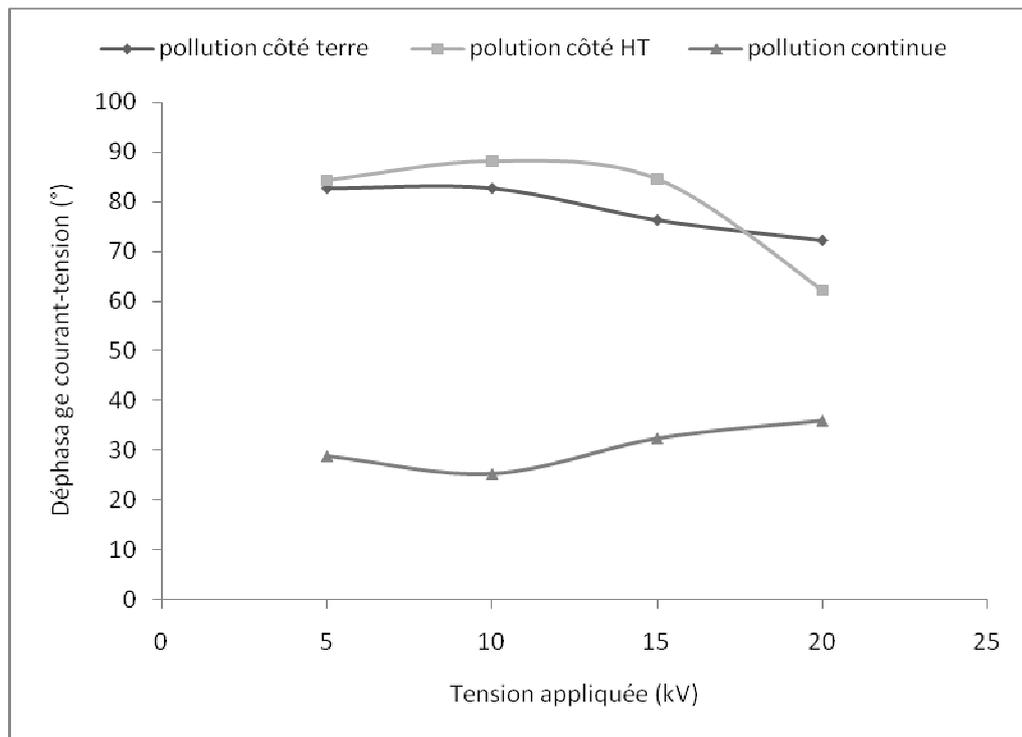
**Figure V.65 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de l'eau distillée



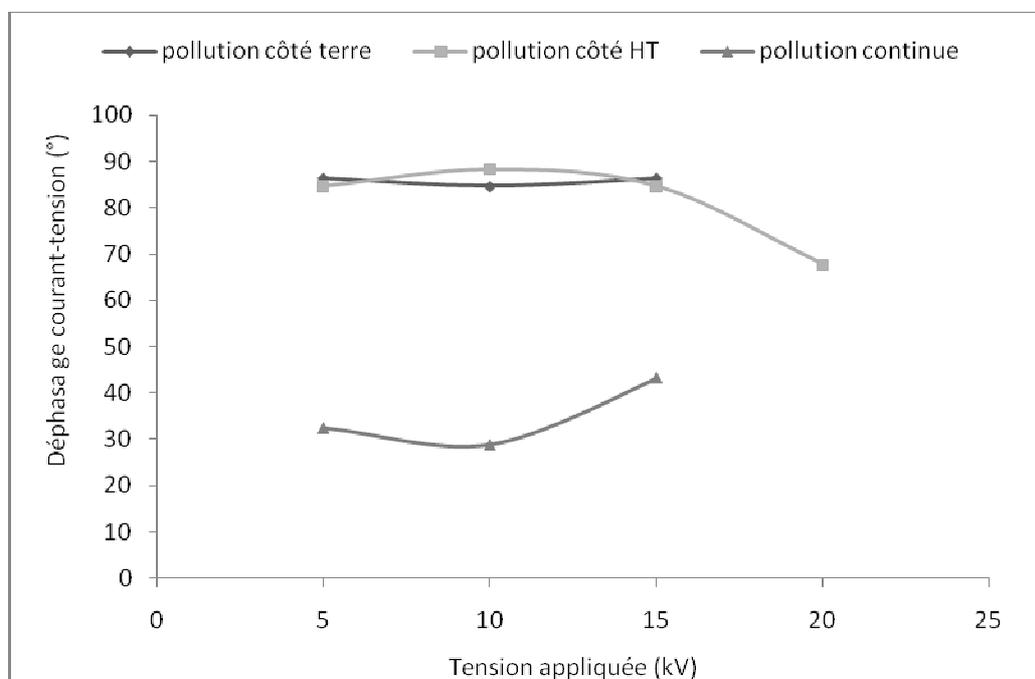
**Figure V.66 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 265 µS/cm



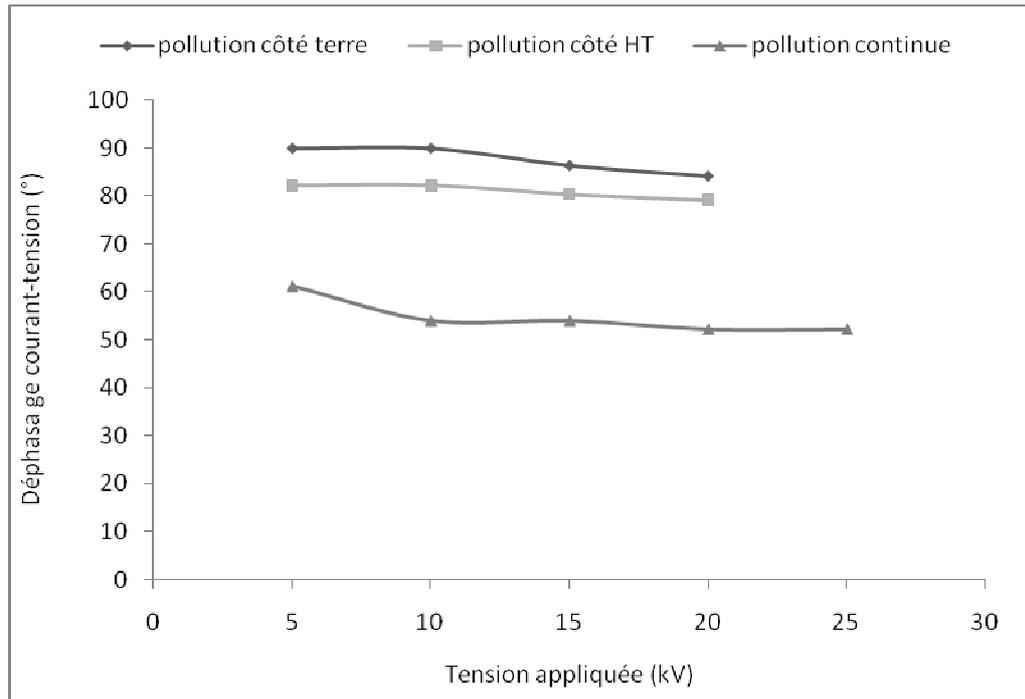
**Figure V.67 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 465 µS/cm



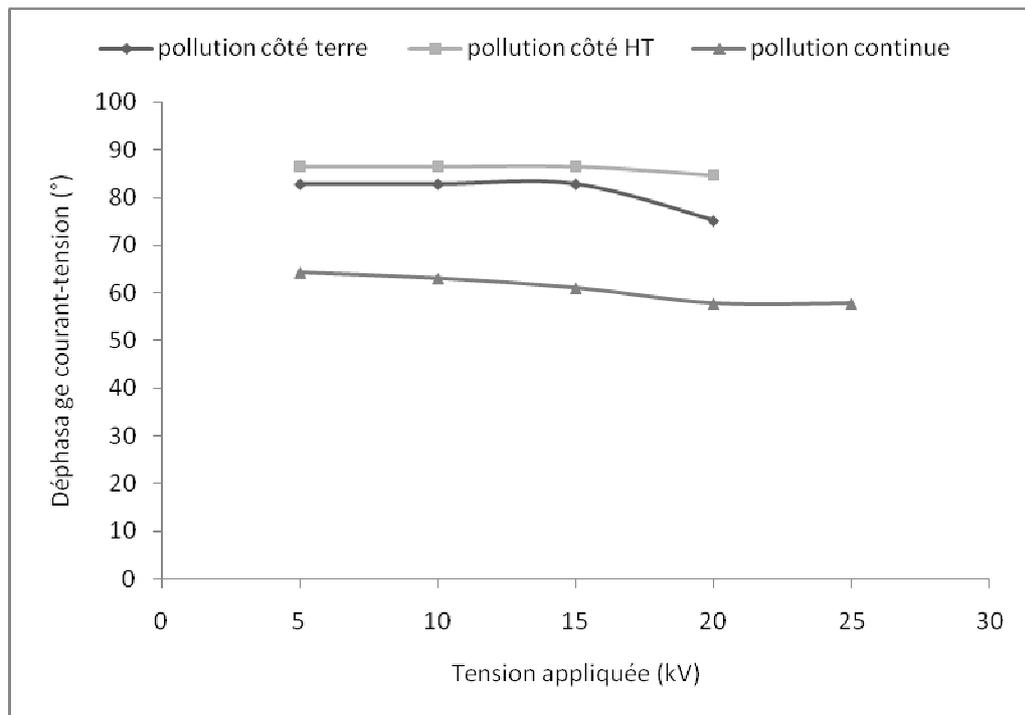
**Figure V.68 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$



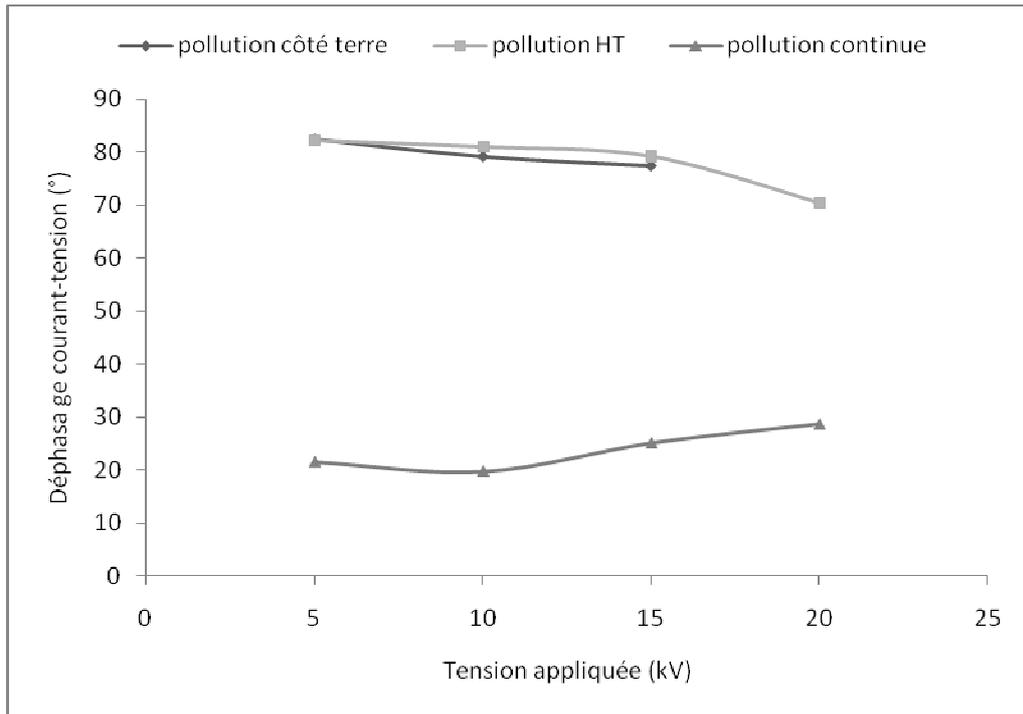
**Figure V.69 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaCl à la conductivité de 2.7  $\text{mS}/\text{cm}$



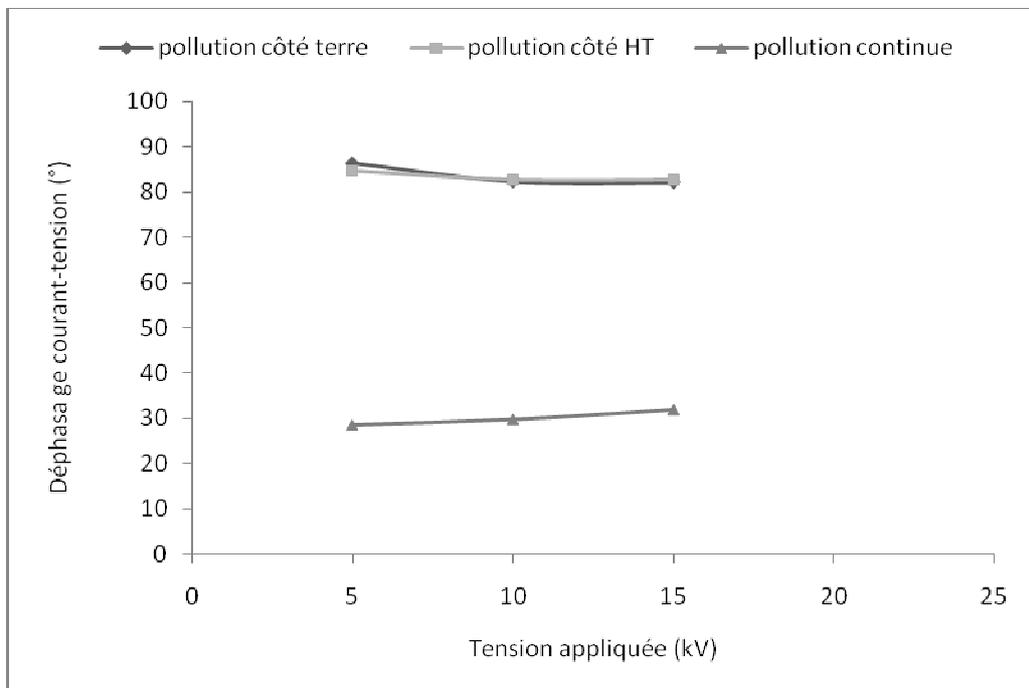
**Figure V.70 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 265 µS/cm



**Figure V.71 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 465 µS/cm



**Figure V.72 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 840 μS/cm



**Figure V.73 :** Influence de la répartition de la couche polluante sur le déphasage, cas de la solution NaOH à la conductivité de 2.7 mS/cm

## V.6. Conclusion

Il ressort de cette étude expérimentale, les principales conclusions suivantes :

- La tension de contournement diminue en fonction de la conductivité du milieu pollué. Cette tension est peu affectée par la nature de pollution affecte peu la tension de contournement, du moment que cette dernière est légèrement plus faible lors de l'application d'une solution saline. Par ailleurs, l'isolateur, l'isolateur est moins rigide lorsque la pollution discontinue est appliquée du côté terre.
- Le courant de fuite augmente avec de la tension appliquée et la conductivité de la pollution. Pour une même conductivité et même niveau de tension, le courant de fuite est relativement important lorsque nous utilisons une solution saline. Par ailleurs, le courant de fuite est important lorsque la pollution discontinue est appliquée du côté haute tension. En effet, la nature et la distribution de la pollution ont une influence sur le courant de fuite.
- L'impédance électrique équivalente diminue fortement pour des conductivités inférieures ou égales  $840 \mu\text{S}/\text{cm}$  et faiblement ailleurs. Nous constatons que cette impédance tend vers une limite constante propre à chaque solution. Pour une même conductivité, l'impédance relativement faible lorsque l'isolateur est entièrement pulvérisé par une solution saline.
- Concernant le déphasage courant-tension, il est clair que l'isolateur à l'état sec et propre est caractérisé par un effet capacitif. L'humidification de l'isolateur engendre, en général, une diminution de ce caractère capacitif en le rendant plus résistif. La position de pollution discontinue n'a pratiquement pas aucune influence sur ce déphasage. Cependant, le déphasage courant-tension ainsi obtenu est relativement plus faible lors de l'utilisation d'une solution alcaline par rapport à une solution saline de même conductivité.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Le travail expérimental que nous avons effectué, avait pour objectif d'étudier le comportement de l'isolateur capot et tige type 1512L artificiellement pollué, lorsqu'une tension alternative lui est appliquée. Pour cela, deux solutions chimiques, alcaline (à base de NaOH) et saline (à base de NaCl), de différentes conductivités, ainsi qu'une eau minérale et une eau distillée ont été utilisées. Par ailleurs, deux répartitions continue et discontinue (contenant deux configurations : pollution du côté terre et pollution du côté haute tension) de la pollution ont été considérées.

Lors des essais expérimentaux, nous avons suivi les variations de la tension de contournement, du courant de fuite, de l'impédance électrique équivalente vue des électrodes et du déphasage courant-tension en fonction de la nature, de la conductivité et de la distribution de la pollution sur la surface de l'isolateur. L'évolution du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension a été également examinée.

Étant donné que la tension de contournement, le courant de fuite, l'impédance électrique équivalente et le déphasage courant-tension changent en fonction de la composition chimique ainsi que de la conductivité de la pollution, le comportement de l'isolateur capot et tige 1512L est affecté par la nature et la conductivité de la pollution.

En effet, la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité volumique de la pollution. Pour une même conductivité des solutions chimiques, la tension de contournement la plus élevée est obtenue dans le cas de l'application de l'eau minérale. Par ailleurs, les tensions de contournements relatives à la solution alcaline sont légèrement élevées que celles obtenues lors de l'application de la solution saline. Par voie de conséquence, l'isolateur est moins rigide lorsqu'il pulvérisé par une solution saline. Il est évident que la tension de contournement est affectée par l'état de surface de l'isolateur. La tension de contournement est importante dans l'état sec qu'à l'état humide. En fonction de la répartition continue et discontinue de la pollution, la plus basse tension de contournement a été obtenue lorsque la pollution discontinue est appliquée du côté terre.

Le courant de fuite augmente avec la tension appliquée et la conductivité de la pollution. Pour une conductivité donnée, le courant de fuite obtenu dans le cas où l'isolateur est pulvérisé par la solution de NaCl est relativement élevé à celui prélevée lors de l'application de la solution de NaOH. Cette différence augmente avec la tension appliquée. En fonction du temps d'application de la tension, lors de l'utilisation

## Conclusion générale

---

d'une eau distillée, le courant reste pratiquement constant pour des tensions inférieures à 10 kV et décroît légèrement ailleurs. Lors de l'application des autres solutions (de NaCl, de NaOH, et l'eau minérale), le courant de fuite décroît en tendant vers une valeur limite. Cette décroissance s'accroît avec l'augmentation de la tension appliquée. Le courant de fuite est relativement important lorsque nous utilisons une solution saline. Par ailleurs, le courant de fuite est relativement élevé lorsque la pollution discontinue est appliquée du côté haute tension. En effet, la nature et la distribution de la pollution ont une influence sur le courant de fuite.

Avec l'augmentation de la conductivité volumique, l'impédance électrique équivalente diminue fortement pour des conductivités variant de 10 à 840  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et faiblement ailleurs en tendant vers une valeur limite. Cette dernière varie en fonction de la nature chimique de la pollution. Pour une conductivité donnée, l'impédance obtenue lors de l'utilisation de la solution saline est relativement faible à celle trouvée lorsque l'isolateur est pulvérisé par une solution alcaline. Par ailleurs, l'impédance électrique équivalente est affectée par l'état de surface de l'isolateur, car elle est la plus faible dans le cas où la pollution est continue.

Imposé par le profil de l'isolateur et tenant compte du phénomène de ruissellement, le déphasage courant-tension est toujours de type capacitif. Ce déphasage est lié essentiellement à l'état de surface de l'isolateur. L'humidification de cette surface entraîne une atténuation de ce déphasage en le rendant de type plus résistif. Cependant, l'apparition des zones sèches notamment pour des tensions dépassant les 15 kV, induit un accroissement du déphasage. Ceci a pour effet d'augmenter le caractère capacitif de l'isolateur. Par ailleurs, le déphasage courant-tension est légèrement inférieur lors de l'application de la solution de NaOH.

Le travail de recherche que nous avons entrepris, nous a permis de prendre connaissance de la complexité des mécanismes d'extension d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes faiblement conductrices lors de l'application des méthodes de mouillage. En effet, une bonne compréhension de ces derniers, fait appel à des connaissances de disciplines diverses telles que : la chimie, l'électrochimie, la mécanique des fluides, .....

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1] **S. Bouazabia, T. Chikhaoui**, « Méthodes d'Essais sur des Isolateurs Pollués dans les Conditions Désertiques », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1988.
- [2] **P. Claverie, Y.Porcheron**, « Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'Isolément des Ouvrages En Régions Polluées », RGE, Tome 82, No. 3, pp. 166-194, Mars 1973, Paris, France.
- [3] **G. Riquel, E. Span genberg**, « De la Céramique au Synthétique », EDE-Epure, No. 58, Avril 1998.
- [4] **M. Tegar**, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juillet 1993.
- [5] **P. J. Lambeth, H. Auxel, M. P. Verma**, « Méthode de Mesure de la Sévérité de la Pollution compte tenu de son Influence sur le Comportement des Isolateurs à Haute Tension », Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [6] **W. Heise, G.F, luxa, G.Revrery, M. P. Verma**, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [7] **M. Terkmani, M.Babouamer**, « Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension », projet de fin d'étude, Université de science et Technologie d'Oran, Juin 2005.
- [8] **L. Arrabiy**, « Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale polytechnique d'Alger, Juin1999.
- [9] **B.Hammoume, A.Kerbouche**, « Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du centre Algérien », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2007.
- [10] **M. Tegar, A. Boubakeur**, « Pollution des Isolateurs de Haute Tension », Cours 4èm Année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

## Bibliographie

---

- [11] **S. Tounsi, F. Chikh**, « Influence du Sol sur le Comportement d'un Modèle d'Isolateur sous Tension », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2008.
- [12] **F. Amidi, K. Ouerdane**, « Les Effets de la Pollution sur les Ouvrages Electriques à 30kV en Régions Littorales », Projet de Fin d'Etude, Département D'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Juin 1998.
- [13] **A. Cimador, S. Vitet**, « La Pollution des Isolateurs », EDF-Epure, N°. 27, Juillet 1990, Parie, France.
- [14] **D.NAMANE**, « Effet de la Discontinuité de la Couche Polluante sur le Comportement d'Isolateurs Haute Tension, sous la Fréquence de 50 Hz », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février, 1998.
- [15] **A.Mekhaldi**, « Etude du Développement d'un Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique », Thèse de Magister, Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1990.
- [16] **S. LOTFI, S. DJAFRI**, « Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electronique et d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger, Juin 1982.
- [17] **M. Teguar**, « Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres Electrogéométriques », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avril 2003.
- [18] **P. Claverie, Y. Porcheron**, « Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'isolement des Ouvrages en Région Polluées », RGE. Tome 82, N°3, pp. 166- 194, Paris, France, Mars 1973.

## Bibliographie

---

- [19] **A. Mekhaldi**, « Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz », Thèse de doctorat d'Etat, Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, juin 1999.
- [20] **CIGRE groupe de travail 04 du comité d'étude n°33**, « Mesure de la Sévérité de Pollution des Sites et Application au Dimensionnement des Isolateurs pour les Réseaux à Courant Alternatif », Electra n°64, Paris, France, Mai 1979.
- [21] **A. K. Mujundar, N. Vasudev, K. N .Ravi Channakeshava**, « Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber » Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, 28 Août –1 September 1995.
- [22] **Z. Sahli**, « Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur des Caractéristiques de Contournement des Isolateurs Réels Pollués sous Tension Continu », Mémoire de Magister, Génie Electrique, Université de Abderrahmane Mira de Bejaia. Juin 2005.
- [23] **M. Ben alia**, « Modélisation d'un Isolateur Naturellement Pollué sous Tension Impulsionnelle Utilisant des Circuits Electriques Equivalents », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin2008.
- [24] **J. L. Rafnoumanana**, « Modélisation par la Méthode des Equations Intégrales de Frontière de Phénomènes de Conduction Surfaiques sur les Isolateurs Pollués », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Centrale de Lyon, Mai 1992.
- [25] **J. Danis**, « A Stochastic Pollution Flashover Model », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Report 46-12, September 5-9, 1983, Athens, Greece.
- [26] **M. N. Rayes, M. Zhirh**, « Investigation About Flashover Performance of Insulators under Non Uniform Contamination », 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 43-08, 26-30, August 1991, Dresde, Germany.
- [27] **CEI 60-1**, « Techniques des Essais à Haute Tension », Définition et Prescriptions Générales Relatives aux Essais, deuxième édition 1989-11.

## Bibliographie

---

[28] **P. Claverie, Y. Porcheron**, « How to Choose Insulators for Polluted Areas », IEEE, Trans. PAS, Vol. 92, N°3, Mai-Juin 1973, p.1121-11131.

[29] **A. MEKHALDI, S. BOUAZABIA**, « Conduction Phenomena on Polluted Insulating Surface Under AC High Voltages», 7<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, rapport 3174, Autriche, 28 Août- 1e Septembre 1995.

[30] **HL. Woodson, A. J. McElroy**, « Insulators with Contaminated Surfaces Part II:Modelling of Discharge Mechanisms », IEEE Trans., Vol. Pas-89, N° 8, pp.858 – 867, November- December, 1970.

[31] **H. Boehme, F. Obénaus**, « Essais de Contournement sur des Isolateurs Pollués en Laboratoire et en Lieu de Service du Point de Vue de la Conception d'un Modèle D'amorçage pour Courant Rampant », GIGRE, N°407, Paris, France, 1966.

