



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

LABORATOIRE DE HAUTE TENSION

Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du

Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

**Thème :**

**Etude du Phénomène de Pollution des  
Isolateurs de Haute Tension dans la Région  
Electrique du Centre Algérien**

**Proposé et dirigé par:**

Pr. A.MEKHALDI.

**Etudié par :**

Bourim HAMMOUM.

Ahmed KERBOUCHE.

- Promotion Juin 2007 -

# Dédicaces

*Chaleureusement je dédie ce modeste travail:*

*A la lumière de ma vie, mes chers parents en témoignage de leur amour et de leur sacrifices sans limites, je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

*A ma chère femme.*

*A mon cher frère Zouhir.*

*A mes frères et mes sœurs.*

*A toute la famille KERBOUCHE.*

*A mon cher ami mon binôme Bourim.*

*A tous mes amis TAWAT...*

*A tous mes collègues de la promotion 2007.*

*Ahmed...*

# Dédicaces

*Impressionné, je dédie ce modeste travail:*

*A ceux qui ont consacré leurs vies pour leur fils et leurs filles, mes chers parents en témoignage de leur amour et de leur fidélité sans limites, je leurs souhaite une bonne santé, que Dieu me les garde.*

*A mes chères sœurs.*

*A mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines.*

*A toute la famille HAMMOUM {BOURYM}.*

*A ma fiancée, ses parents, ses sœurs et A toute sa famille*

*ALLIHOM.*

*A mon cher ami Bahmed.*

*A tous mes amis TAWAT...*

*A tous mes collègues de la promotion 2007.*

*A tous ceux qui m'aiment.*

*Bourim...*



# Remerciements

*En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant, qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension du département de Génie Electrique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger en collaboration avec le Centre de Recherche et de Développement de l'Electricité et de Gaz (CREDEG), sous la direction scientifique de Monsieur **Abdelouahab MEKHALDI** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, que nous tenons à le remercier beaucoup pour tout ce qu'il a sacrifié pour nous, pour sa disponibilité, pour ses conseils, son suivi constant, et surtout ses qualités humaines.

Nous remercions aussi le professeur **A. BOUBAKEUR**, Monsieur **M. TEGUAR** et Monsieur **R.TAHMI** Maîtres de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique pour leurs conseils combien utiles, leur grande disponibilité et leurs qualités humaines. Nous remercions autant l'équipe de GREDEG, qui nous ont aidé énormément afin d'accomplir ce travail.

Nos remerciements vont également aux enseignants du département de génie électrique et ainsi des sciences fondamentales pour avoir contribué à notre formation d'ingénieur.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, notamment notre ami Brahim HAMMOUM.

يعرض هذا العمل دراسة حول ظاهرة تلوث عوازل شبكة التوتر العالي في المنطقة الكهربائية للوسط الجزائري. ولهذا الغرض نقوم بتحليل الحوادث الناتجة عن تلوث العوازل الكهربائية. مما يسمح لنا بمعرفة المناطق الأكثر تلوثاً في الوسط الجزائري وإيجاد الحلول المناسبة. بعدها نعرض النتائج التجريبية التي حصلنا عليها من خلال التجارب المطبقة على عينة من العوازل الملوثة في عين المكان. في هذه التجارب نقوم بدراسة إشارة التيار المتسرب من أجل تفسير تغيراته و تعيين العوامل المؤثرة فيه من مثل التوتر المطبق و الناقلية السطحية وكذا صنف العازل المستعمل. وأخيراً نقترح نموذجاً تجريبياً أين نقوم بمقارنة النتائج المحصل عليها من كلا النموذجين المتعلقة بتوتر الإحاطة و التيار المتسرب.

**الكلمات المفتاحية:** تلوث - عوازل - تحليل - حوادث - منطقة ملوثة - تيار متسرب - توتر مطبق - ناقليّة - صنف - نموذج تجريبي - إحاطة.

## RESUME

Ce travail présente une étude du phénomène de la pollution des isolateurs des lignes de haute tension dans la région électrique du centre Algérien. En effet, une analyse des incidents dus à la pollution a été réalisée. Ceci nous permet d'identifier les zones les plus polluées et de trouver les solutions convenables. En suite, nous présentons les résultats expérimentaux des essais effectués sur des isolateurs de lignes de 220 kV polluées sur site. Nous étudions en outre, l'évolution du signal du courant de fuite en fonction d'un certain nombre de paramètres tels que la tension appliquée, la conductivité superficielle de la couche polluée et le profil de l'isolateur. Enfin, un modèle expérimental qui tient compte de la symétrie de l'isolateur est proposé et dont les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus sur un isolateur réel (tension de contournement et courant de fuite).

**Mots clés:** pollution – isolateur – analyse – incidents – zone polluée – courant de fuite – tension appliquée – conductivité – profil – modèle expérimental – contournement.

## ABSTRACT

This work presents a study of the pollution phenomenon of the high voltage insulators in the Algerian center electrical area. Indeed, an analysis of the incidents caused by pollution was carried out. This allows us to identify the most polluted zones and then to find the suitable solutions. We present the experimental results of the tests carried out on insulators of 220 kV lines polluted in situ. We study moreover, the evolution of the the leakage current signal according to a certain number of parameters such as the applied voltage, the surface conductivity of the polluted layer and the profile of the insulator. An experimental model which takes into account the symmetry of the insulator is proposed and whose obtained results are compared with those obtained on a real insulator (flashover voltage and leakage current).

**Mots clés:** pollution – isolateur – analyse – incidents – zone polluée – courant de fuite – tension appliquée – conductivité – profil – modèle expérimental – contournement.

**Key words:** pollution – insulator – analyzes – incident – polluted zone – leakage current – applied voltage – conductivity – profile – experimental model – flashover.

# ***SOMMAIRE :***

---

---

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

---

---

## ***Chapitre I.***

## ***Généralités.***

---

---

<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1. Isolateurs de haute tension.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Types des isolateurs.....</b>	<b>4</b>
I.2.1 Isolateurs rigides.....	5
I.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.....	5
I.2.2.1 Isolateur long fut .....	5
I.2.2.2. Isolateur capot et tige .....	6
<i>I.2.2.2.1. Profil standard .....</i>	<i>7</i>
<i>I.2.2.2.2. Profil anti-brouillard (forme A).....</i>	<i>7</i>
<i>I.2.2.2.3. Profil anti-brouillard (forme B).....</i>	<i>8</i>
<i>I.2.2.2.4. Profil plat .....</i>	<i>9</i>
<i>I.2.2.2.5. Profil sphérique .....</i>	<i>9</i>
<i>I.2.2.2.6. caractéristiques géométriques .....</i>	<i>10</i>
<b>I.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs .....</b>	<b>11</b>
I.3.1. Céramique .....	11
I.3.2. Verre .....	11
I.3.3. Matériaux synthétiques.....	12
<b>I.4. Pollution des isolateurs .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5. Sources de pollution .....</b>	<b>13</b>

I.5.1. Pollution naturelle .....	13
I.5.1.1. Pollution marine .....	13
I.5.1.2. Pollution désertique .....	14
I.5.2. Pollution industrielle .....	14
I.5.3. Pollution mixte .....	14
<b>I.6. Mesure de la sévérité de la pollution des sites .....</b>	<b>14</b>
<b>I.7. Comportement des isolateurs sous pollution .....</b>	<b>16</b>
<b>I.8. Conclusion .....</b>	<b>17</b>

---



---

***Chapitre II.            Traitements des statistiques des incidents.***

---



---

<b>Introduction .....</b>	<b>19</b>
<b>II.1. Sources de pollution .....</b>	<b>19</b>
II.1.1. Cimenteries .....	20
II.1.2. Carrières et extraction de sable .....	20
II.1.3. Unités de plâtre et de chaux .....	20
II.1.4. Centrales de production électrique .....	20
<b>II.2. Méthodes proposées pour l’analyse des incidents .....</b>	<b>21</b>
II.2.1. Première méthode .....	21
II.2.2. Deuxième méthode .....	22
<b>II.3. Zones de la région du centre Algérien .....</b>	<b>23</b>
<b>II.4. Localisation des zones les plus polluées.....</b>	<b>24</b>
<b>II.5. Traitements des données climatologiques .....</b>	<b>26</b>
II.5.1. Précipitations pluviales .....	26
II.5.2. Température .....	29

II.5.3. Insolation et évaporation .....	32
<b>II.6. Statistiques des incidents .....</b>	<b>33</b>
II.6.1. Incidents durant les trois années .....	33
II.6.2. Analyse des incidents .....	34
II.6.2.1. Année 2001 .....	34
II.6.2.1.1. Répartition des incidents par saison .....	34
II.6.2.1.2. Répartition horaire des incidents pour chaque saison.....	35
II.6.2.2. Année 2003 .....	37
II.6.2.2.1. Répartition des incidents par saison.....	37
II.6.2.2.2. Répartition horaire des incidents pour chaque saison.....	37
II.6.2.3. Année 2004 .....	38
II.6.2.3.1 Répartition des incidents par saison .....	38
II.6.2.3.2. Répartition horaire des incidents pour chaque saison .....	39
<b>II.7. Conclusion .....</b>	<b>41</b>

---



---

## ***Chapitre III.***

## ***Partie expérimentale.***

---



---

<b>Introduction.....</b>	<b>43</b>
<b>III.1. Dispositif expérimental .....</b>	<b>43</b>
III.1.1. Circuit d'essais au laboratoire de l'ENP.....	43
III.1.2. Objets d'essais .....	44
<b>III.2. Caractéristiques géométriques des isolateurs .....</b>	<b>45</b>
<b>III.3. Analyses Physico-chimiques .....</b>	<b>46</b>
<b>III.4. Mode opératoire.....</b>	<b>48</b>
<b>III.5. Résultats expérimentaux et discussions .....</b>	<b>49</b>
III.5.1. Tensions de contournement .....	49
III.5.1.1. Etat sec .....	49
III.5.1.2. Etat humide .....	51

III.5.2. Courants de fuite .....	54
<b>III.5.2.1. Visualisation et analyse de la forme du signal des courants de fuite</b> .....	54
III.5.2.2. Influence de la tension appliquée .....	63
III.5.2.3. Influence de l'état de la surface de l'isolateur.....	65
III.5.2.4. influence de la conductivité .....	67
III.5.2.5. Influence du profil de l'isolateur.....	69
<b>III.6. Conclusion</b> .....	<b>70</b>

---



---

## *Chapitre IV.*

---



---

## *Modèle expérimental.*

<b>Introduction</b> .....	<b>72</b>
<b>IV.1. Description du modèle proposé</b> .....	<b>72</b>
<b>IV.2. Mode opératoire</b> .....	<b>74</b>
IV.2.1. Préparation du modèle.....	74
IV.2.2. Application de la couche de pollution.....	74
IV.2.3. Procédés d'essais.....	75
IV.2.3.1. Tension de contournement.....	75
IV.2.3.2. courant de fuite.....	75
IV.2.3.3. déphasage courant – tension.....	75
<b>IV.3. Résultats et interprétations</b> .....	<b>76</b>
IV.3.1. Tension de contournement.....	76
IV.3.2. Courant de fuite.....	77
IV.3.2.1. Visualisation et analyse de la forme du signal de courant de fuite .....	77
IV.3.2.2. Comparaison de la caractéristique courant de fuite–tension appliquée.....	82
IV.3.2.3. Influence de la conductivité.....	85

IV.3.3. Déphasage courant –tension.....	88
IV.3.3.1. Influence de la conductivité superficielle.....	89
IV.3.3.2. Influence de la tension appliquée.....	90
<b>IV.5. Conclusion.....</b>	<b>92</b>

---

---

**CONCLUSION GENERALE .....94**

---

---

Annexes

---

---

Annexe I .....	1
Annexe II.....	6
Annexe III .....	9
Annexe IV .....	15

*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

## *Introduction générale*

Parmi les préoccupations des exploitants de production et de transport de l'énergie électrique, il y a la fiabilité et la continuité de service durant toute l'année. Pour cela, il faut minimiser au maximum les coupures d'électricité. Une partie importante de ces coupures est due aux incidents survenus sur les lignes des réseaux de transport d'électricité en haute tension (220 kV et 60 kV). Nous citons par exemple :

- La rupture d'un câble d'un pylône.
- La foudre.
- Un arrêt brusque de la production dans une centrale électrique.
- Les perturbations climatiques.
- Les contournements des isolateurs des lignes de transport de haute tension.

Parmi les principales causes qui mènent au contournement des isolateurs des lignes de haute tension, la pollution des surfaces de ces derniers. On sait bien que la rigidité diélectrique des isolateurs est élevée si leurs surfaces sont propres et sèches, et que cette rigidité diminue si la surface est polluée. L'humidification de ces dépôts polluants engendre, dès la mise sous tension, la naissance d'un faible courant de fuite [4-5]. Ce dernier circule le long des zones de résistivités différentes et modifie la répartition du potentiel entre les électrodes. La décharge électrique peut s'amorcer, si le champ électrique local atteint un certain seuil [1]. Sous certaines conditions, cette décharge peut s'allonger sur la surface de l'isolateur menant au court-circuit de l'électrode haute tension et la masse; c'est le phénomène de contournement, dont les conséquences vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé [1-11].

Devant ce phénomène contraignant pour le transport de l'énergie électrique et afin d'y faire face et minimiser au maximum les incidents dus à la pollution, plusieurs travaux de recherche ont été entrepris et continuent à l'être à ce jour à travers un grand nombre de laboratoires de recherche aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale. Pour cela, la SONELGAZ (Société Nationale d'Electricité et de Gaz) et par le biais d'une de ses filiales, le CREDEG (Centre de Recherche et Développement de l'Electricité et de Gaz) a décidé d'entreprendre, en étroite collaboration avec des chercheurs nationaux, un travail de recherche

portant sur le phénomène de la pollution des isolateurs de haute tension en Algérie, dont notre travail constitue en fait une partie.

Le premier chapitre présente des généralités traitant des isolateurs de haute tension, leurs caractéristiques, leurs différents types ainsi que les matériaux utilisés dans leur fabrication. Ce premier chapitre traite aussi du phénomène de la pollution en générale et ses conséquences néfastes sur le comportement des isolateurs.

Une analyse détaillée des incidents survenus sur le réseau de transport d'électricité en haute tension (220 kV) de la région électrique du centre Algérien (région d'Alger), dûs au problème de la pollution des isolateurs durant trois années (2001, 2003 et 2004), est présentée dans le deuxième chapitre. En effet, cette analyse définit les saisons les plus touchées par ce problème, et même les périodes du jour où ce problème est beaucoup plus probable d'apparaître. Dans ce chapitre nous présentons aussi l'influence des conditions climatologiques (pluie, température,...) sur le nombre de ces incidents ainsi que leur répartition annuelle.

Dans le troisième chapitre, nous présentons nos résultats expérimentaux des essais effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ces essais sont effectués sur des isolateurs de haute tension (220 kV) de trois chaînes d'isolateurs de profils différents pollués sur site. Ces trois chaînes sont enlevées de la région électrique du centre Algérien (Alger Est – Cap Djinet (ALE-RDJ) et l'Arbaa-Khemis Miliana (ARB-KHE)). Les essais concernent les tensions de contournement des isolateurs sous différents états de surface, ainsi que les courants de fuite circulants sur leurs surfaces en fonction des tensions appliquées et en fonction des différentes conductivités de l'eau utilisée pour l'humidification.

Finalement, un modèle statique expérimental de Laboratoire permettant de prédire le comportement sous tension alternative d'un isolateur à profil antibrouillard (de forme B) pollué, est élaboré et présenté dans le quatrième chapitre. Les essais effectués sur ce modèle concernent les courants de fuite pour différentes conductivités de la pollution et pour différents niveaux de tension, ainsi que le déphasage du courant de fuite par rapport à la tension d'alimentation pour les mêmes conditions citées précédemment. Enfin, une comparaison entre les résultats obtenus sur le modèle plan de laboratoire et ceux obtenus sur l'isolateur à profil antibrouillard (de forme B) a été faite.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

*Chapitre I*  
*Généralités.*

### ***Introduction :***

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique.

En effet, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension. La pollution de ces isolateurs figure comme un vrai problème néfaste à leur bon fonctionnement. La tension de tenue des isolateurs peut diminuer considérablement à cause des dépôts polluants recouvrant leurs surfaces. Ils peuvent même conduire au contournement des isolateurs dans certains cas critiques.

#### ***1.1. Isolateurs de haute tension :***

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

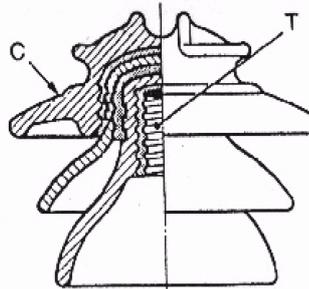
Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes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

#### ***1.2. Types d'isolateurs :***

Vu les différentes façons d'utilisations et les différentes conditions de fonctionnement des isolateurs, on en distingue des types différents des isolateurs. La différence entre ces types peut se faire soit par leur fonction (support ou traversée), soit par le matériau isolant utilisé pour la fabrication de ces isolateurs, soit encore par leur profil ou par leur mode de fixation.

### ***1.2.1 Isolateurs rigides :***

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure I.1). Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV [9].



**Figure I.1 :** Isolateur rigide [7].

C : Cloche    T : Logement de tige.

### ***1.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne :***

Ils sont constitués par le 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 [9-13]. 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 :

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

#### ***1.2.2.1 Isolateur long fut :***

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 [13]. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit

elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (**figure I.2**), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (**figure I.3**) [7,9].

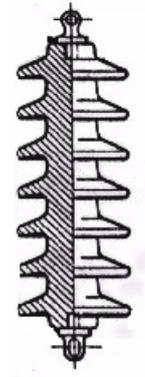


Figure I.2



Figure I.3

### *I.2.2.2. 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 troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capot de l'élément inférieur en utilisant du ciment (**Figure I.4**) [7].

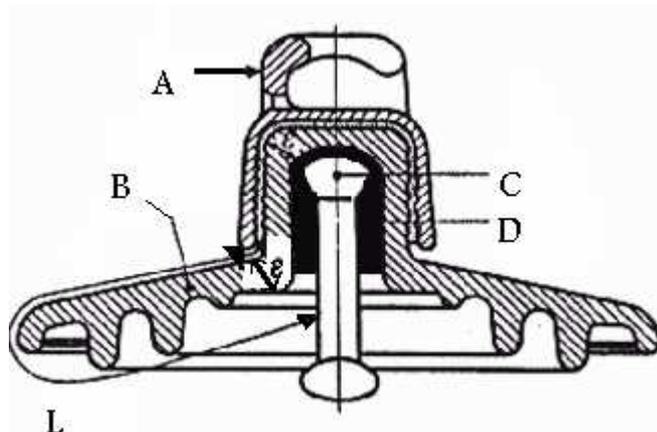


Figure I.4.

A : le capot.

B : le diélectrique (verre trempé ou céramique).

D : le ciment de fixation.

C : la tige.

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

$\varepsilon$  : Longueur du canal de perforation,  $\varepsilon \ll L/2$ .

On peut trouver plusieurs profils d'isolateurs capot et tige et ceci pour un meilleur fonctionnement.

#### ***1.2.2.2.1. Profil standard :***

La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation 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 endroits à pollution moyenne (**Figure I.5**) [9].



**Figure I.5** : Isolateur capot et tige de profil standard.

#### ***1.2.2.2.2. Profil anti-brouillard (forme A):***

Son diamètre est plus grand que celui 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 l'action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire (**Figure I.6**) [7, 9].



**Figure I.6 :** Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme A).

#### ***1.2.2.2.3. Profil anti-brouillard (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.7**).



**Figure I.7 :** Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme B).

#### ***I.2.2.2.4. 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.8**).



**Figure I.8 :** un isolateur capot et tige de profil plat.

#### ***I.2.2.2.5. 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.9**).



**Figure I.9 :** Isolateur capot et tige de profil sphérique.

***I.2.2.2.6. caractéristiques géométriques :***

En effet, les caractéristiques géométriques (diamètre externe de la partie isolante, longueur de la ligne de fuite...) des isolateurs à capot et tige diffèrent selon leurs conditions de service (tension de service, sévérité de la pollution du site ...). Ci-dessous quelques caractéristiques géométriques selon la publication CEI 60305 (**Tab I.1**) [9].

Désignation CEI	Charge de rupture (kN)	Diamètre extérieur (mm)	Pas Nominal (mm)	Longueur de la ligne de fuite (mm)
U 40	40	175	100 110	185
U 70	70	255	127 146	280
U 100	100	255 288 <sup>(1)</sup>	127 146 <sup>(1)</sup>	318 440 <sup>(1)</sup>
U 160	160	280 320 <sup>(1)</sup>	146 170 <sup>(1)</sup>	370 540 <sup>(1)</sup>
U 300	300	320	195	480
U 400	400	360 380	206 220	525 550
U 530	530	380 440	240 255	600 640

**Tableau I.1 :** Caractéristiques géométriques des isolateurs à capot et tige (CEI 60305) [9].

<sup>1</sup> Isolateurs utilisés dans des zones polluées.

### ***1.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs :***

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.

Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [9, 13].

#### ***1.3.1. Céramique :***

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance... [7,9].

#### ***1.3.2. Verre :***

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile [9-13]. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

##### **❖ Le verre trempé :**

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C [9, 13].

##### **❖ Le verre recuit :**

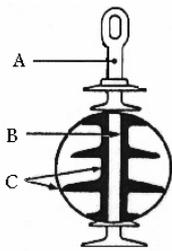
Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas

aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension [7,9].

### ***I.3.3. Matériaux synthétiques :***

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (**Fig. I.10**) [7, 9, 13].

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (**Fig. I.11**) [7]. L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...) (**Fig. I.12**) [7].

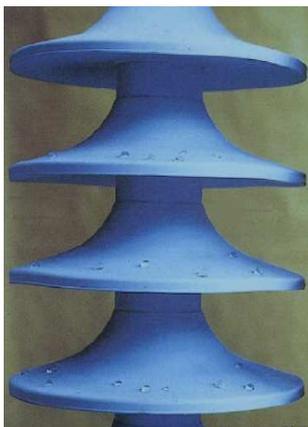


A : Pièces d'accrochage métallique.

B : noyau en fibre de verre-résine.

C : Revêtement à ailettes en matériaux synthétiques.

**Figure I.10.**



**Figure I.11.**



**Figure I.12.**

#### ***1.4. Pollution des isolateurs :***

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension. C'est un paramètre important à prendre en considération lors du choix et du dimensionnement des chaînes d'isolateurs.

La pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur [9,13].

#### ***1.5. Sources de pollution :***

Nous distinguons trois sortes de pollutions : la pollution naturelle, industrielle et mixte.

##### ***1.5.1. Pollution naturelle :***

La pollution naturelle provient de sels marins dans des régions côtières, de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants), de sables véhiculés par le vent en régions désertiques [7].

##### ***1.5.1.1. Pollution marine :***

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières sont exposées au vent qui vient de la mer et qui porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs. Cette couche peut devenir conductrice

lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même la génération d'un contournement [7, 9].

#### ***1.5.1.2. Pollution désertique :***

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, les vents de sable. Malheureusement, après ces vents, des dépôts de sable se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts seront humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable [9,11].

#### ***1.5.2. 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, minerais ..... etc.), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture) [13].

#### ***1.5.3. Pollution mixte :***

Ce type de pollution est le plus dangereux, elle est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone, comme les zones industrielles dans des régions côtières.

#### ***1.6. Mesure de la sévérité de la pollution des sites :***

La sévérité de la pollution d'un site est généralement mesurée par différentes méthodes. Il y a la méthode de salinité équivalente qui consiste à mesurer la conductivité de la solution obtenue par la dissolution des agents polluants dans de l'eau distillée. Il y a aussi la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement. Les essais de laboratoire sont valables dans la mesure où les conditions d'essais conduisent aux mêmes valeurs de courant de fuite observées sur site [9,11]. La mesure de la sévérité de la pollution d'un site est importante lors du choix des isolateurs à installer dans ce site [7-11].

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI 81-5 qui sont: faible, moyenne, forte et très forte (**Tab. I.2**) [9].

Faible 0.06 mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage</li> <li>• Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies.</li> <li>• Régions agricoles.</li> <li>• Régions montagneuses.</li> </ul>
Moyenne 0.20mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipées d'installation de chauffage.</li> <li>• Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies.</li> <li>• Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la cote.</li> </ul>
Forte 0.60mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes.</li> <li>• Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement fort venant de la mer.</li> </ul>
Très forte > 0.60 mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices.</li> <li>• Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer.</li> <li>• Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.</li> </ul>

**Tableau I.2** : Classement de degré de pollution selon CEI 815 [9].

### ***1.7. Comportement des isolateurs sous pollution :***

Le comportement des isolateurs sous pollution est un facteur essentiel pour la conception et l'exploitation des lignes en zones polluées. Il convient donc de connaître les différents phénomènes de conduction sous pollution.

Lors de la mise en place d'une chaîne d'isolateurs, la longueur de la ligne de fuite de l'ensemble est telle que le champ électrique en chaque point est très inférieur à la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante. La conductivité superficielle créée par la couche de pollution, modifie la répartition du potentiel de la ligne de fuite, selon les contraintes auxquelles est soumis. Trois cas peuvent se présenter :

- ❖ Arc non localisé : l'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Ces arcs peuvent être dus soit à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un courant de fuite, comme ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur, (l'existence des pics sur la couche de pollution).
- ❖ Arc fixe : l'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de dépôt et de la surface propre d'isolateur est en série avec l'arc, elle limite ainsi le courant de l'arc et sa longueur. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra. Généralement ce type d'arcs entraîne par effet thermique une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.
- ❖ Contournement électrique : le phénomène de contournement des isolateurs pollués résulte de la combinaison de plusieurs paramètres.
  - dépôt d'une couche de matériaux solides (conductrice ou isolante).
  - humidification de ces dépôts.
  - existence d'une tension appliquée.

Le contournement des isolateurs pollués est accompli selon les phases suivantes:

Phase 1: un courant de fuite s'écoule a travers la couche électrolytique qui recouvre l'isolant, il provoque un échauffement de l'électrolyte, qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite courant.

Phase 2: l'échauffement croissant provoque un assèchement local de la couche polluante.

Phase 3: la tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer, élargissant ainsi la zone sèche.

Phase 4 : à partir de ce stade, l'arc s'allonge longitudinalement jusqu'à atteindre les électrodes est provoqué ainsi le contournement. L'existence de ces phases dépend de nombreux paramètres caractéristiques de l'isolateur pollué: tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, profil de l'isolateur, longueur de fuite...

### ***1.8. Conclusion :***

Avant toute réalisation de n'importe quel ouvrage de haute tension, une étude de détermination du degré de pollution du site concerné doit être nécessairement faite, afin de permettre le bon dimensionnement et le bon choix de l'isolation à utiliser. En effet, la détermination du degré de pollution par, entre autres, la méthode de la salinité équivalente du site par une expérimentation aussi longue que possible dans ce site, est recommandée pour les sites à pollution forte ou même très forte.

Plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont proposées. Nous citons par exemple le lavage manuel périodique des isolateurs lors de la diminution des précipitations pluviales, l'allongement de la ligne de fuite totale de la chaîne d'isolateurs en augmentant le nombre de ces derniers ...

*Chapitre II*

*Traitement des statistiques des  
incidents.*

### ***Introduction :***

Parmi les étapes permettant la résolution des problèmes dus à la pollution des isolateurs de haute tension il y a le traitement et l'analyse des incidents provoqués par cette pollution. Une analyse détaillée concernant les incidents survenus sur les lignes de transport d'énergie électrique nous permet d'identifier les sources et les causes principales de leur apparition.

Il s'agit particulièrement de trouver la saison et même la période du jour où le nombre de ces incidents est le plus élevé. Ainsi, sur la base de cette analyse, des propositions pourraient être faites pour diminuer et d'une façon appréciable, le nombre ces incidents [17].

Ce travail est réalisé en collaboration avec le CREDEG (Centre de Recherche et de Développement d'Electricité et de Gaz). En effet, le CREDEG a mis à notre disposition, les différentes données concernant les incidents survenus sur les lignes de 220 kV de la région étudiée, ainsi que les données climatologiques correspondantes.

La région électrique du centre Algérien que nous étudions englobe toutes les wilayas entre Alger et Djelfa d'une part, et celles se trouvant entre Tizi-Ouzou et Chélif d'autre part [21].

Ce premier travail concerne la région d'Alger c'est-à-dire du centre Algérien seule et représentera donc un « prototype » et une base de travail pour les autres régions. Nous nous sommes intéressés au traitement des incidents de types DR et DRD ayant eu lieu sur le réseau de transport d'énergie électrique (220 kV) de la région d'Alger durant trois années (2001, 2003 et 2004) disponibles à ce jour [19].

#### ***II.1. Sources de pollution :***

Les principales sources de pollution qui peuvent être rencontrées, séparément ou simultanément dans la région du centre, sont soit des sources naturelles (embruns marins pour les ouvrages installés en bordure de mer, sable pour les régions désertiques, poussières naturelles,...), soit des sources industrielles (fumées évacuées à proximité des cimenteries, des complexes sidérurgiques, des usines des produits chimiques, des centrales thermiques), soit encore la pollution domestique provenant des appareils de chauffage et les

fumées des véhicules. Par ailleurs, nous retrouvons également la pollution agricole due surtout aux engrais [16].

### ***II.1.1. Cimenteries :***

Différents composants néfastes au comportement des isolateurs de haute tension, sont contenus dans les fumées dégagées par les cimenteries. Nous pouvons citer en particulier les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), les composés organiques volatiles non méthaniques (COVNM), le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ). Notons qu'en plus des ces composants, des poussières de ces mêmes cimenteries se déposent également sur les isolateurs. Ceci est défini par un facteur d'émission (FE, poussière en kg/tonne de ciment) [16,20].

### ***II.1.2. Carrières et extraction de sable :***

Au cours de ces dernières années, les sablières se sont multipliées d'une manière anarchique, dans les zones côtières et sur les bassins versants et plus particulièrement, au niveau des nappes alluviales des principaux oueds côtiers [16,20].

### ***II.1.3. Unités de plâtre et de chaux :***

La plupart des plateries et unités de chaux sont équipées de filtres à manche ou de filtres électrostatiques. Cependant, comme dans le cas des cimenteries, les nombreux problèmes de maintenance font que les filtres sont très souvent en panne.

Les rejets sont essentiellement des poussières ou des gaz de combustion provenant des fours de calcination [16,20].

### ***II.1.4. Centrales de production électrique :***

La production d'électricité, qui est essentiellement d'origine thermique (98%), est produite dans les centrales thermiques à vapeurs et des groupements de turbines à gaz. Ces centrales thermiques sont réparties à travers l'ensemble du territoire. L'énergie

hydroélectrique représente moins de 1% de la production totale d'électricité et le diesel reste réservé aux localités du sud du pays.

Dans l'ensemble des centrales thermiques, la source d'énergie est le gaz naturel. Cette forme d'énergie limite considérablement les rejets atmosphériques. A l'exception des oxydes d'azote et dans une moindre mesure de l'oxyde de carbone dont les émissions sont relativement importantes, les rejets relatifs aux autres polluants (particules, SO<sub>2</sub>, COV) sont faibles.

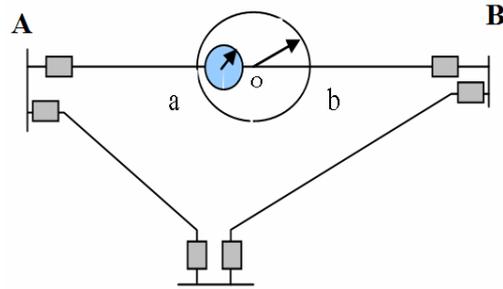
Avec la relance économique, l'Office National des Statistiques (ONS) a prévu le passage de cette production à une croissance annuelle de près de 10%. Ceci implique une augmentation correspondant à des émissions de polluants plus importante [20].

## ***II.2. Méthodes proposées pour l'analyse des incidents :***

Pour l'analyse des incidents survenus sur les lignes de 220 kV de transport d'énergie électrique de la région étudiée, nous proposons deux méthodes.

### ***II.2.1. Première méthode :***

Cette méthode se base sur le traitement et l'analyse des incidents DR (Déclenchement, Ré-enclenchement) et DRD (Déclenchement, Ré-enclenchement, Déclenchement), survenus sur les lignes haute tension de la région considérée. La période d'observation devrait intégrer les chroniques des incidents sur 5 années minimums. Pour chaque ligne issue d'un poste de transformation THT/HT ou de répartition THT/THT ou HT/HT et pour chaque saison, il y a lieu de repérer les défauts ayant eu lieu, en les situant sur la ligne par leurs distances "a" par rapport au poste A et "b" par rapport au poste B. Tracer le cercle de diamètre "ab" situé sur la ligne et il sera considéré comme zone polluée et de 1er degré par exemple. Les incidents ayant eu lieu seront situés obligatoirement dans le cercle de centre "O" formant selon leur densité des zones de 2ème, 3ème, ... degré. Ces zones sont également des cercles dont les diamètres sont différents à cause des dispersions dans le nombre des défauts (concentrations différentes) (**Fig. II.1**).



**Figure II.1** : Représentation des zones de pollution sur les lignes de haute tension.

Ce travail fait pour chacune des lignes ayant subi des DR et/ou DRD durant la saison ou l'année, est projeté ou plaqué à l'échelle sur une carte géographique qui représenterait les incidents sur le réseau électrique. Le degré de précision de cette carte est lié à la précision de l'échelle, de la localisation des défauts et de la bonne appréciation de la cause (contournement dû à la pollution par exemple) des DR et DRD.

La superposition des zones des quatre saisons donnerait un aperçu sur la migration de la pollution au courant de l'année.

La superposition des zones des cinq années donnerait également un aperçu sur la migration de la pollution avec plus de précision [17].

### ***II.2.2. Deuxième méthode :***

Nous voyons bien que cette méthode de travail que nous venons de présenter, nécessite un très bon schéma du réseau national de transport d'électricité national ainsi qu'une haute précision de localisation des lieux des incidents sur les lignes, ce qui n'est pas le cas pour le moment. En effet, nous manquons d'informations sur les incidents ayant eu lieu sur le réseau, particulièrement leur localisation exacte. Le même constat est fait concernant les sources de pollution des différentes régions.

Les autres types d'incidents autres que les DR ou les DRD sont dus à des problèmes techniques comme les surcharges des réseaux, défauts de synchronisation et la destruction d'un disjoncteur ou d'un transformateur. Donc, tous les incidents DR et/ou DRD identifiés comme incidents dus à la pollution sont comptabilisés, les autres n'étant pas pris en considération. Par ailleurs, si on ne trouve pas d'information sur la cause d'un incident, on le

considère par défaut, comme du à la pollution, cela revient, par précaution, à considérer un cas critique.

Après avoir comptabilisé le nombre d'incidents survenus sur la ligne considérée durant une année, nous pouvons déduire la densité d'incidents correspondante en divisant le nombre d'incidents sur la longueur de la ligne. Nous définissons ainsi pour les différentes lignes 220 kV, une densité d'incidents par unité de longueur. La ligne qui présente la densité la plus élevée sera considérée comme celle se trouvant dans la région la plus polluée.

### ***II.3. Zones de la région du centre Algérien :***

La région du centre Algérien est représentée par vingt et une zones par lesquelles passent les lignes de transport d'énergie électrique de 220 kV.

Ces zones sont : ALE (Alger est (Boudouaou)), ARB (Arbaa), BRA (Bouira), KOB (Kouba), OFA (Ouled Fayet), RDJ (Cap Djinet), TIO (Tizi Ouzou), BMR (Bni mared), KHE (Khemis Miliana), BER (Berrouaguia), DJE (Djelfa), DAR (Darguina), MSP (M'sila Post), EKS (Ekseur), HAP (Hamma Post), OUS (Oued Sly) et KRB (Kharba) (**Tab. II.1**) (**Fig. II.2**) [16, 21].

Lignes	les zones	Longueurs (km)
ALE-ARB	Alger est (Boudouaou)-Arbaa	58.02
ALE-BRA	Alger est (Boudouaou)-Bouira	78.47
ALE-KOB	Alger est (Boudouaou)-Kouba	70
ALE-OFA	Alger est (Boudouaou)-Ouled Fayet	100
ALE-RDJ	Alger est (Boudouaou)-Cap Djinet	146.34
ALE-TIO	Alger est (Boudouaou)-Tizi Ouzou	78.72
ARB-BMR	Arbaa-Bni Mared	37.05
ARB-KHE	Arbaa-Khemis Miliana	95.72
BER-BRA	Berrouaguia-bouira	98.5
BER-DJE	Berrouaguia-Djelfa	180
BER-KHE	Berrouaguia-Khemis Miliana	65
BRA-DAR	Bouira-Darguina	144.93
BRA-MSP	Bouira-M'Sila	115

DJE-MSP	Djelfa-M'Sila	180
EKS-TIO	Ekseur- Tizi Ouzou	72.93
HAP-KOB	Hamma-Kouba	4
KHE-BMR	Khemis Miliana-Bni mared	75.51
KHE-KHR	Khemis Miliana-Kherba	35.8
KHE-OUS	Khemis Miliana-Oued Sly	199
KRB-OUS	Kherba-Oued Sly	67.37
OFA-BMR	Ouled Fayet-Bni Mared	30.82

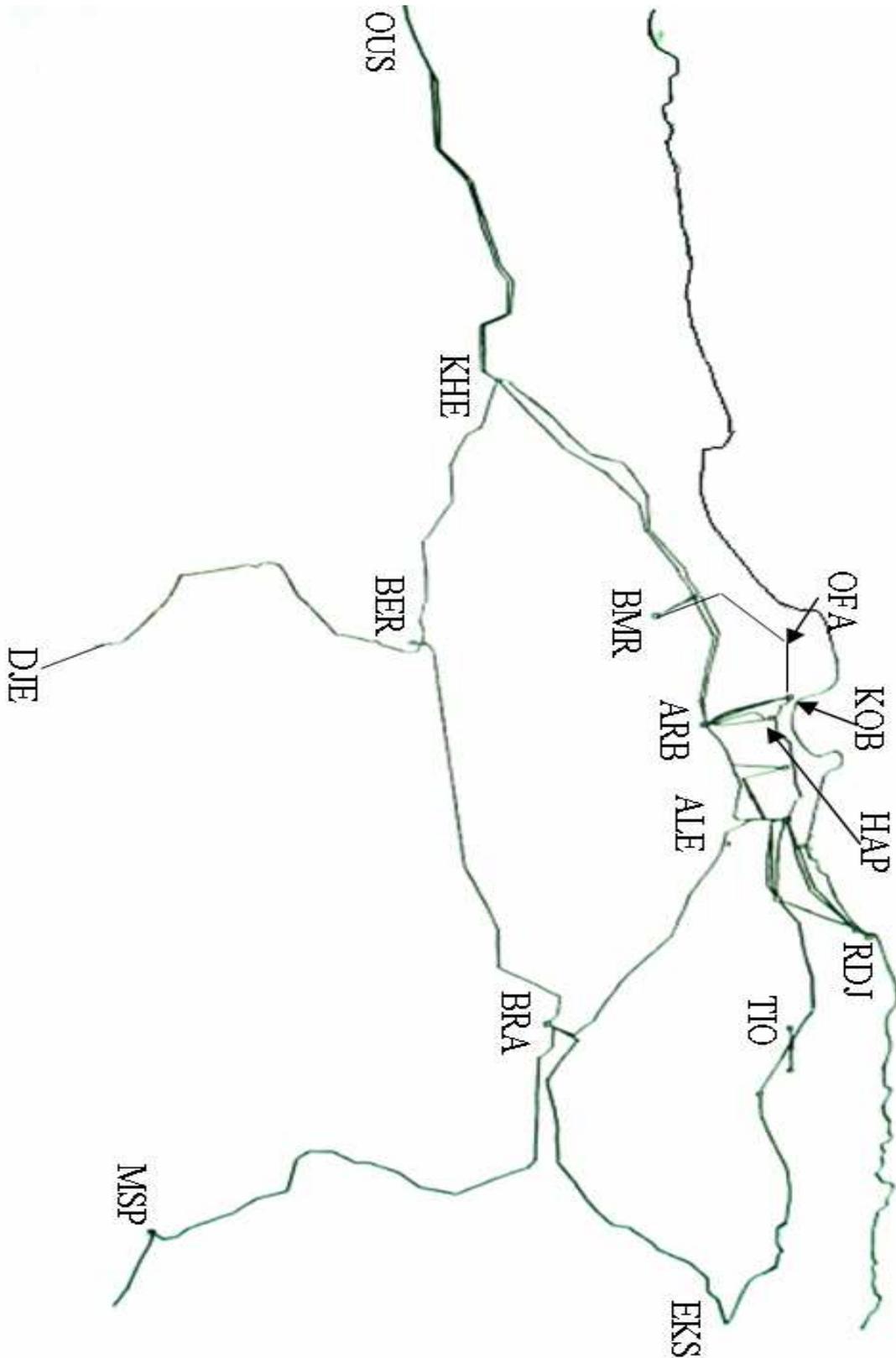
**Tableau II.1** : Zones à étudier dans la région du centre Algérien.

#### ***II.4. Localisation des zones les plus polluées :***

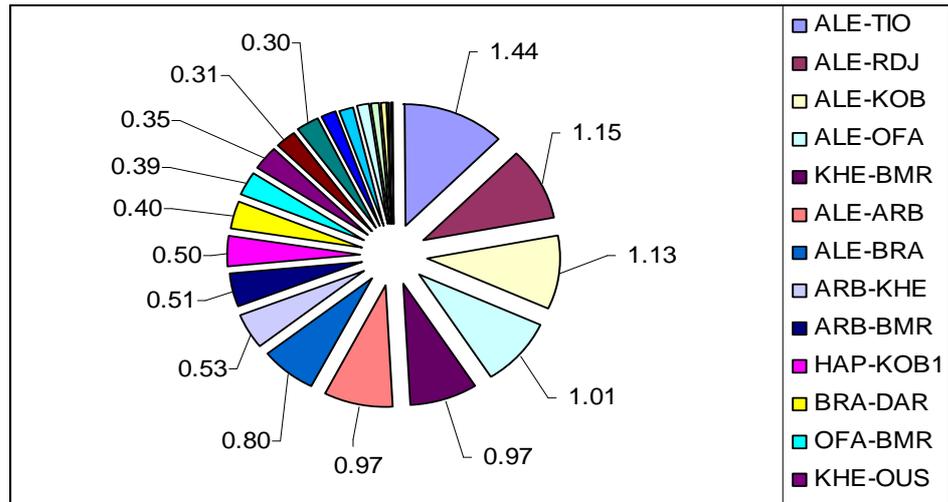
En utilisant la deuxième méthode proposée concernant la densité moyenne des incidents par ligne, nous définissons la zone la plus polluée de la région électrique du centre Algérien.

D'après la figure II.3, nous constatons que les zones Boudouaou-Tizi Ouzou (ALE-TIO), Boudouaou-Cap Djinet (ALE-RDJ), Boudouaou-Kouba (ALE-KOB), Boudouaou-Ouled Fayet (ALE-OFA), Khemis Miliana-Bni mared (KHE-BMR), Alger est (Boudouaou)-Arbaa (ALE-ARB) et Alger est (Boudouaou)-Bouira (ALE-BRA) sont les plus touchées par les incidents, donc les plus polluées (**Fig. II.3**) [21].

La ligne 220 kV ALE-TIO se trouve relativement proche de la mer (environ à 15 km) et de la route nationale N° 12. La ligne ALE-RDJ se trouve en bord de mer (le point le plus lointain se trouve approximativement à 5 km), d'où l'influence d'une part des embruns marins et d'autre part, de la proximité de la route nationale N°24. Le même constat peut être fait pour les lignes ALE-KOB, ALE-OFA, ALE-ARB et ALE-BRA car elles partent toutes d'Alger vers des directions différentes, où il y a l'influence néfaste de la mer d'une part, et d'autre part des activités industrielles importantes dans cette zone ainsi que de la circulation notable des automobiles. En effet, une portion importante de la zone KHE-BMR est relativement proche de la mer (environ 10 km). Ces lignes sont donc exposées à une pollution mixte qui est en fait la plus nocive.



**Figure II.2 :** Carte du réseau de 220 kV de la région électrique du centre Algérien.



**Figure II.3 :** Représentation des densités moyennes d'incidents pour chaque zone durant les trois années.

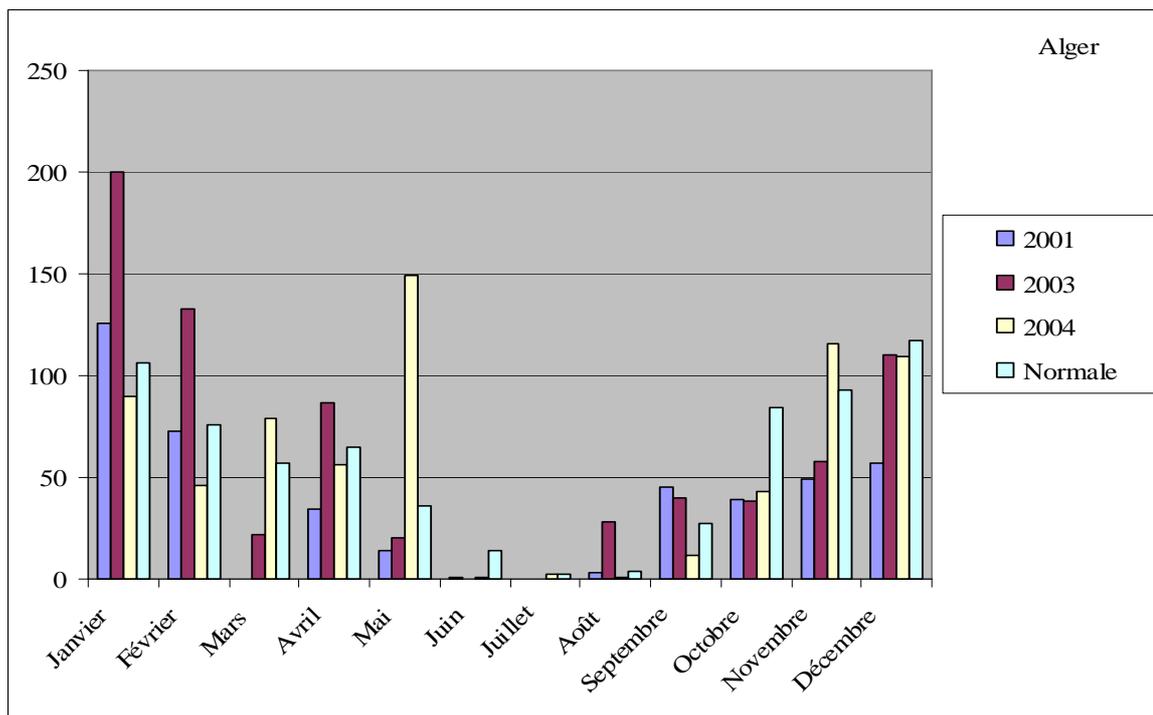
### ***II.5. Traitements des données climatologiques :***

Parmi les paramètres importants qui influent sur la pollution des isolateurs des lignes de haute tension, il y a les conditions atmosphériques (vents, température, pluie...). En effet, nous allons nous intéresser dans cette partie que des précipitations pluviales, de la température ainsi que l'évaporation (**Annexe I**).

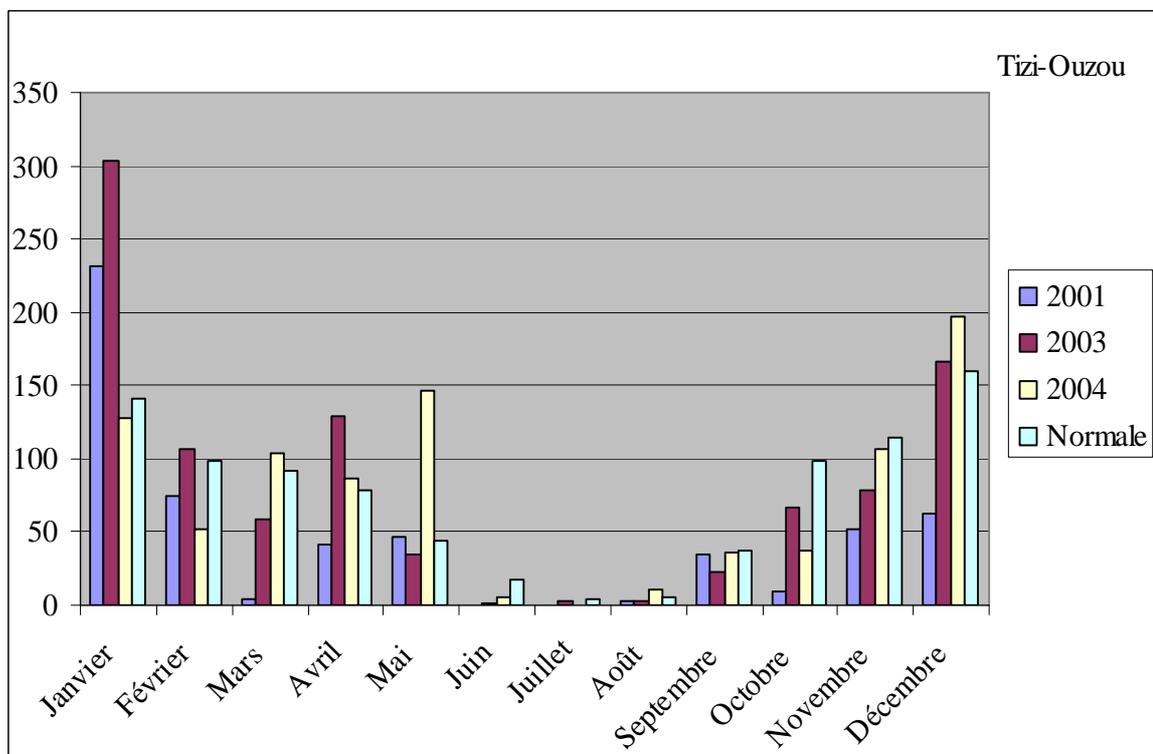
Nous avons représenté les données climatologiques des zones les plus polluées c'est-à-dire Alger et Tizi-Ouzou d'une part, et d'autre part Chélif et Médéa, et ce pour les trois années (2001, 2003 et 2004). Et pour avoir une idée sur les conditions climatologiques de toute la région du centre Algérien, nous présentons pour chaque année (2001, 2003 et 2004), des courbes moyennes de ces quatre zones.

#### ***II.5.1. Précipitations pluviales :***

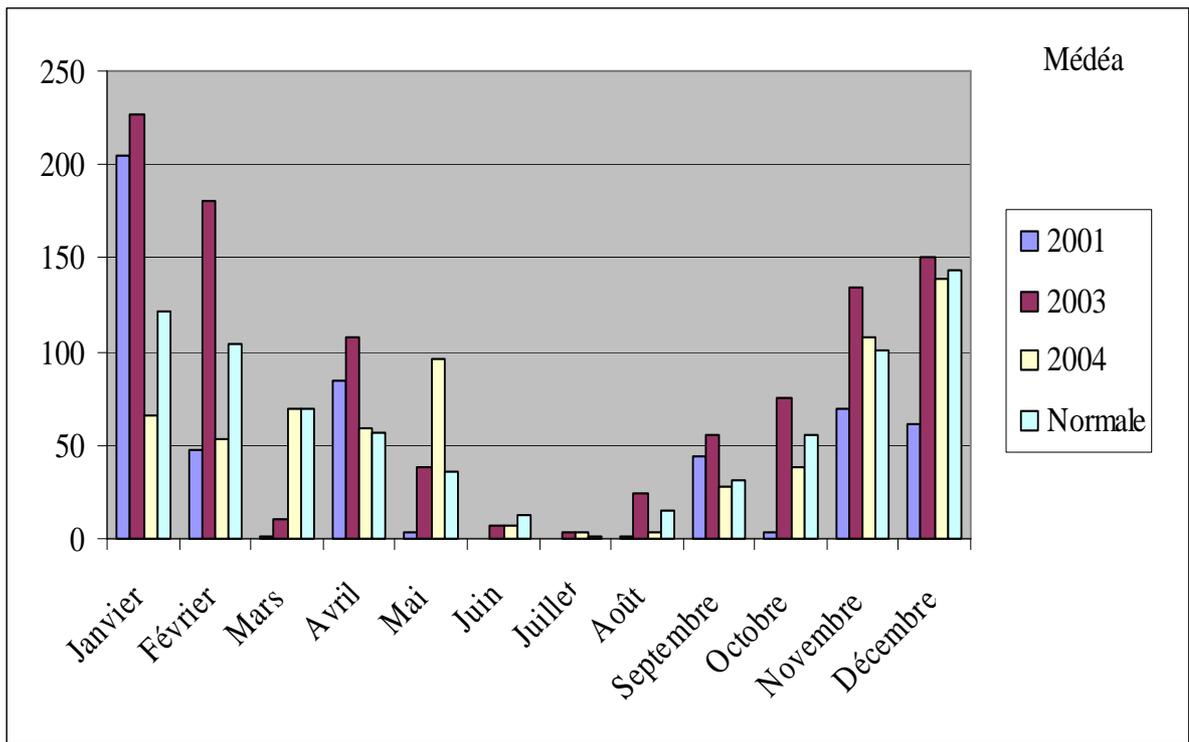
Nous signalons que les années qui ont précédé l'année 2001, ont été des années de sécheresse et une bonne partie de cette année (Mars, Avril et l'été), durant l'année 2003 il y a eu des précipitations pluviales importantes pendant quelques mois qui ont dépassé la normale mensuelle. Ce qui est remarquable pour l'année 2004, c'est les précipitations pluviales intéressantes pendant le mois de mai (**Fig. II.4 à Fig. II.8**) [18].



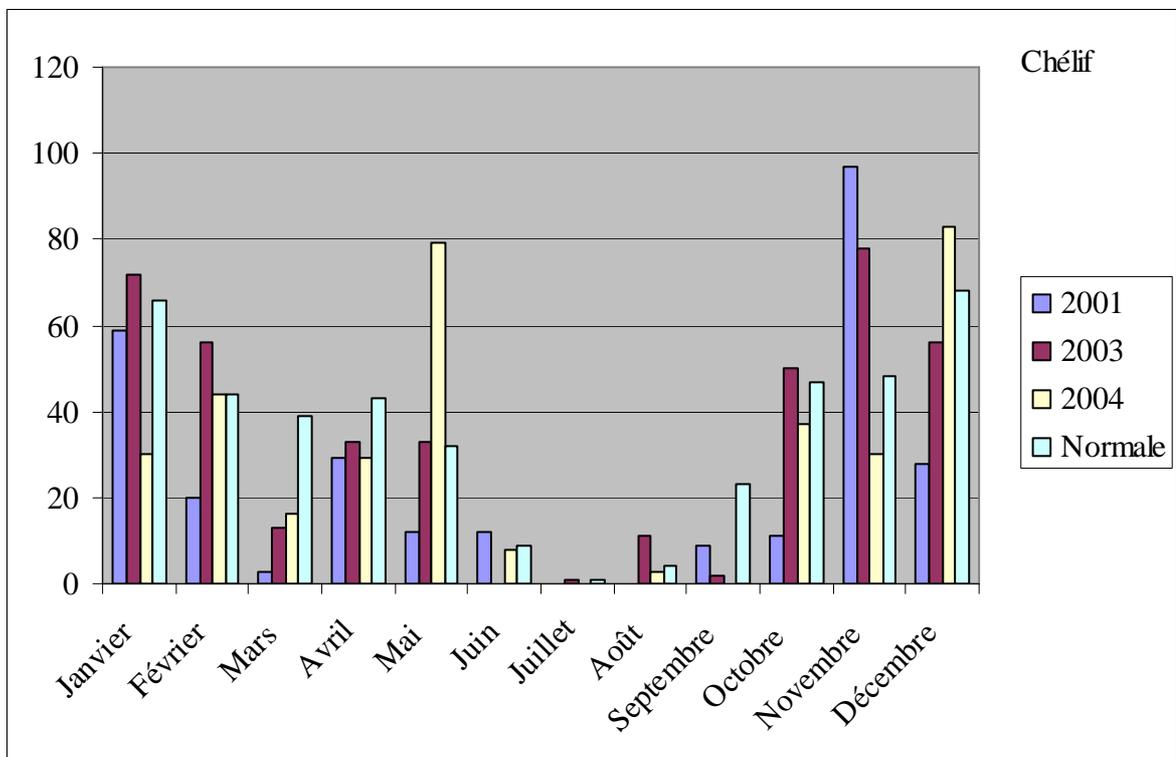
**Figure II.4 :** Précipitations pluviales à Alger durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



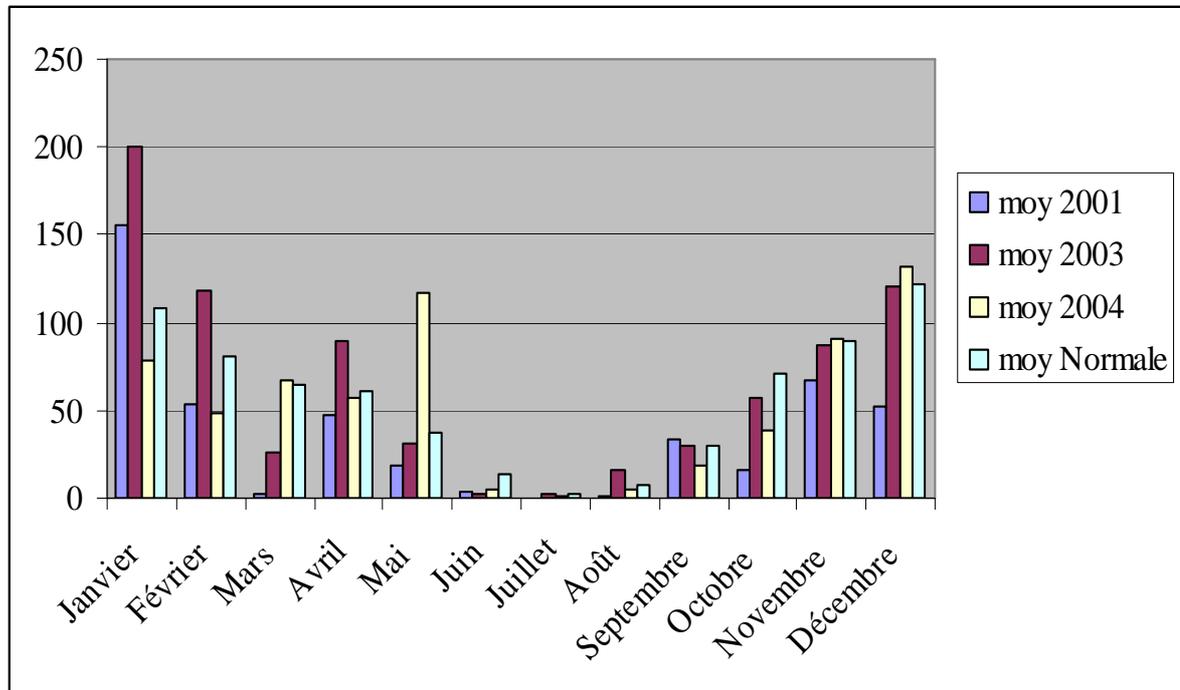
**Figure II.5 :** Précipitations pluviales à Tizi-Ouzou durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



**Figure II.6** : Précipitations pluviales à Médéa durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



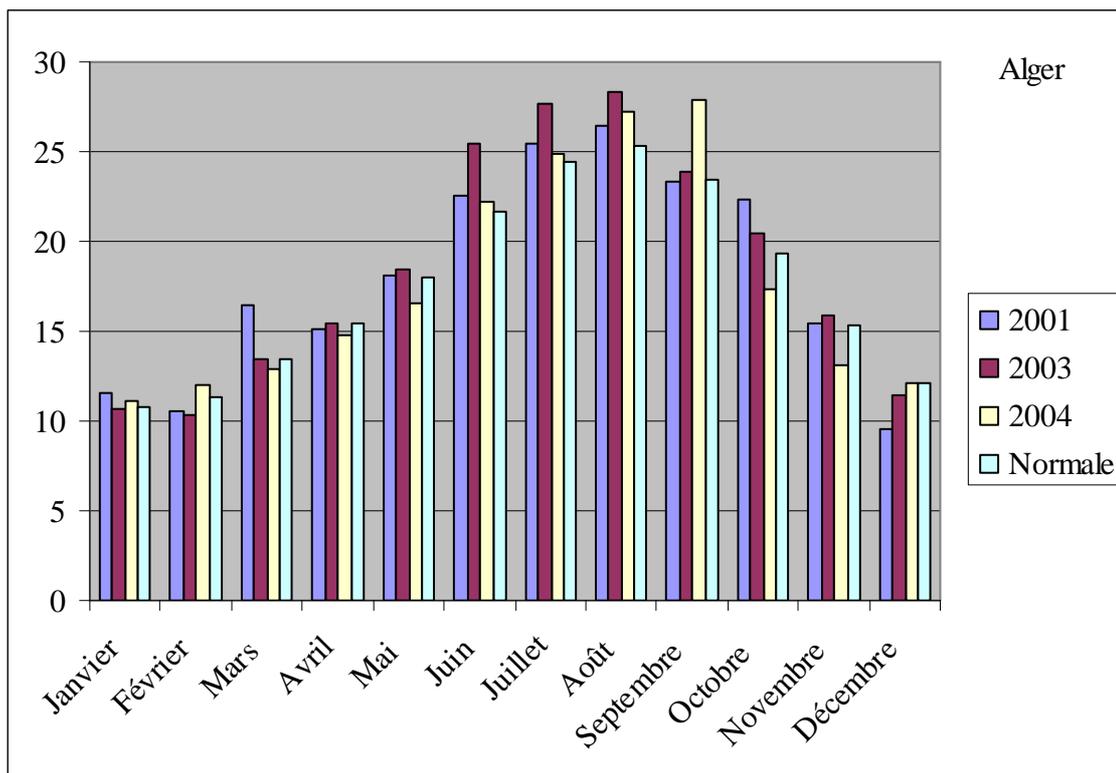
**Figure II.7** : Précipitations pluviales à Chélif durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



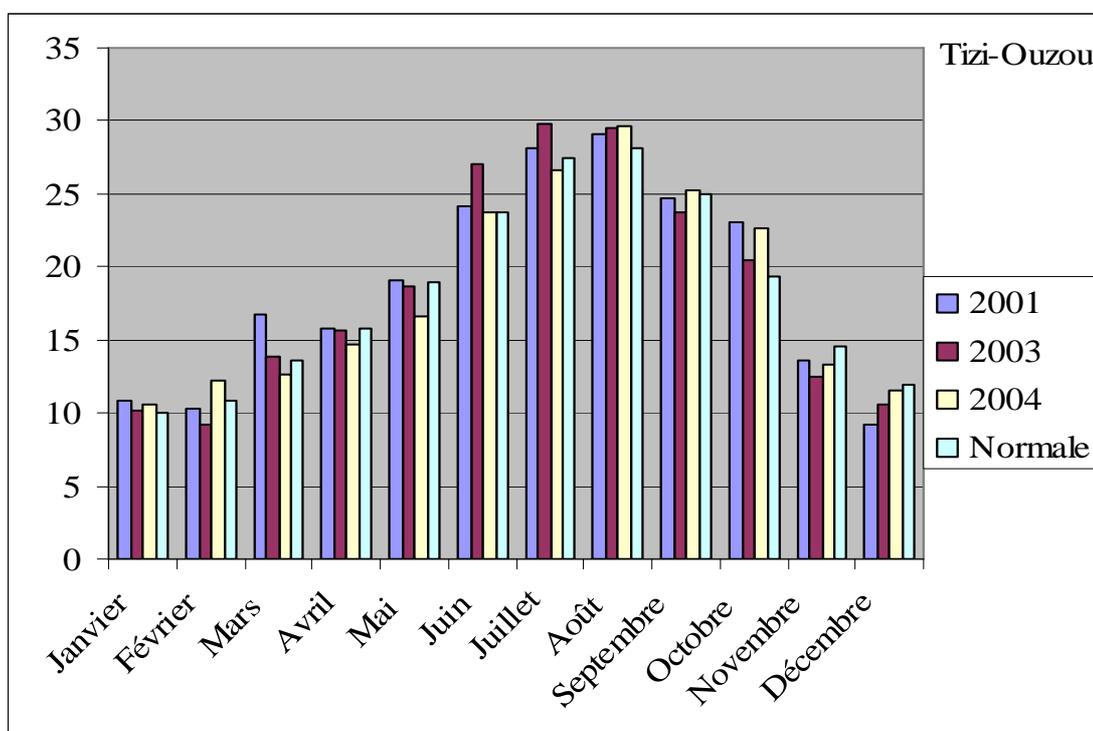
**Figure II.8 :** Précipitations pluviales moyennes pour la région centre Algérien durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.

### **II.5.2. Température :**

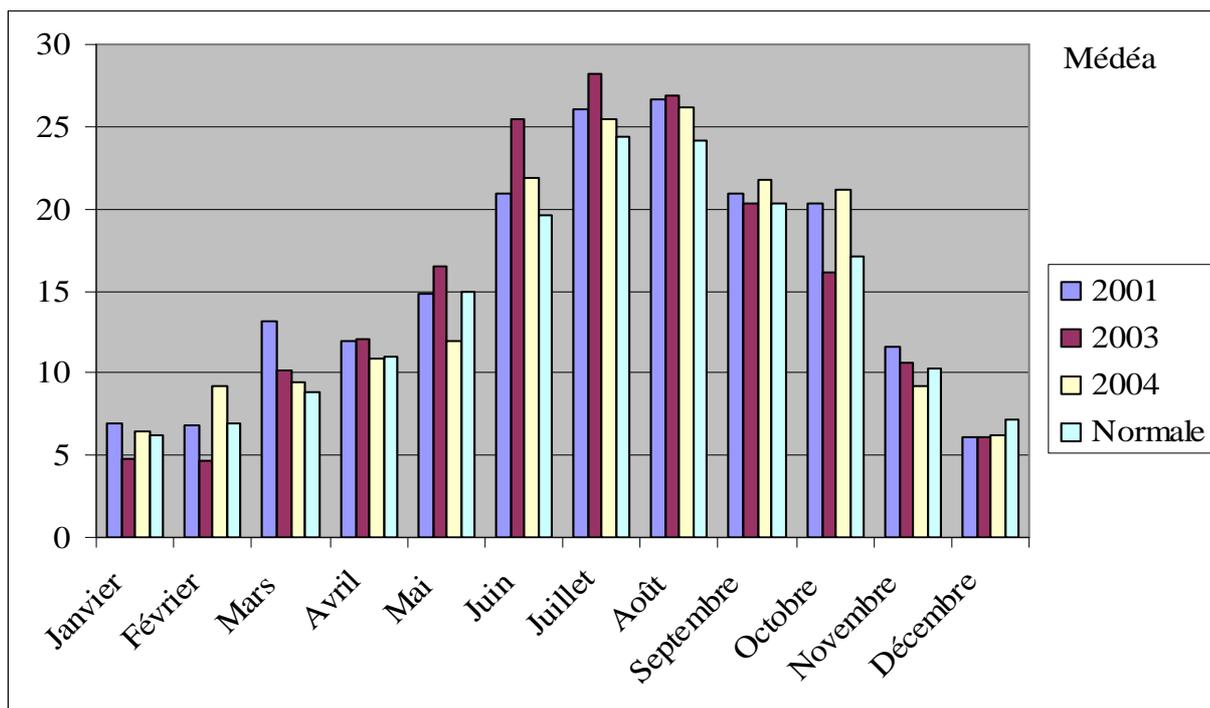
On constate qu'il y a une grande différence de température mensuelle moyenne entre les mois des différentes saisons, avec un écart qui peut atteindre 20°C (entre janvier et août). Cette différence de température influe directement sur l'humidité de l'air ainsi que sur l'évaporation, ces derniers facteurs agissent notablement sur le comportement des isolateurs de haute tension. Cet écart n'est par contre pas important ( $\leq 5^\circ\text{C}$ ) entre les températures mensuelles moyennes de chaque une des années 2001, 2003 et 2004 pour chaque zone. Même chose pour la moyenne pour toute la région du centre Algérien (**Fig. II.9 à Fig. II.13**) [18].



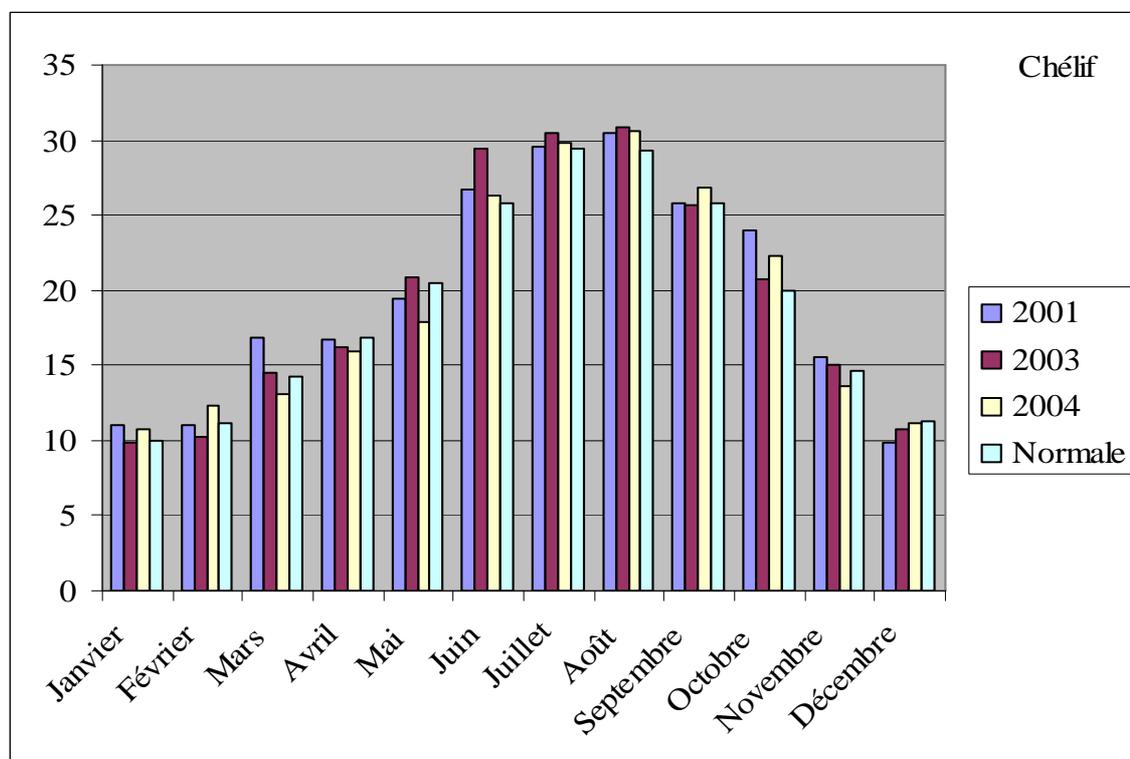
**Figure II.9 :** Température mensuelle moyenne à Alger durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



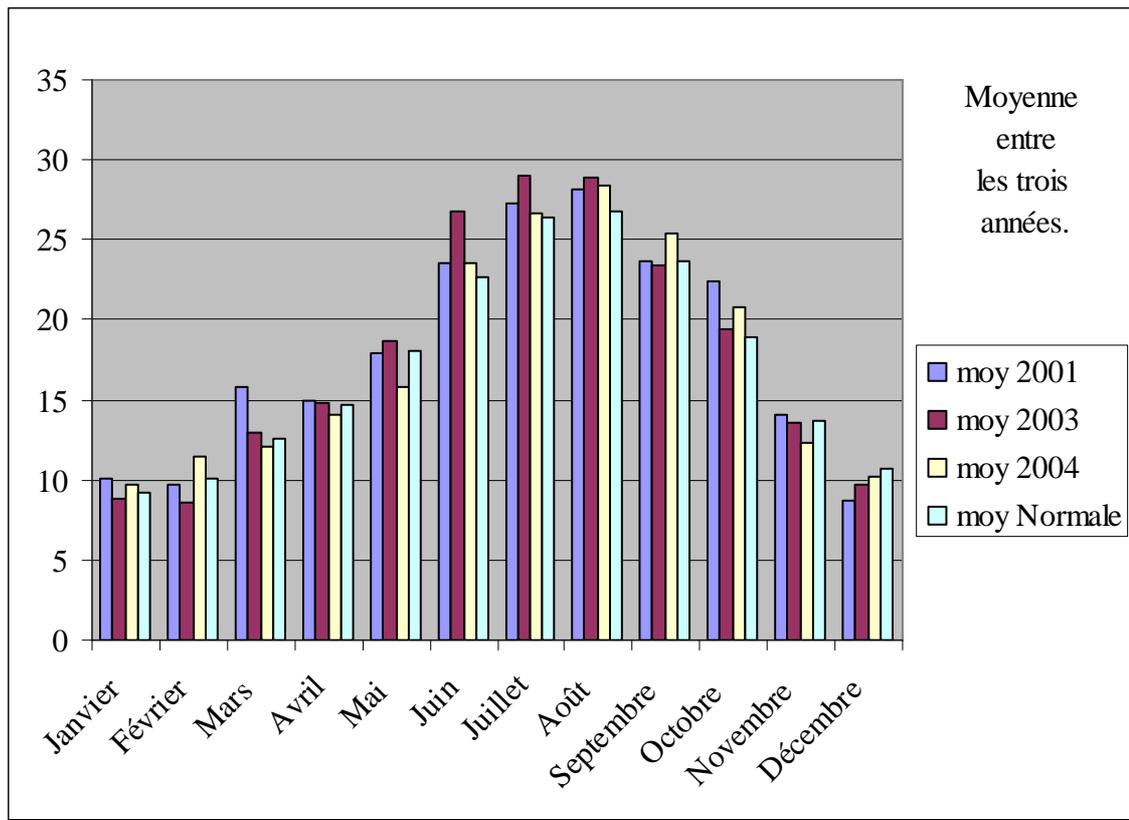
**Figure II.10 :** Température mensuelle moyenne à Tizi-Ouzou durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



**Figure II.11 :** Température mensuelle moyenne à Médéa durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



**Figure II.12 :** Température mensuelle moyenne à Chélif durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.



**Figure II.13 :** Température mensuelle moyenne pour toute la région du centre Algérien durant 2001, 2003 et 2004 ainsi que la normale mensuelle.

### ***II.5.3. Insolation et évaporation :***

Pendant l'été, l'insolation (la durée d'exposition au soleil) est très importante. À titre d'exemple, l'insolation durant le mois de juillet de l'année 2001 à Alger a été de 343 heures, à Médéa de 345 heures et à Tizi-Ouzou de 323 heures. Contrairement à l'été, pendant l'hiver l'insolation diminue énormément par rapport à l'été, par exemple à Alger l'insolation a été de 161 heures durant le mois de décembre (182 heures d'écart par rapport à juillet du même année), à Médéa de 124 heures durant le mois de janvier (221 heures d'écart par rapport à juillet de la même année) et à Tizi-Ouzou de 146 heures durant le mois de janvier (d'écart de 177 heures par rapport à juillet de la même année).

Il y a une relation directe entre l'insolation et l'existence des surfaces d'eau exposées au soleil et l'évaporation. Lorsqu'il y a de grandes quantités d'eau exposées à une insolation importante, l'évaporation sera importante et l'inverse et juste. Si l'évaporation augmente, l'humidité augmente. Pour cette raison l'humidité en été est très importante et elle influe sur les polluants qui se posent sur les surfaces des isolateurs de haute tension [18].

## ***II.6. Statistiques des incidents :***

Dans cette partie de notre travail, nous nous basons sur les rapports d'incidents des années 2001, 2003 et 2004 fournis par le CREDEG. En effet, les informations relatives aux incidents durant ces trois années sont complètes [19] (**Annexe II**).

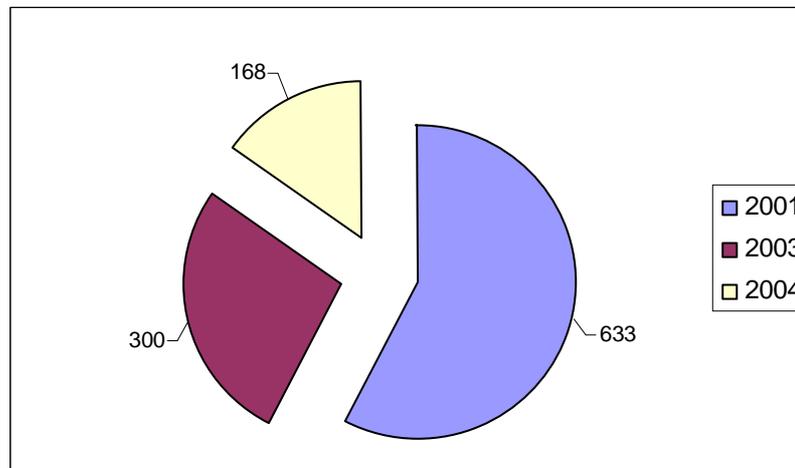
Tous les incidents que nous présentons sont supposés dûs à la pollution, d'après les rapports SONELGAZ. Nous présenterons les taux d'incidents pour chaque année. Nous donnerons des interprétations concernant aussi bien la distribution des incidents durant la journée (des plages d'horaires) que durant l'année (pour chaque saison).

Par ailleurs, comme nous l'avons expliqué auparavant, nous utiliserons la deuxième méthode concernant la densité des incidents afin de définir la zone la plus polluée.

### ***II.6.1. Incidents durant les trois années :***

La figure II.14 représente le nombre d'incidents, survenus pendant les trois années considérées. Nous remarquons que le nombre le plus important des incidents a eu lieu durant l'année 2001 (633 incidents).

D'après les données météorologiques dont nous disposons, nous savons que durant l'année 2001 les précipitations pluviales ont été peu importantes par rapport à la normale d'une part, et d'autre part les années avant 2001 ont été des années de sécheresse. De ce fait, le phénomène d'auto-nettoyage des isolateurs a été pratiquement inexistant. Par conséquent, les dépôts polluants ont dû être importants et ainsi, en présence de l'humidité très élevée durant cette même année, les incidents se sont multipliés, d'où l'importance du nombre d'incidents durant cette année 2001. Ceci n'est pas le cas pour les deux autres années 2003 et 2004 où les précipitations pluviales (surtout durant l'année 2004) ont été beaucoup plus importantes.



**Figure II.14** : Nombre d'incidents par année.

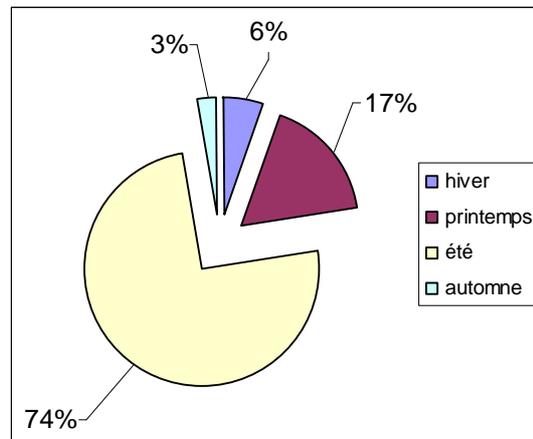
## ***II.6.2. Analyse des incidents :***

Nous présentons dans ce qui suit la répartition des incidents par saison pour chaque année ainsi que leurs répartitions horaires pour chaque saison considérée.

### ***II.6.2.1. Année 2001 :***

#### ***II.6.2.1.1. Répartition des incidents par saison :***

L'année 2001 a été une année de sécheresse. L'accumulation de dépôts polluants sur les surfaces des isolateurs a été très importante du fait du manque des précipitations pluviales. Durant l'été, le phénomène de l'humidification des dépôts polluants est tellement important (écart de température entre le jour et la nuit, phénomène de condensation...) qu'il y a risque de contournement des chaînes d'isolateurs. Ceci explique le grand nombre d'incidents survenus pendant l'été de cette année (**Fig. III.15**).

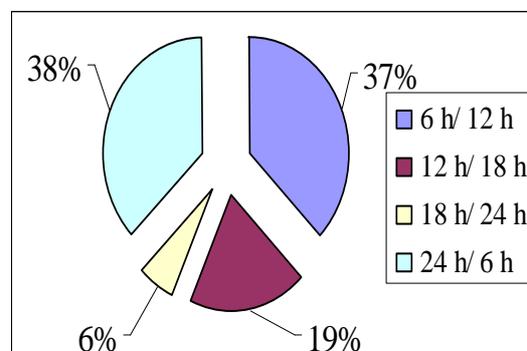


**Figure II.15** : Répartition des incidents de l'année 2001 par saison.

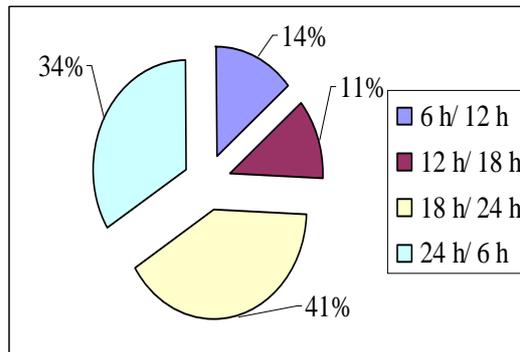
#### ***II.6.2.1.2. Répartition horaire des incidents pour chaque saison :***

Les phénomènes de condensation ont lieu surtout le matin juste avant et après le levé du soleil (brouillard, rosée...). Ceci explique donc le grand nombre d'incidents entre 00h et 6 h en été (levé du soleil aux environs de 5h) et en automne où le levé du soleil s'effectue entre 6 h et 7 h 50 mn, nous constatons que le plus grand nombre d'incidents a lieu entre 00 h et 6 h mais aussi entre 6 h et 12 h (**Fig. III.16** à **Fig. III.19**).

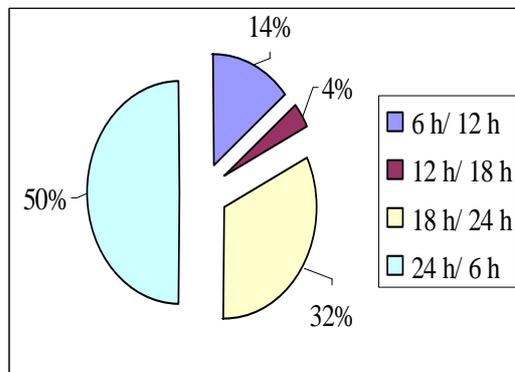
En hiver, un grand nombre d'incidents est observé entre 18 h et 00 h (coucher du soleil aux environ de 18 h) mais aussi entre 00 h et 6 h.



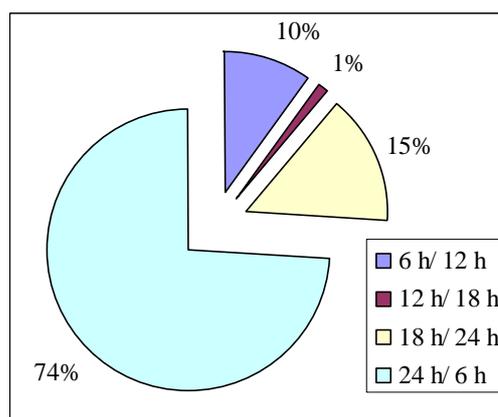
**Figure II.16** : Répartition horaire des incidents en automne.



**Figure II.17** : Répartition horaire des incidents en hiver.



**Figure II.18** : Répartition horaire des incidents au printemps.

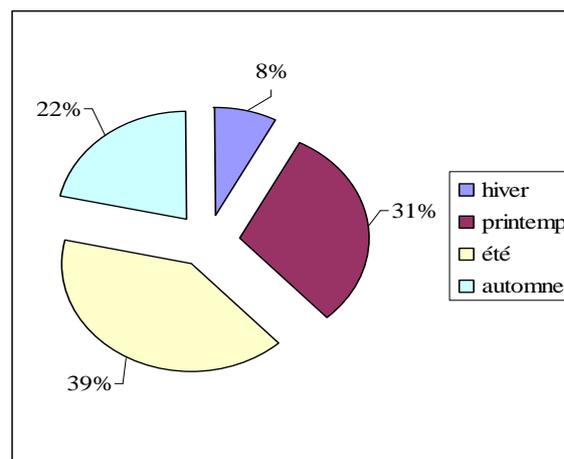


**Figure II.19** : Répartition horaire des incidents en été.

### II.6.2.2. Année 2003 :

#### II.6.2.2.1 Répartition des incidents par saison :

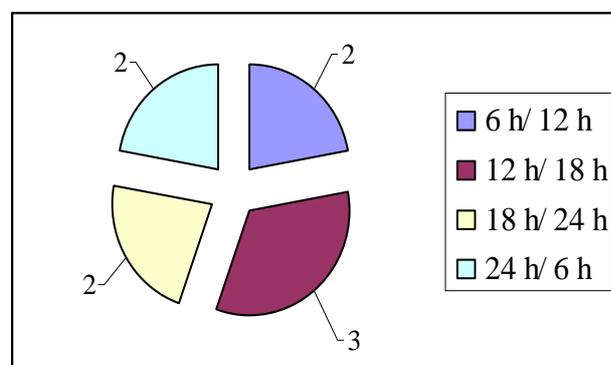
Le plus grand nombre d'incidents a eu lieu toujours en été, néanmoins moins important que durant l'année 2003, à cause des précipitations pluviales relativement plus importantes (**Fig. III.20**).



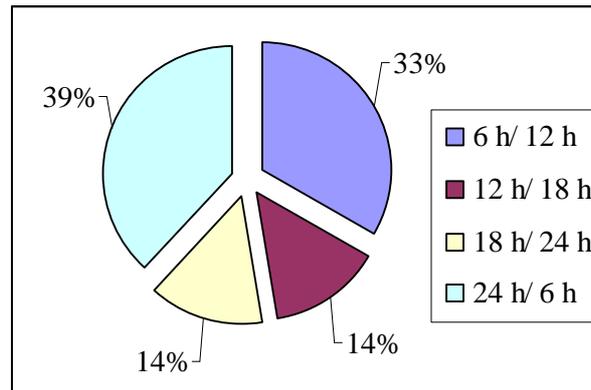
**Figure II.20** : Répartition des incidents de l'année 2003 par saison.

#### II.6.2.2.2. Répartition horaire des incidents pour chaque saison :

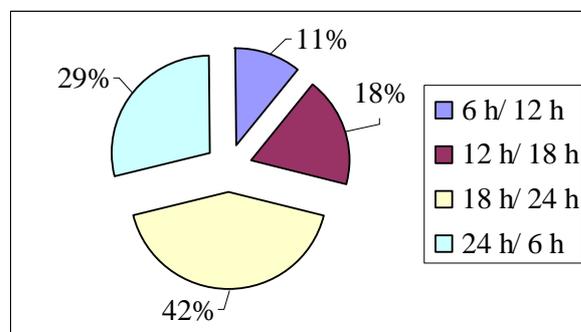
Concernant les trois saisons hiver, printemps et l'été, les mêmes interprétations que l'année 2001 peuvent être faites pour l'année 2003. Cependant, pour l'automne où il n'y a eu que 9 incidents, on ne peut apporter d'interprétations (**Fig. III.21 à Fig. III.24**).



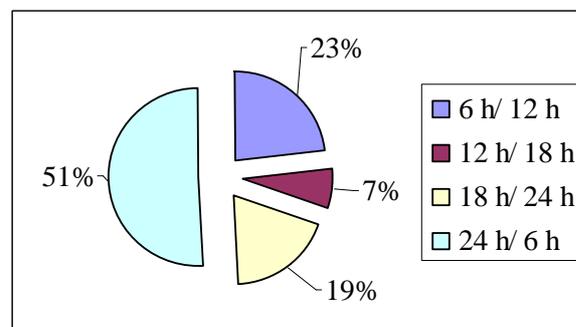
**Figure II.21** : Répartition horaire des incidents en automne.



**Figure II.22** : Répartition horaire des incidents en hiver.



**Figure II.23** : Répartition horaire des incidents au printemps.



**Figure II.24** : Répartition horaire des incidents en été.

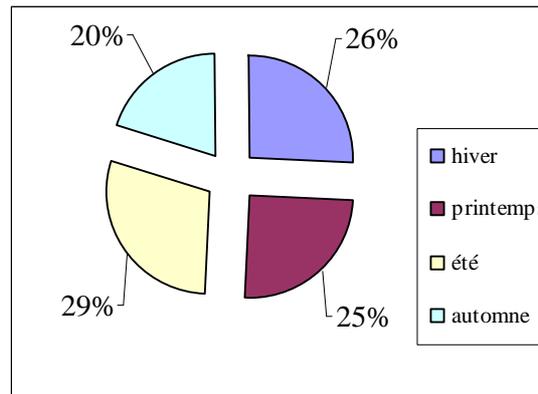
### **II.6.2.3. Année 2004 :**

#### **II.6.2.3.1 Répartition des incidents par saison :**

Durant cette année aussi, le plus grand nombre d'incidents a eu lieu en été, comme pour les autres années. Néanmoins, pour cette année, le nombre d'incidents en été a

fortement diminué. Le mois de mai de l'année 2004 a été exceptionnel en terme de précipitations pluviales (**Fig. III.25**).

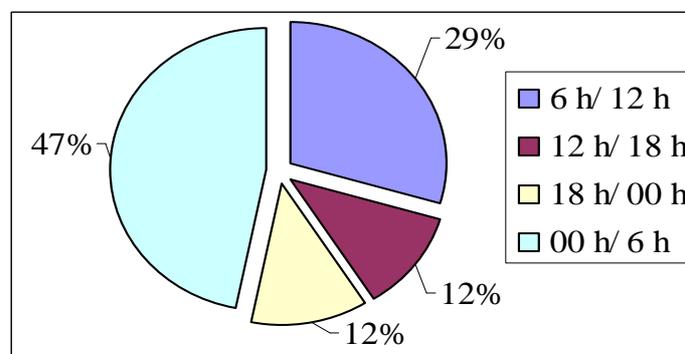
En effet, des quantités très importantes de pluie ont eu lieu pendant ce mois. Il y a eu 145 mm à Alger (un écart par rapport à la normale de 113 mm), et 146 mm à Tizi-Ouzou (un écart de 102 mm par rapport à la normale). Ces précipitations pluviales ont naturellement assuré le lavage de isolateurs, ce qui a réduit considérablement les incidents pendant l'été.



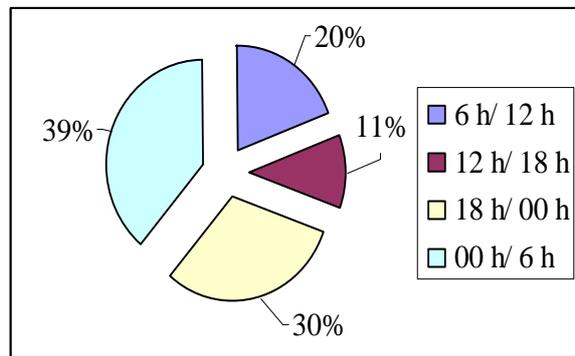
**Figure II.25** : Répartition des incidents de l'année 2004 par saison.

#### **II.6.2.3.2. Répartition horaire des incidents pour chaque saison :**

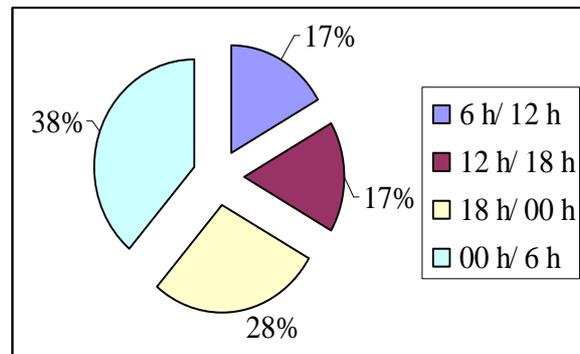
Concernant les répartitions horaires des incidents pour cette année 2004, les mêmes observations et interprétations peuvent être faites que pour l'année 2001 (**Fig. III.26** à **Fig. III.29**).



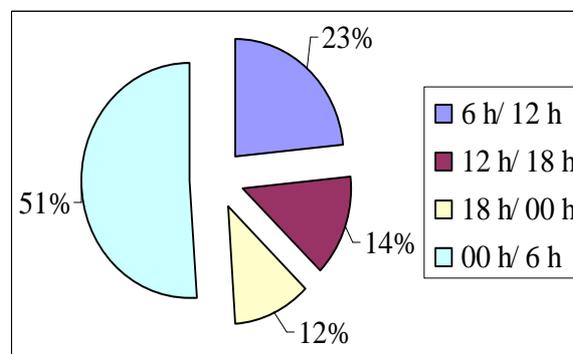
**Figure II.26** : Répartition horaire des incidents à l'automne.



**Figure II.27 :** Répartition horaire des incidents en hiver.



**Figure II.28 :** Répartition horaire des incidents au printemps.



**Figure II.29 :** Répartition horaire des incidents en été.

***II.7. Conclusion :***

L'amélioration du rendement des lignes de transport d'électricité et la minimisation jusqu'à l'élimination des contournements des isolateurs dûs à la pollution, dépendent du bon choix du profil de l'isolateur à utiliser, du bon dimensionnement de la chaîne l'isolateurs (nombre adéquat sur une chaîne), en tenant compte des conditions climatiques, des puissances transitées a travers les lignes et de la sévérité de la pollution du site.

En général, d'après les résultats que nous obtenons dans cette partie de notre travail, un lavage des isolateurs vers le mois de mai de chaque année et préconisé afin de réduire considérablement le nombre d'incidents.

## *Chapitre III*

*Partie expérimentale.*

### ***Introduction:***

Afin d'étudier l'influence de l'état de surface et le type de la pollution des isolateurs de haute tension sur le comportement des ces derniers, nous effectuons des essais au laboratoire sur des isolateurs des lignes de haute tension 220 kV pollués sur site. Cela peut aider à faire de bons choix des profils des isolateurs à utiliser dans les régions polluées et même d'évaluer le nombre d'isolateurs à installer dans les chaînes d'isolateurs.

Les essais effectués au laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, concernent les tensions de contournements des isolateurs de haute tension pollués sur site et qui ont été en service dans la région du centre Algérien.

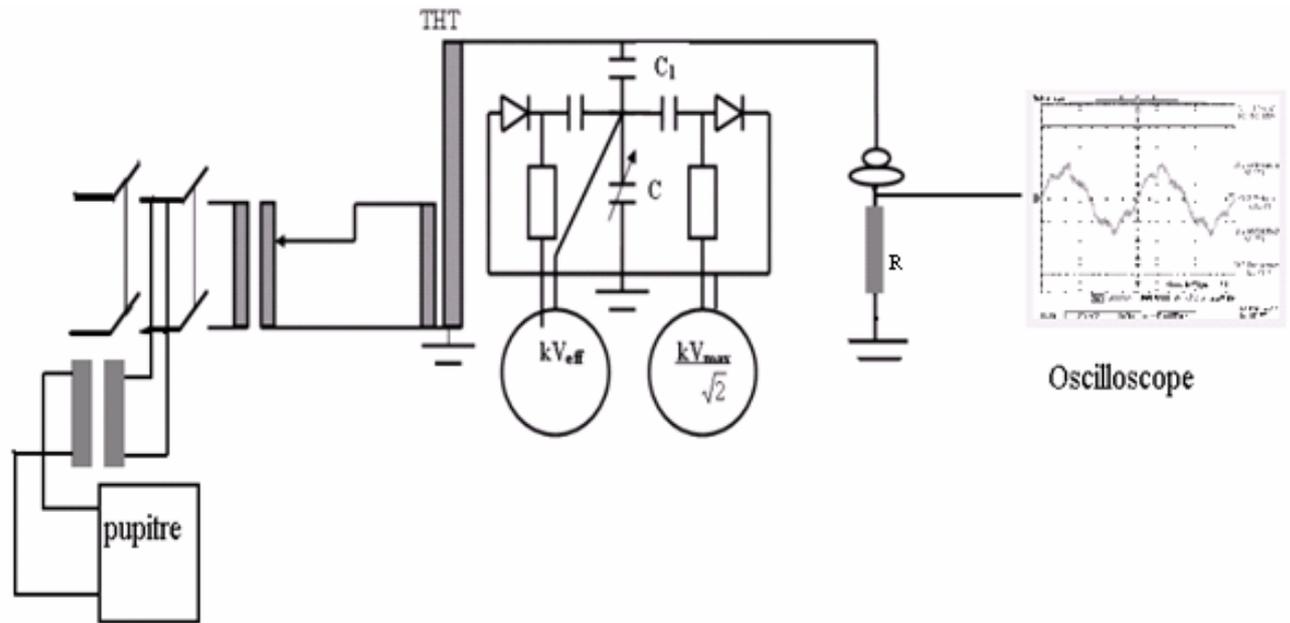
En outre, ces essais concernent un paramètre très intéressant qui peut nous donner des nombreuses informations concernant l'état de la pollution de l'isolateur, ainsi que le degré de pollution du site d'où les isolateurs ont été enlevés ainsi que sur les profils des isolateurs. Ce paramètre est le courant de fuite.

### ***III.1. Dispositif expérimental :***

#### ***III.1.1. Circuit d'essais au laboratoire de l'ENP :***

La station d'essai à fréquence industrielle du laboratoire de l'Ecole Nationale Polytechnique est de marque " HAEFELY ". Cette station contient les équipements suivants.

- Un transformateur d'essai : 500V/300 kV, 50 kVA.
- Un transformateur de réglage 220/ (0 à 500) V, 50 kVA.
- Un diviseur capacitif de tension  $C1=400$  pF.
- Un pupitre de commande.
- Des appareils annexes de mesure et de protection.
- Un oscilloscope numérique de fréquence d'échantillonnage de 500 MHz " TEKTRONIX". (Fig. III.1).



**Figure III.1 :** Circuit d'essais.

### **III.1.2. Objets d'essais :**

Les essais sont effectués sur des isolateurs de haute tension pollués sur site. Ces isolateurs ont été enlevés des lignes 220 kV de deux zones de la région du centre Algérien. Ils sont de différents profils (standard, antibrouillard et sphérique). Les isolateurs à profil standard ont été enlevés du pylône N° 91 de la ligne de haute tension 220 kV Alger Est – Cap Djinet (ALE-RDJ) (**Fig. III.2**). Les isolateurs à profil antibrouillard de forme B ont été prélevés du pylône N° 82 de la ligne de haute tension 220 kV l'Arbaa-Khemis Miliana (ARB-KHE) (**Fig. III.3**), ainsi que les isolateurs à profil sphérique qui ont été enlevés du pylône N° 78 de la même ligne (**Fig. III.4**). Ils étaient utilisés en position horizontale.



**Figure III.2 :** Isolateur à profil standard.



**Figure III.3 :** Isolateur à profil antibrouillard de forme B.



### ***III.2. Caractéristiques géométriques des isolateurs :***

À l'aide d'un mètre ruban adhésif et inextensible gradué en millimètres et un pied à coulisse, nous avons mesuré les caractéristiques géométriques des trois types d'isolateurs (**Tab. III.1**). Il s'agit de la longueur de la ligne de fuite, le diamètre de la jupe, la profondeur maximale de chaque nervure, la longueur de la ligne de contournement et la longueur minimale spécifique utilisée par la SONEGAS.

Caractéristiques géométriques.	Isolateur antibrouillard	Isolateur sphérique	Isolateur standard
La ligne de fuite (mm).	375	310	440
Le diamètre jupe (mm).	256	255	279
La profondeur maximale de chaque nervure (mm)	* 27 mm pour la nervure interne (du côté tige). * 60 mm pour la nervure intermédiaire. * 18 mm pour la nervure externe.	_____	* 10 mm pour la nervure interne (du côté tige). * 39 mm pour la nervure suivante. * 40 mm pour la nervure suivante. * 42 mm pour la nervure externe.
La ligne de contournement. (mm)	230	210	273
La longueur minimale spécifique utilisée par la SONELGAZ (cm/kV)	2.56	1.69	3.2

**Tableau III.1:** caractéristiques géométriques des isolateurs étudiés.

D'après la publication de la CEI 71-2 [8], une longueur supérieure à 2 cm/kV est utilisée pour les régions à forte pollution, donc nous pouvons dire que la SONELGAZ a renforcé l'isolement dans les lignes dont on a enlevé les deux chaînes d'isolateurs à profil standard et à profil antibrouillard, ce qui n'est pas le cas pour la lignes de la troisième chaîne d'isolateurs à profil sphérique.

### ***III.3. Analyses Physico-chimiques :***

Après avoir nettoyer les surfaces des isolateurs à l'aide d'un pinceau et de l'eau distillée au laboratoire des analyses chimiques du CREDEG, nous obtenons des résultats pour chaque isolateur pris des chaînes citées précédemment. Nous avons pris trois éléments de la chaîne d'isolateurs à profil standard de la ligne (ALE - RDJ), le premier élément est de côté terre, le deuxième a été enlevé du milieu de la chaîne et le troisième élément a été enlevé du côté haute tension. Nous avons pris trois éléments de cette chaîne vue la pollution importante sur les surfaces de ses isolateurs. Pour les chaînes des isolateurs à profil antibrouillard de forme B et à profil sphérique, nous avons enlevé un seul élément de côté terre de chaque chaîne pour les analyses physico-chimique. Ces analyses concernent la conductivité des agents polluants, ainsi que leurs degré de salinité, ESDD et NSDD (**Tab. III.2**).

Type d'isolateur	Teste	Surface supérieure	Surface Inférieure
Isolateur standard coté conducteur.	Conductivité(S/m)	0.03	1.797
	Salinité (kg/m <sup>2</sup> )	0.19	10.98
	ESDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.107	5.136
	NSDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.023	2.568
Isolateur standard de milieu.	Conductivité(S/m)	0.04	1.45
	Salinité (kg/m <sup>2</sup> )	0.24	8.80
	ESDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.069	4.116
	NSDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.009	1.520
Isolateur standard coté terre.	Conductivité(S/m)	0.04	1.3
	Salinité (kg/m <sup>2</sup> )	0.24	7.7
	ESDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.069	3.592
	NSDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.003	1.504
Isolateur antibrouillard coté terre.	Conductivité(S/m)	0.02	0.10
	Salinité (kg/m <sup>2</sup> )	0.12	0.55
	ESDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.106	0.243
	NSDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.026	0.101
Isolateur sphérique coté terre.	Conductivité(S/m)	0.02	0.12
	Salinité (kg/m <sup>2</sup> )	0.11	0.60
	ESDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.048	0.300
	NSDD (mg/Cm <sup>2</sup> )	0.015	0.102

**Tableau III.2** Résultats des analyses physico-chimiques.

Selon les normes de la CEI 81-5 [9] concernant la classification du degré de pollution des sites, nous pouvons constater que la chaîne d'isolateur à profil standard est prélevée d'un site très pollué dont la salinité dépasse 0.6 mg/cm<sup>2</sup> (1.098 mg/cm<sup>2</sup> dans l'isolateur du coté conducteur).

Pour ce qui concerne les degrés de pollution des sites de prélèvement des isolateurs antibrouillard et sphériques, on ne peut rien dire car ces chaînes d'isolateurs ont subi un lavage quelques mois avant leurs prélèvement.

### ***III.4. Mode opératoire:***

Dans cette partie de travail, nous voulons d'abord déterminer les tensions de contournements de chaque isolateur des trois chaînes pour deux états des surfaces de ces isolateurs pollués sur site. Le premier état de ces surfaces est lorsqu'elles sont sèches, et le deuxième état est lorsque les surfaces sont humidifiées. L'humidification de ces surfaces est réalisée par un pulvérisateur qui contient de l'eau distillée de conductivité 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ces essais sur les tensions de contournement des isolateurs vont nous permettre d'observer l'influence de l'état de la pollution sur la tenue de ces isolateurs. La connaissance de ces tensions de contournement pour chaque isolateur nous permet de réaliser les essais tension-courant de fuite loin de ces niveaux de tension et l'oscilloscope sera ainsi protégé.

Trente sept isolateurs avec trois profils différents sont concernés par ces essais. Ces derniers portent d'abord sur l'influence de la tension appliquée sur la forme et l'amplitude du courant de fuite pour les deux cas considérés des surfaces (sec et humidifié), puis sur l'influence de la conductivité de l'eau utilisée pour l'humidification des surfaces des isolateurs sur la forme et l'amplitude du courant de fuite. Les conductivités utilisées sont : 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 175  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 525  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La variation de la conductivité de l'eau distillée est réalisée par dosage en chlorure de sodium (Na Cl). La mesure de la conductivité est effectuée à l'aide d'un conductimètre.

Nous représentons les courbes donnant la valeur de crête du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités de l'eau utilisée humidifiant les surfaces des isolateurs et pour chaque type des trois profils dont nous disposons. Nous appliquons de 5 à 7 niveaux de tension pour chaque cas. Nous enregistrons cinq mesures pour chaque essai en fichier de données à l'aide de l'oscilloscope numérique de 500 MHz. A l'aide d'un programme en Matlab (**Annexe IV**), nous déterminons les valeurs de crête des courants de fuite. Ensuite, nous effectuons le calcul de la moyenne entre ces cinq valeurs enregistrées. Enfin, nous effectuons le calcul de la moyenne entre les valeurs de courant de fuite des même niveaux de tension appliquées et pour les même conductivités de l'eau d'humidification de tous les isolateurs la chaîne (12 isolateurs à profil standard, 11 isolateurs à profil sphérique et 14 isolateurs à profil antibrouillard de forme B). En dernier lieu, nous présentons des courbes de comparaison pour voir l'influence du profil de l'isolateur sur l'amplitude du courant de fuite.

### ***III.5. Résultats expérimentaux et discussions :***

#### ***III.5.1. Tensions de contournement :***

Comme déjà mentionné précédemment, les essais de contournement sont effectués sur chaque isolateur, pour les trois profils et pour les deux états de surfaces des isolateurs, l'état sec et l'état humidifié (**Annexe III**).

##### ***III.5.1.1. Etat sec :***

Nous remarquons que les tensions de contournement sont presque les mêmes pour les isolateurs à profil standard (tension de contournement moyenne de 44.67 kV) (**Fig. III.5**) et pour les isolateurs à profil sphérique (tension de contournement moyenne est 58.33 kV) (**Fig. III.6**), avec un écart type relatif de 2.63% pour les isolateurs à profil sphérique et 2.30% pour les isolateurs à profil standard. Donc, on peut dire que la rigidité diélectrique de ces isolateurs est la même à l'état sec. La même remarque peut être faite pour les isolateurs à profil antibrouillard, (la tension de contournement moyenne sera donc 73.98 kV) (**Fig. III.7**), à l'exception de l'isolateur N° 14 qui est dans un état très dégradé par rapport aux autres isolateurs de la même chaîne (sa tension de contournement est loin de la moyenne des tensions de contournement des autres isolateurs de 21%) (**Fig. III.8**), donc l'écart type sera de 2.60%.

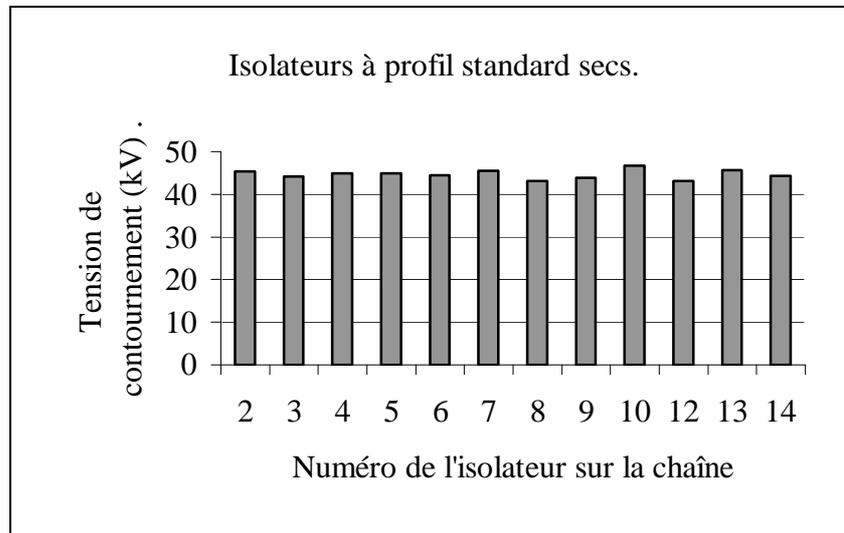
Lors de nos essais, nous avons remarqué également que les contournements concernant les isolateurs à profil sphérique et à profil antibrouillard ont suivi la ligne de contournement (la plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige). Mais pour ce qui est des isolateurs à profil standard, les tensions de contournement ont été relativement faibles et les contournements ont suivi la ligne de fuite à cause de la pollution recouvrant leurs surfaces.

Pour des longueurs inter-électrodes supérieures ou égales à 8 cm, la formule empirique (III.1) établie pour les systèmes d'électrodes pointe-pointe non symétriques, donne une bonne approximation de la tension de contournement des chaînes d'isolateurs à l'état propre et sec. Donc, la tension moyenne de contournement de la chaîne d'isolateurs à profil sphérique est environ de 571.74 kV. Pour la chaîne d'isolateurs à profil antibrouillard, la valeur de la tension moyenne de contournement est approximativement égale à 589.12 kV. Mais, nous ne

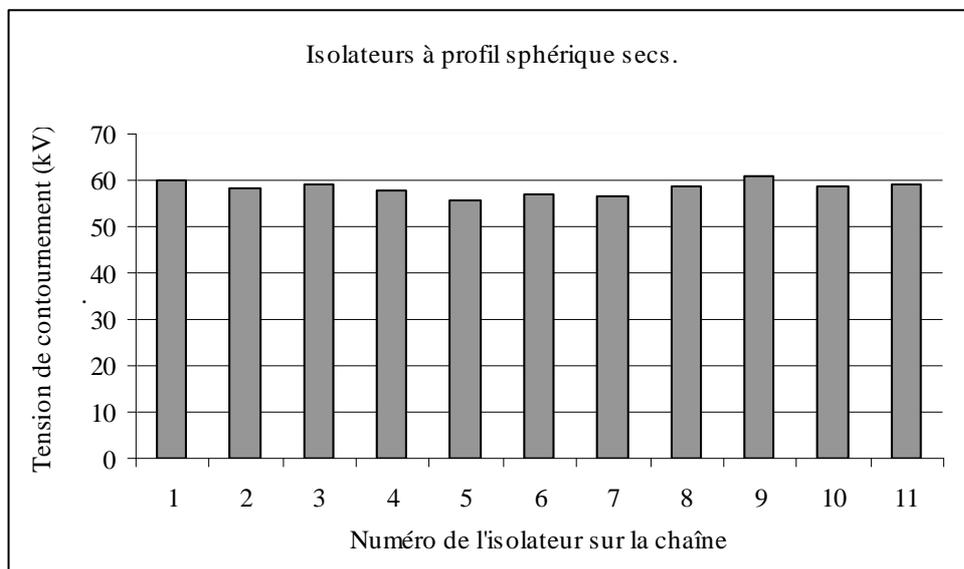
pouvons pas estimer la valeur de la tension moyenne de contournement de la chaîne d'isolateurs à profil standard, car ils sont très pollués (à l'état sec).

$$U_c = 14 + 3.16 L_c . \quad (\text{III.1})$$

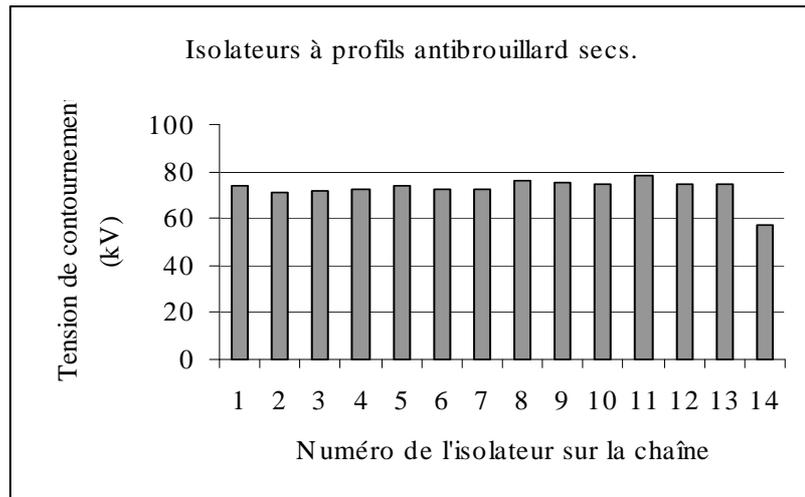
(avec  $U_c$  est la tension de contournement et  $L_c$  est la longueur de contournement).



**Figure III.5 :** Tensions de contournement des isolateurs à profil standard secs.



**Figure III.6 :** Tensions de contournement des isolateurs à profil sphérique secs.



**Figure III.7 :** Tensions de contournement des isolateurs à profil antibrouillard secs.



**Figure III.8 :** Isolateur à profil antibrouillard N° 14 taché par la peinture.

### ***III.5.1.2. Etat humide :***

Après avoir effectué des essais de contournement sur tous les isolateurs en humidifiant leurs surfaces avec de l'eau distillée d'une conductivité  $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ , nous remarquons qu'il y a une dispersion entre les valeurs des tension de contournement obtenues pour les isolateurs de même profil (l'écart type est supérieur à 6%) pour tous les profils. Cela est dû aux différents facteurs suivants :

- La difficulté d'effectuer la même humidification pour tous les isolateurs.
- La répartition des couches polluantes sur les surfaces des isolateurs qui n'est pas homogène.

Nous remarquons aussi que les tensions de contournement ont diminué considérablement par rapport à celles obtenues à l'état sec (la tension moyenne de contournement est de 32.92 kV

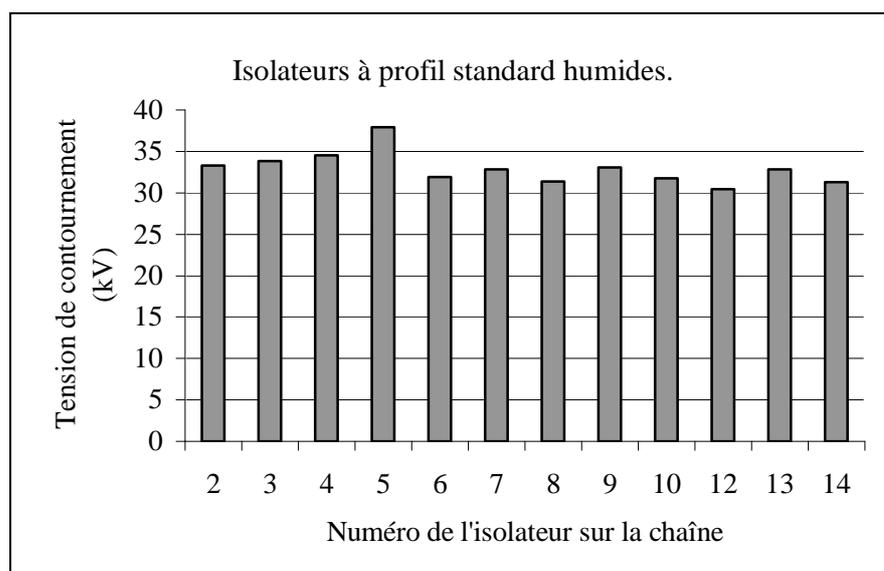
pour les isolateurs à profil standard, de 50.44 kV pour les isolateurs à profil antibrouillard et de 38.98 kV pour les isolateurs à profil sphérique) (**Fig. III.9** jusqu'à **Fig. III.11**). Cela est dû à l'augmentation de la conductivité superficielle des isolateurs, car l'humidification des couches polluantes engendre la dissolution des différents sels qui existent dans ces couches. Nous remarquons est fait c'est que les contournements suivent la ligne de fuite des isolateurs avec un son moins important par rapport à l'état sec, cela est dû à la diminution des tensions des contournements.

On sait que la répartition du potentiel sur une chaîne d'isolateurs dont l'état de surface est pollué et humide est linéaire, donc sur la base des niveaux de tension de contournement obtenus pour chaque isolateur à l'état humidifié, nous pouvons dire que la tension moyenne de contournement totale de la chaîne d'isolateurs à profil standard à l'état humidifié est de 493.8 kV (la chaîne dispose de 15 isolateurs). Pour la chaîne d'isolateurs à profil sphérique, cette valeur est de 467.76 kV (la chaîne dispose de 12 isolateurs). Enfin, pour la chaîne d'isolateurs à profil antibrouillard, elle est de 756.6 kV (la chaîne dispose de 15 isolateurs). Si nous calculons la tension de service de la chaîne d'isolateurs à profil standard qui est la plus polluée à l'aide de (III.2 et III.3), nous la trouvons égale à 186.1 kV, ce qui est insuffisant pour le bon fonctionnement du réseau.

$$U_c = (1.1 \div 1.15) U_t . \quad (\text{III.2})$$

$$U_t = 2.2 U_s + 20. \quad (\text{III.3})$$

( $U_c$  : tension de contournement,  $U_t$  : tension de tenue et  $U_s$  : tension de service).



**Figure III.9** : Tensions de contournement des isolateurs à profil standard humides.

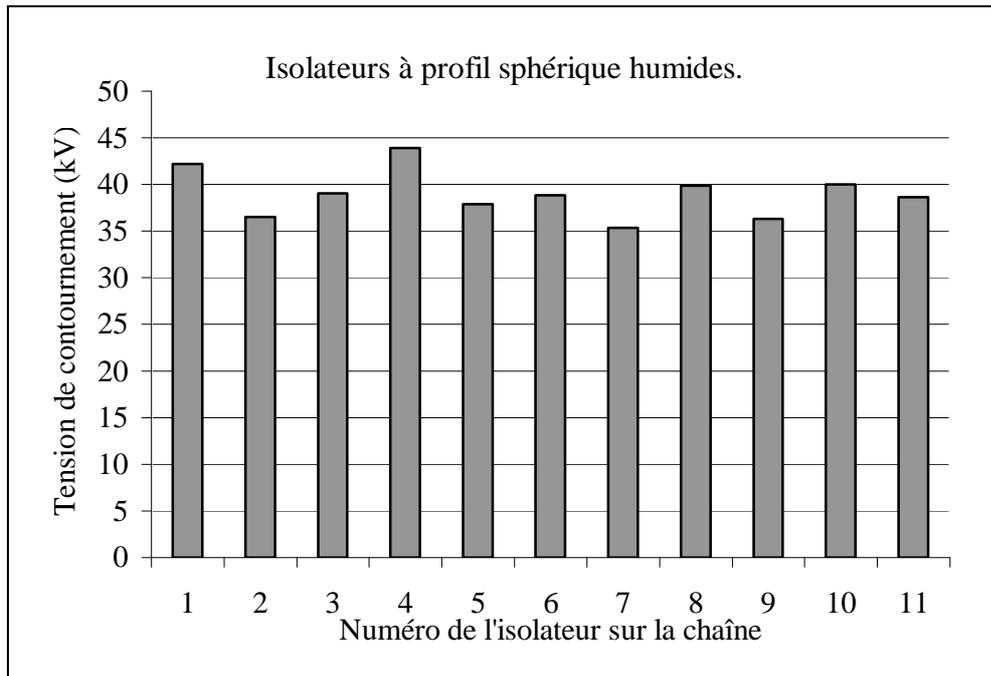


Figure III.10 : Tensions de contournement des isolateurs à profil sphérique humides.

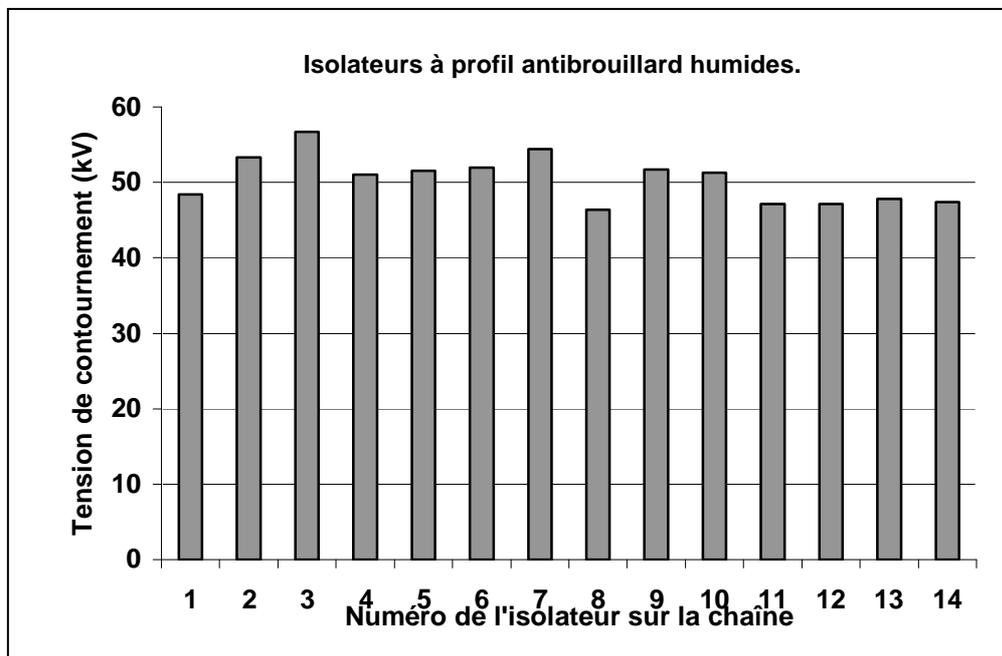


Figure III.11 : Tensions de contournement des isolateurs à profil antibrouillard

### ***III.5.2. Courants de fuite:***

Dans ce qui suit, nous représentons les résultats concernant les mesures de courants de fuite pour chaque niveau de tension, pour les différentes conductivités, pour tous les isolateurs.

La forme et l'amplitude du courant de fuite peuvent nous informer sur la sévérité de la pollution ainsi que sur l'état de la surface des isolateurs (**Annexe III**).

#### ***III.5.2.1. Visualisation et analyse de la forme du signal des courants de fuite :***

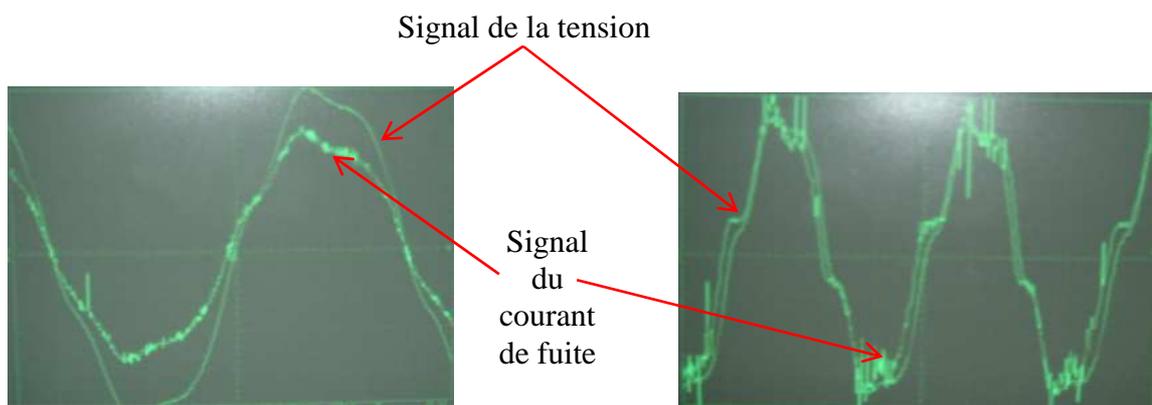
Nous obtenons des formes différentes des signaux des courants de fuite. Ces différences de forme sont dûes essentiellement à la différence des niveaux de tension appliquées aux isolateurs d'une part, et d'autre part, elles dépendent du type, de sévérité de la pollution ainsi que de son état de surface (sec ou humide), mais aussi de la nature de l'isolant utilisé pour la fabrication de l'isolateur (**Fig. III.20 à Fig. III.55**).

Pour les niveaux de tension relativement faibles (inférieur à 10 kV) (**Fig. III.20 à Fig. III.31**), la forme du signal du courant de fuite est parfaitement lisse d'une part, ce qui veut dire qu'il n'y a pas de génération de décharges électriques. Par ailleurs, et dans ce cas de figure, la forme du courant de fuite est semblable à celle de la tension d'alimentation (**Fig. III.12 à Fig. III.15**), cette tension d'alimentation n'est pas tout à fait une sinusoïde (**Fig. III.16 à Fig. III.19**), ce rapprochement dépend directement de la sévérité de la pollution et de la conductivité de l'eau distillée utilisée pour l'humidification des surfaces des isolateurs, c'est-à-dire lorsque le degré de pollution est important et la pollution est humidifiée, la forme sera presque la même que la forme de la tension d'alimentation. La déformation des signaux non sinusoïdaux peut être due à l'apparition des phénomènes d'ionisation.

En augmentant progressivement la tension (12.5 kV pour les isolateurs à profil standard, 15 kV pour les deux autres types d'isolateurs), la forme des courants de fuite se déforment encore et des impulsions de faibles amplitudes commencent à apparaître (**Fig. III.32 à Fig. III.43**). Ces impulsions sont observées surtout au niveau de sa valeur crête

dans les deux alternances négative ou positive, mais elles apparaissent plus dans l'alternance négative. Lorsque la tension est suffisamment élevée pour engendrer des avalanches électroniques, l'effet couronne commence à apparaître ce qui explique l'existence des impulsions, ces impulsions existent beaucoup plus dans les alternances négatives, car lorsque l'alternance est négative le capot représente l'anode et la tige représente la cathode. La tige avec le bords des nervures est un système point-point qui est le système le moins rigide, donc les phénomènes d'ionisations seront présents ce qui donne les impulsions dans le signal de courant de fuite. Le nombre de ces impulsions augmente avec l'augmentation de la tension appliquée d'une part, et d'autre part avec l'augmentation de la conductivité superficielle des isolateurs humidifiés. En effet, dans ce cas, la valeur de l'amplitude du courant de fuite sera relativement élevée ce qui engendre un assèchement rapide de la surface, donc l'apparition de décharges.

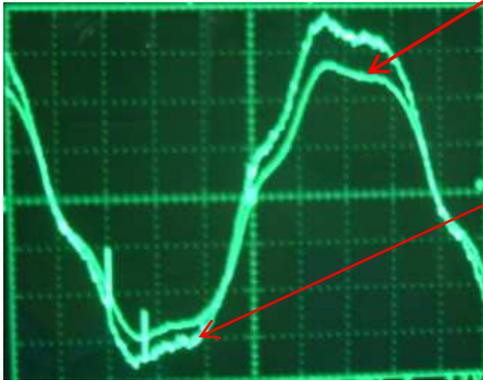
En procédant encore à l'augmentation du niveau de la tension appliquée, le nombre et l'amplitude des impulsions augmentent (**Fig. III.44 à Fig. III.55**). Dans ce cas, il y a aussi l'apparition d'un autre phénomène caractérisé par quelques discontinuités du signal du courant de fuite dans une partie remarquable du temps (**Fig. III.50, Fig. III.51 et Fig. III.54**). Ces discontinuités sont dues à l'apparition et à l'extinction des arcs d'intensités électriques relativement importantes.



**Figure III.12** : Forme du courant de fuite et de la tension d'alimentation de 5 kV, pour une conductivité de 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

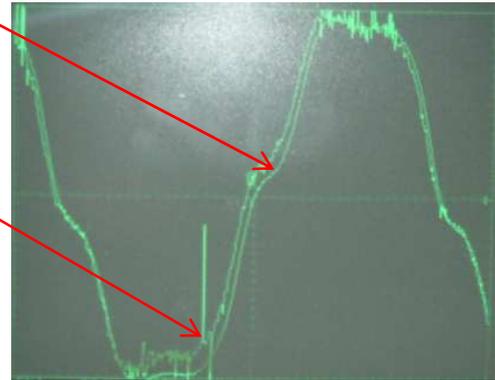
**Figure III.13** : Forme du courant de fuite et de la tension d'alimentation de 10 kV, pour une conductivité de 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Signal de la tension.

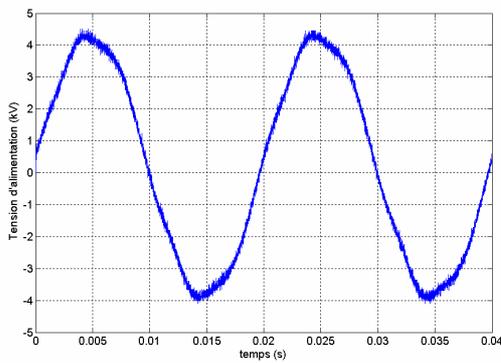


**Figure III.14** : Forme du courant de fuite et de la tension d'alimentation de 20 kV, pour une conductivité de 5  $\mu\text{S/cm}$ .

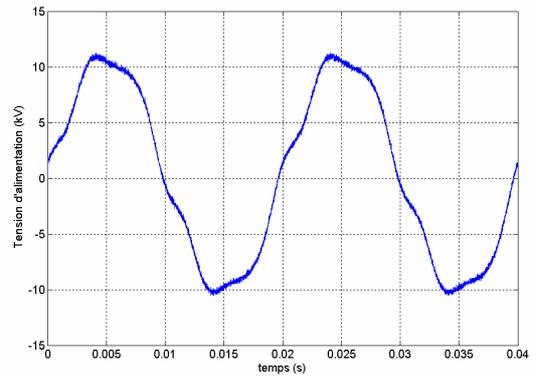
Signal du courant de fuite.



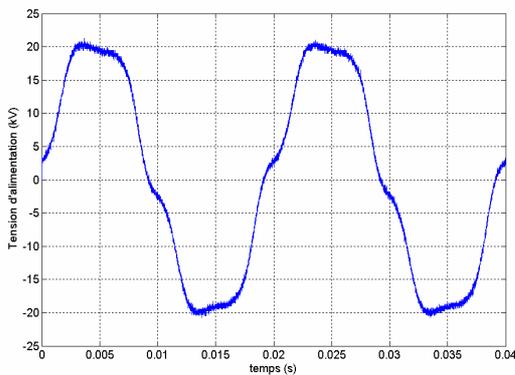
**Figure III.15** : Forme du courant de fuite et de la tension d'alimentation de 30 kV, pour une conductivité de 5  $\mu\text{S/cm}$ .



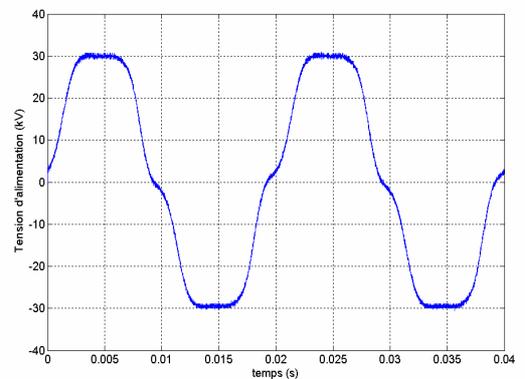
**Figure III.16** : Forme de la tension d'alimentation de 5 kV.



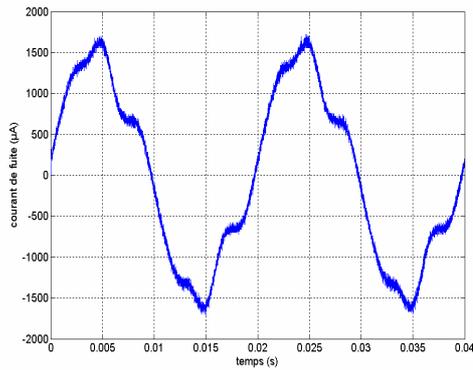
**Figure III.17** : Forme de la tension d'alimentation de 10 kV.



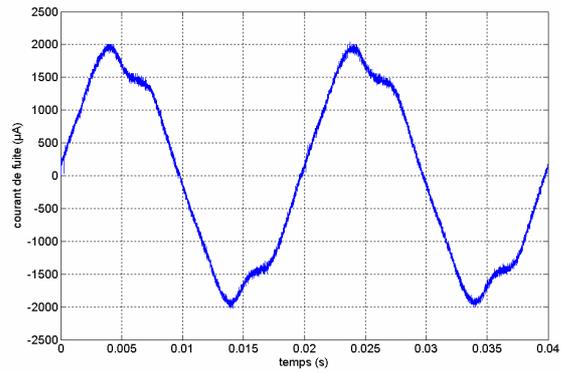
**Figure III.18** : Forme de la tension d'alimentation de 20 kV.



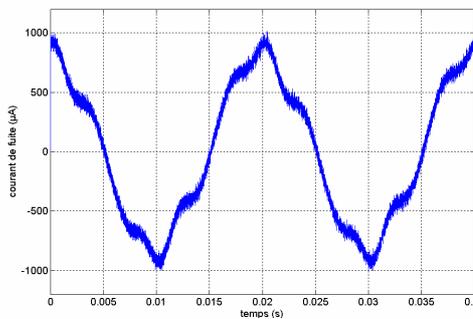
**Figure III.19** : Forme de la tension d'alimentation de 30 kV.



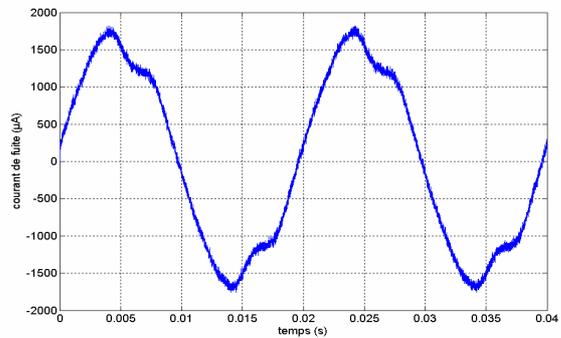
**Figure III.20:** Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=5\text{kV}$  et  $\gamma=5\mu\text{S/cm}$ ).



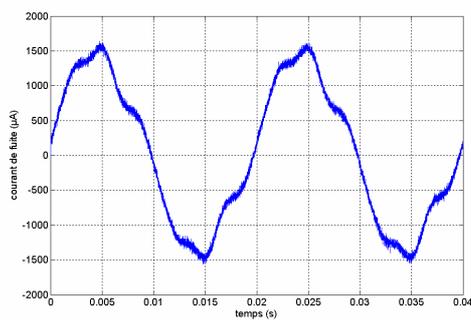
**Figure III.23:** Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=5\text{kV}$  et  $\gamma=175\mu\text{S/cm}$ ).



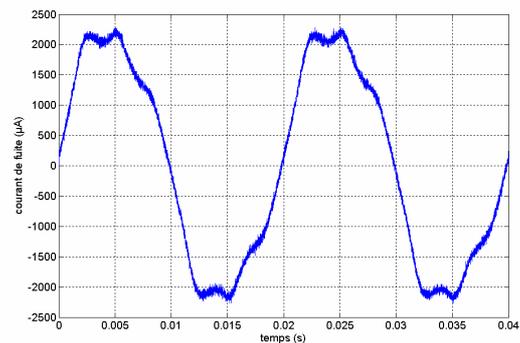
**Figure III.21:** Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=5\text{kV}$  et  $\gamma=5\mu\text{S/cm}$ ).



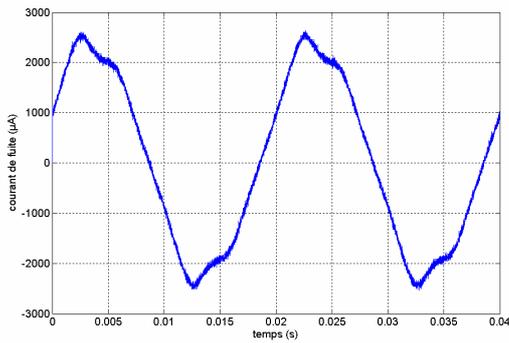
**Figure III.24:** Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=5\text{kV}$  et  $\gamma=175\mu\text{S/cm}$ ).



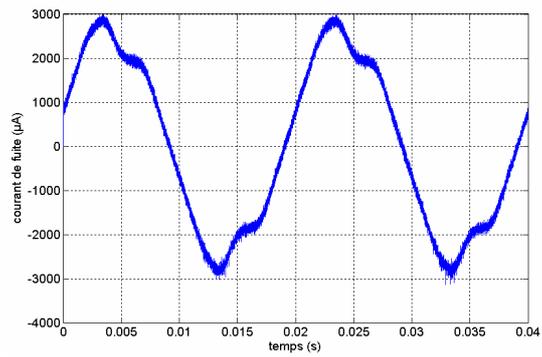
**Figure III.22:** Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=5\text{kV}$  et  $\gamma=5\mu\text{S/cm}$ ).



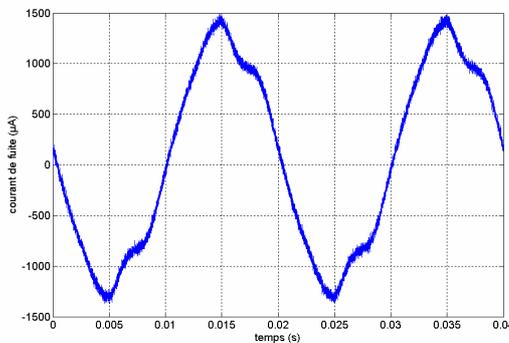
**Figure III.25:** Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=5\text{kV}$  et  $\gamma=175\mu\text{S/cm}$ ).



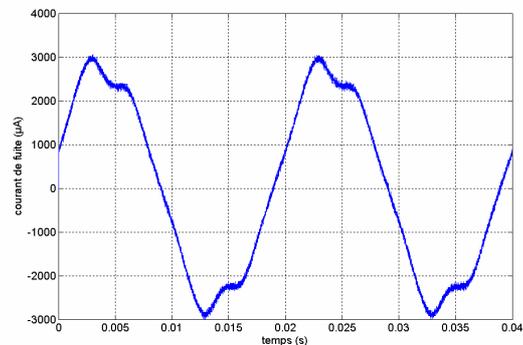
**Figure III.26:** Courant de fuite  
(Isolateur sphérique,  $U=5\text{kV}$   
et  $\gamma=350\mu\text{S/cm}$ ).



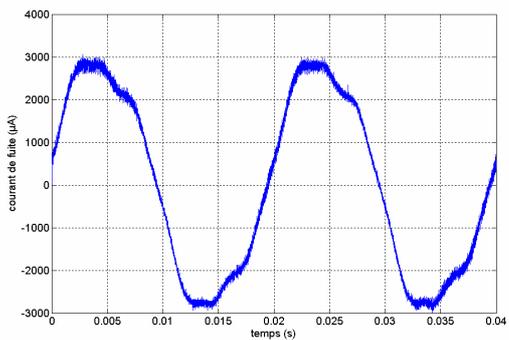
**Figure III.29:** Courant de fuite  
(Isolateur sphérique,  $U=5\text{kV}$   
et  $\gamma=525\mu\text{S/cm}$ ).



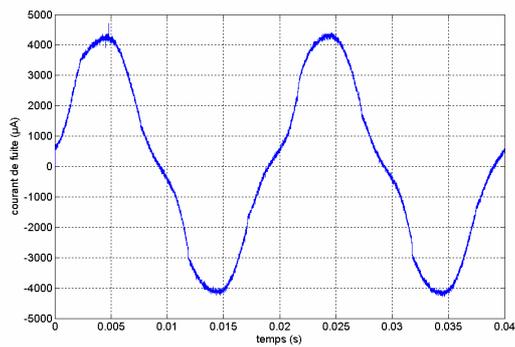
**Figure III.27:** Courant de fuite  
(Isolateur antibrouillard,  $U=5\text{kV}$   
et  $\gamma=350\mu\text{S/cm}$ ).



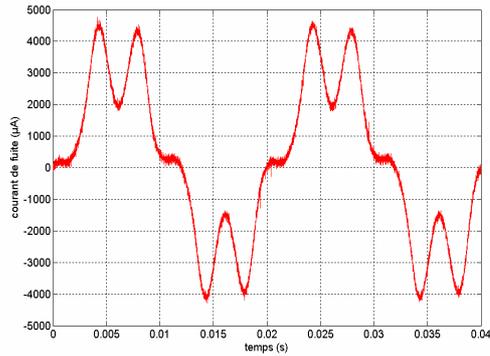
**Figure III.30:** Courant de fuite  
(Isolateur antibrouillard,  $U=5\text{kV}$   
et  $\gamma=525\mu\text{S/cm}$ ).



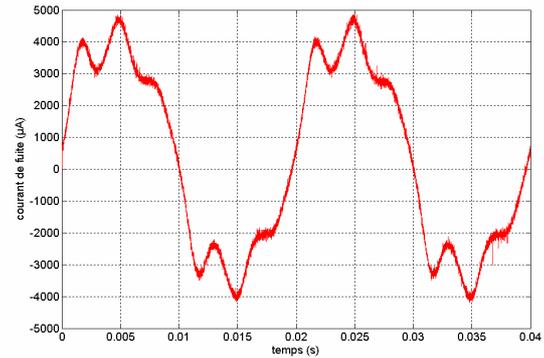
**Figure III.28:** Courant de fuite  
(Isolateur standard,  $U=7.5\text{kV}$   
et  $\gamma=350\mu\text{S/cm}$ ).



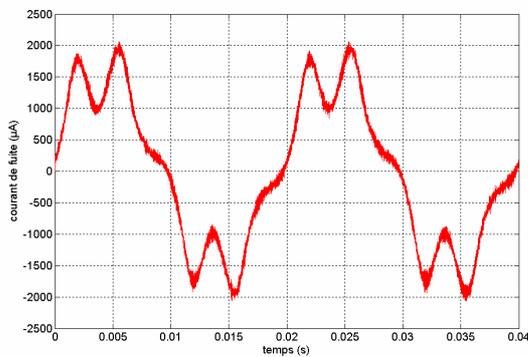
**Figure III.31:** Courant de fuite  
(Isolateur standard,  $U=7.5\text{kV}$   
et  $\gamma=525\mu\text{S/cm}$ ).



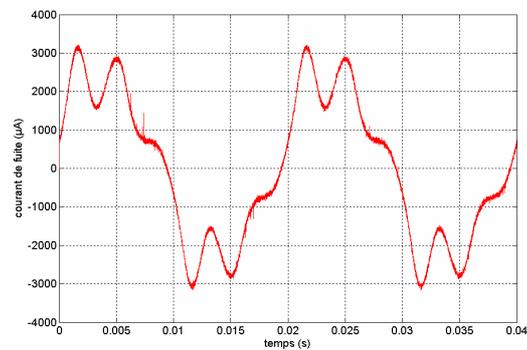
**Figure III.32 :** Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=15\text{kV}$  et  $\gamma=5\mu\text{S/cm}$ ).



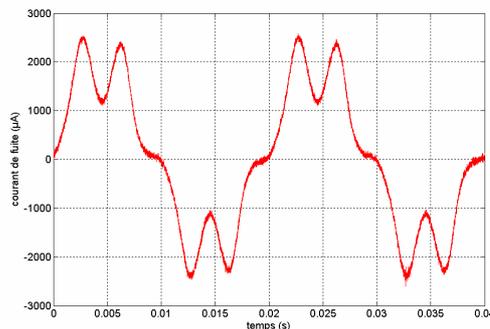
**Figure III.35 :** Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=15\text{ kV}$  et  $\gamma=175\mu\text{S/cm}$ ).



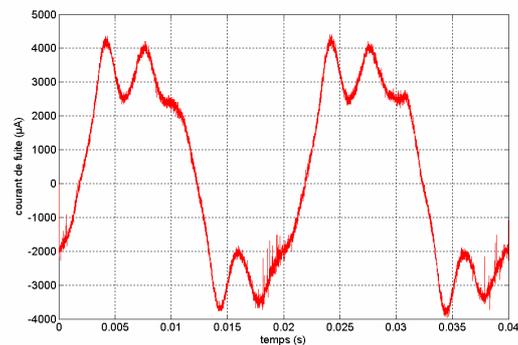
**Figure III.33 :** Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=15\text{kV}$  et  $\gamma=5\mu\text{S/cm}$ ).



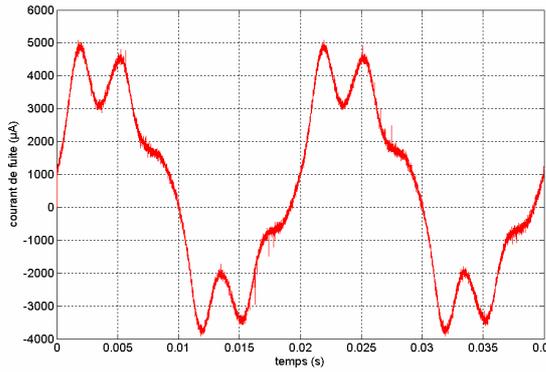
**Figure III.36 :** Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=15\text{kV}$  et  $\gamma=175\mu\text{S/cm}$ ).



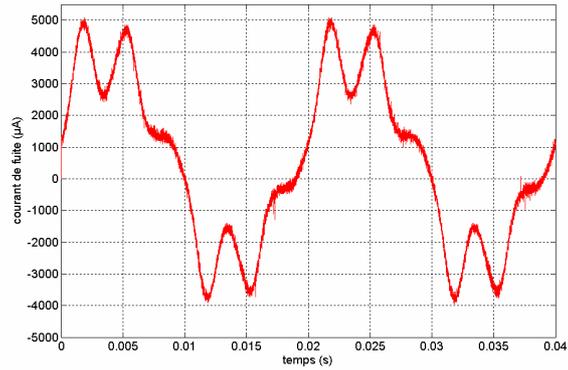
**Figure III.34 :** Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=12.5\text{kV}$  et  $\gamma=5\mu\text{S/cm}$ ).



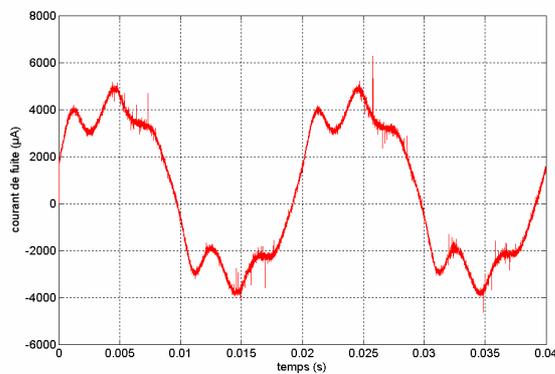
**Figure III.37 :** Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=12.5\text{kV}$  et  $\gamma=175\mu\text{S/cm}$ ).



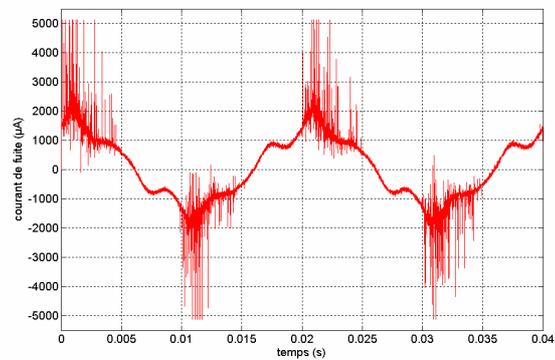
**Figure III.38** : Courant de fuite  
(Isolateur sphérique,  $U=15$  kV  
et  $\gamma=350$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



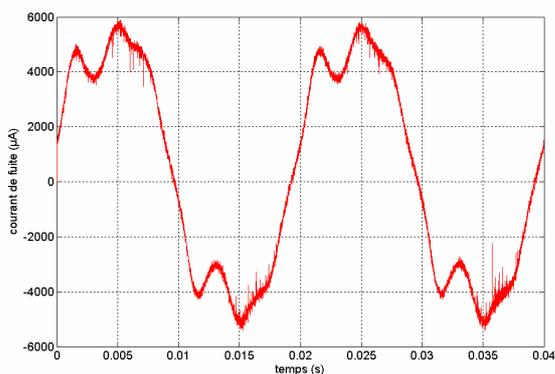
**Figure III.41** : Courant de fuite  
(Isolateur sphérique,  $U=15$  kV  
et  $\gamma=525$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



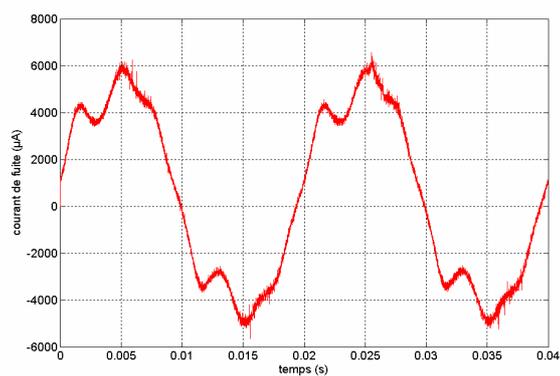
**Figure III.39** : Courant de fuite  
(Isolateur antibrouillard,  $U=15$  kV  
et  $\gamma=350$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



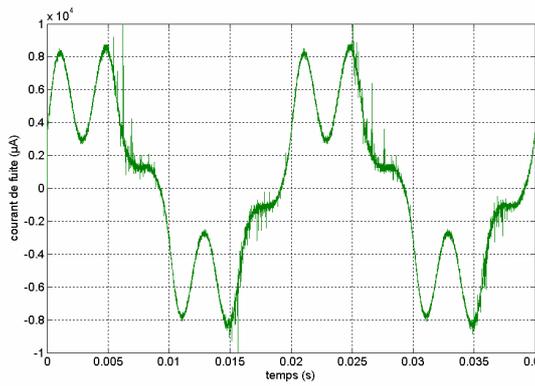
**Figure III.42** : Courant de fuite  
(Isolateur antibrouillard,  $U=15$  kV  
et  $\gamma=525$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



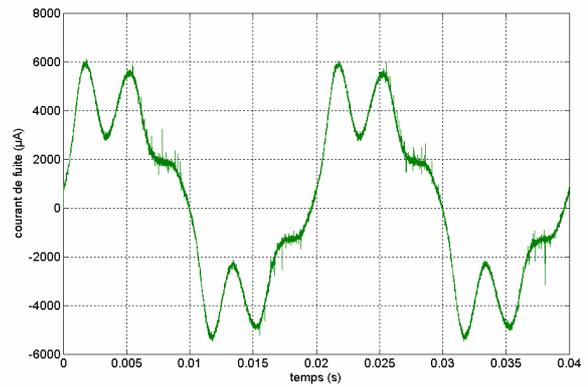
**Figure III.40** : Courant de fuite  
(Isolateur standard,  $U=12.5$  kV  
et  $\gamma=350$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



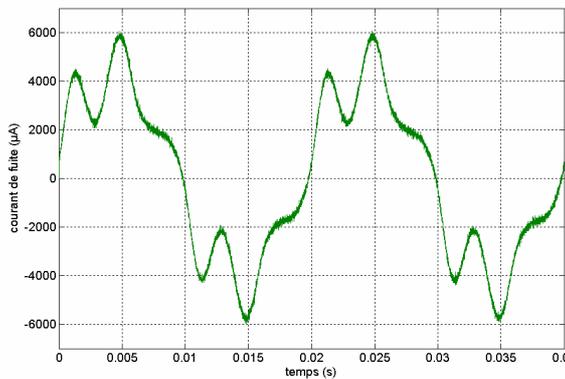
**Figure III.43** : Courant de fuite  
(Isolateur standard,  $U=12.5$  kV  
et  $\gamma=525$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



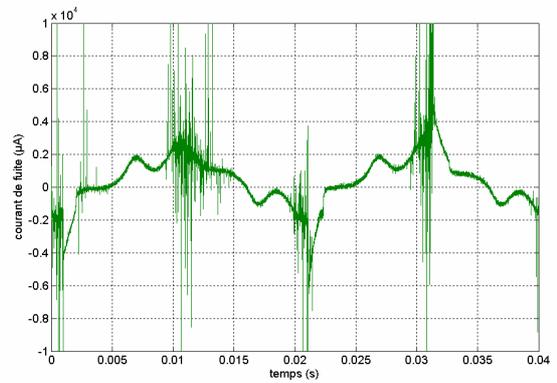
**Figure III.44** : Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=30$  kV et  $\gamma=5$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



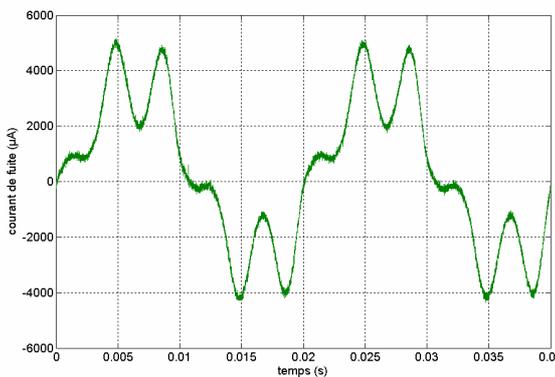
**Figure III.47** : Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=25$  kV et  $\gamma=175$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



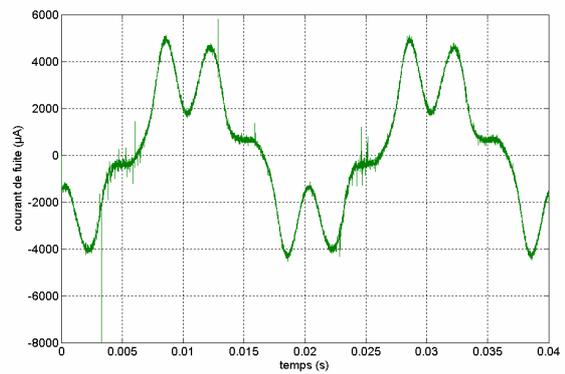
**Figure III.45** : Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=30$  kV et  $\gamma=5$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



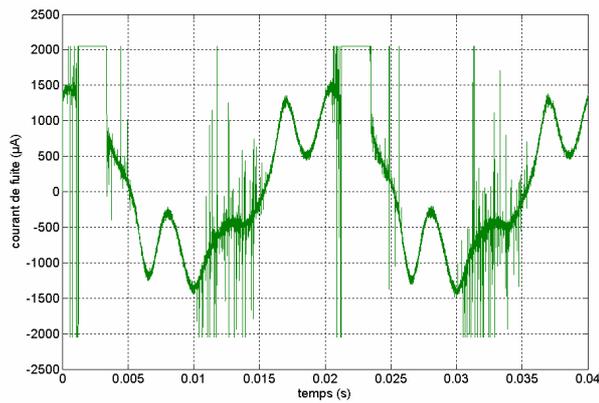
**Figure III.48** : Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=25$  kV et  $\gamma=175$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



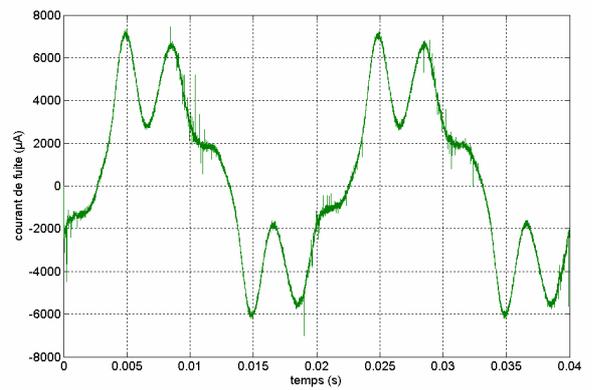
**Figure III.46** : Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=20$  kV et  $\gamma=5$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



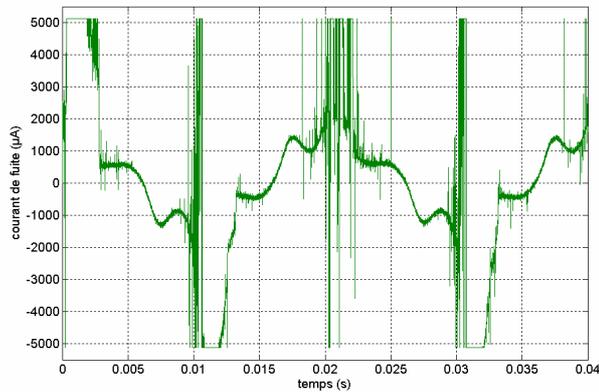
**Figure III.49** : Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=20$  kV et  $\gamma=175$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



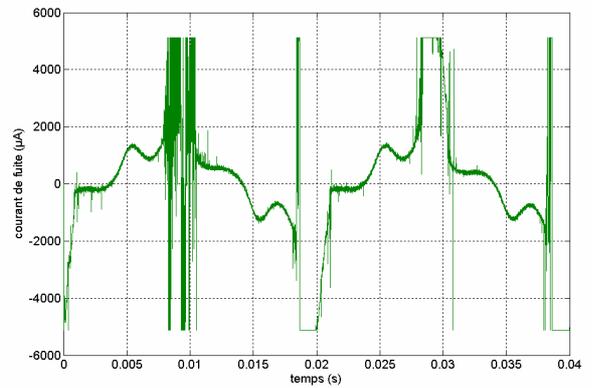
**Figure III.50 :** Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=25$  kV et  $\gamma=350$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



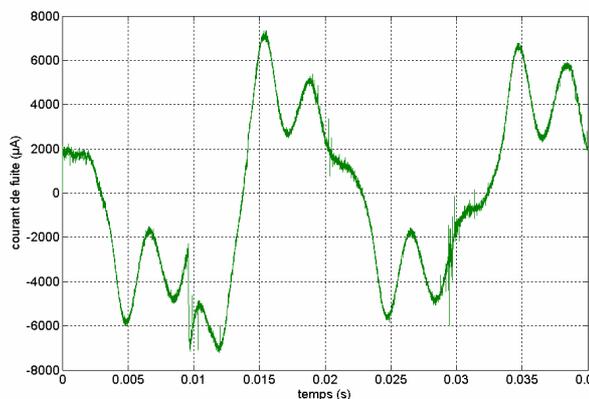
**Figure III.53 :** Courant de fuite (Isolateur sphérique,  $U=25$  kV et  $\gamma=525$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



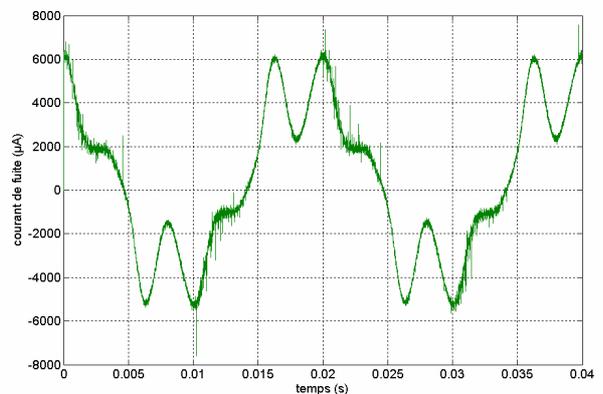
**Figure III.51 :** Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=25$  kV et  $\gamma=350$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



**Figure III.54 :** Courant de fuite (Isolateur antibrouillard,  $U=25$  kV et  $\gamma=525$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



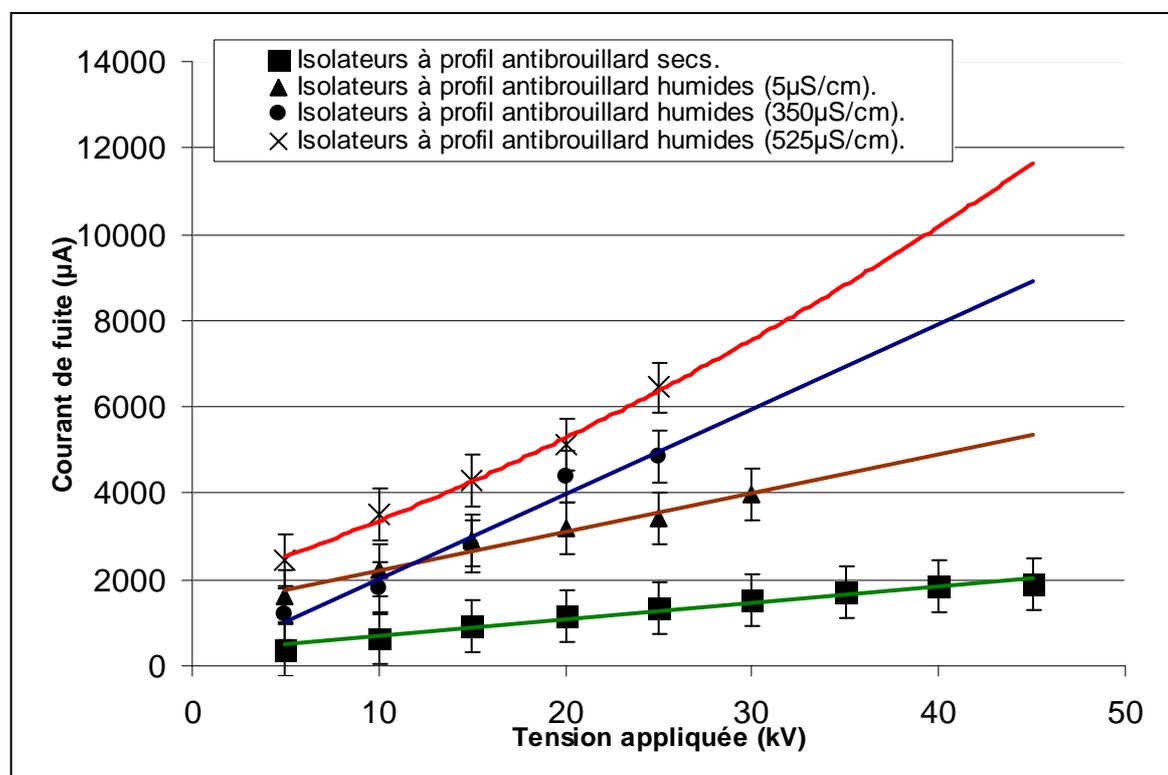
**Figure III.52 :** Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=20$  kV et  $\gamma=350$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



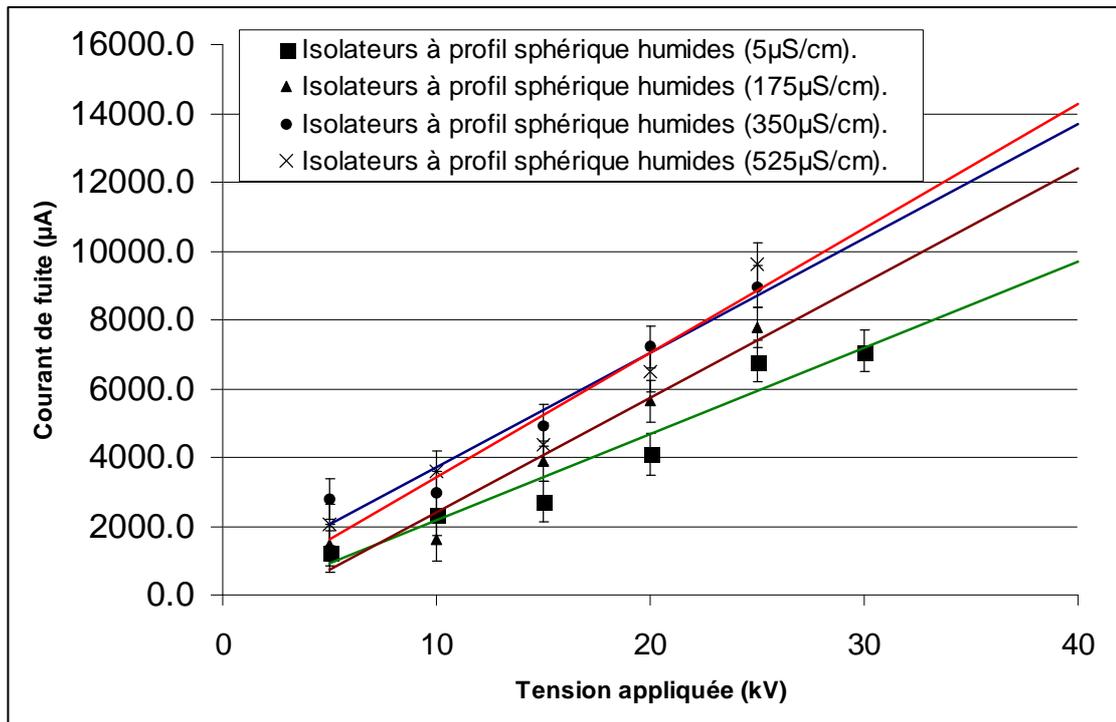
**Figure III.55 :** Courant de fuite (Isolateur standard,  $U=20$  kV et  $\gamma=525$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

### III.5.2.2. Influence de la tension appliquée :

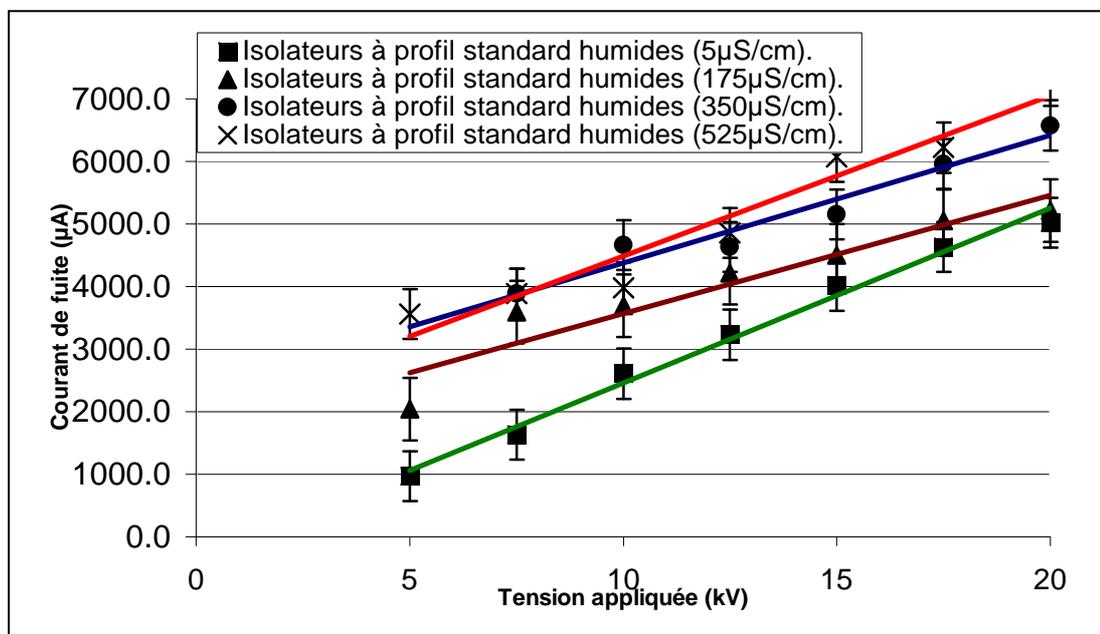
Nous représentons les graphes correspondant aux valeurs de crête du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les trois types d'isolateurs (profil standard, profil sphérique et profil antibrouillard) et pour les quatre conductivités de l'eau distillée utilisée pour l'humidification (5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 175  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 525  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (**Fig. III.56** à **Fig. III.58**). La valeur de crête du courant de fuite est calculée en divisant la somme des deux valeurs maximale et minimale du signal du courant de fuite en valeur absolue. Nous remarquons pour tous les types d'isolateurs et pour les différentes conductivités utilisées, que la valeur du courant de fuite augmente presque linéairement avec l'augmentation de la tension appliquée, mais avec des pentes différentes, ce qui correspond au même comportement d'une résistance. Les valeurs du courant de fuite augmentent avec l'augmentation de la conductivité. Le courant de fuite des isolateurs à profil sphérique est plus élevé de 10% à 20% que celui des isolateurs à profil antibrouillard, ce qui signifie que l'isolateur antibrouillard est plus rigide que l'isolateur sphérique pour des conditions de pollution sévères, car le profil antibrouillard est conçu pour ces conditions de fonctionnement.



**Figure III.56** : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée. Isolateurs à profil antibrouillard pour les différentes conductivités.



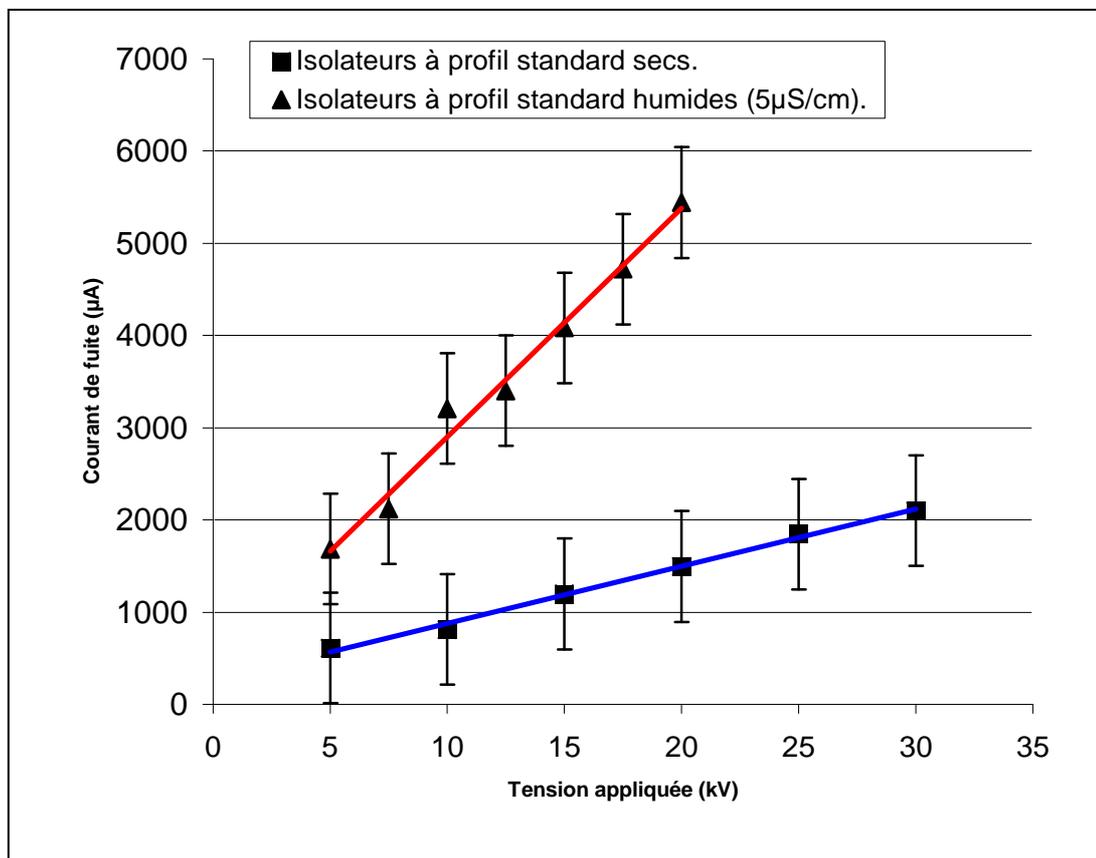
**Figure III.57** : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée. Isolateurs à profil sphérique pour les différentes conductivités.



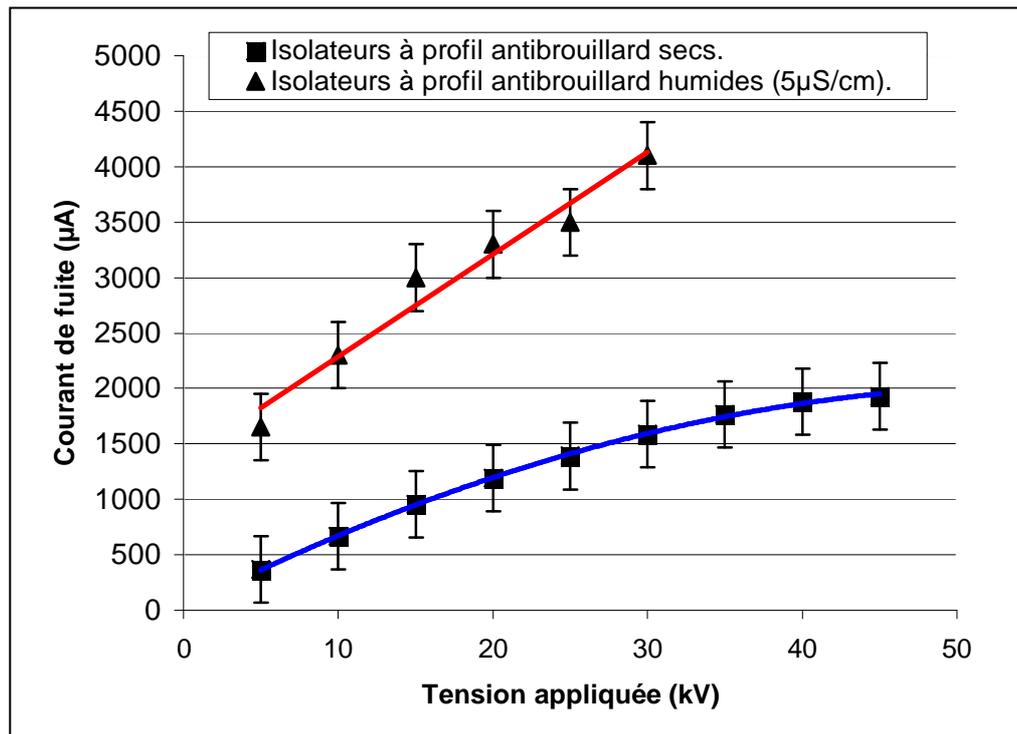
**Figure III.58** : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée. Isolateurs à profil standard pour les différentes conductivités.

### III.5.2.3. Influence de l'état de la surface de l'isolateur:

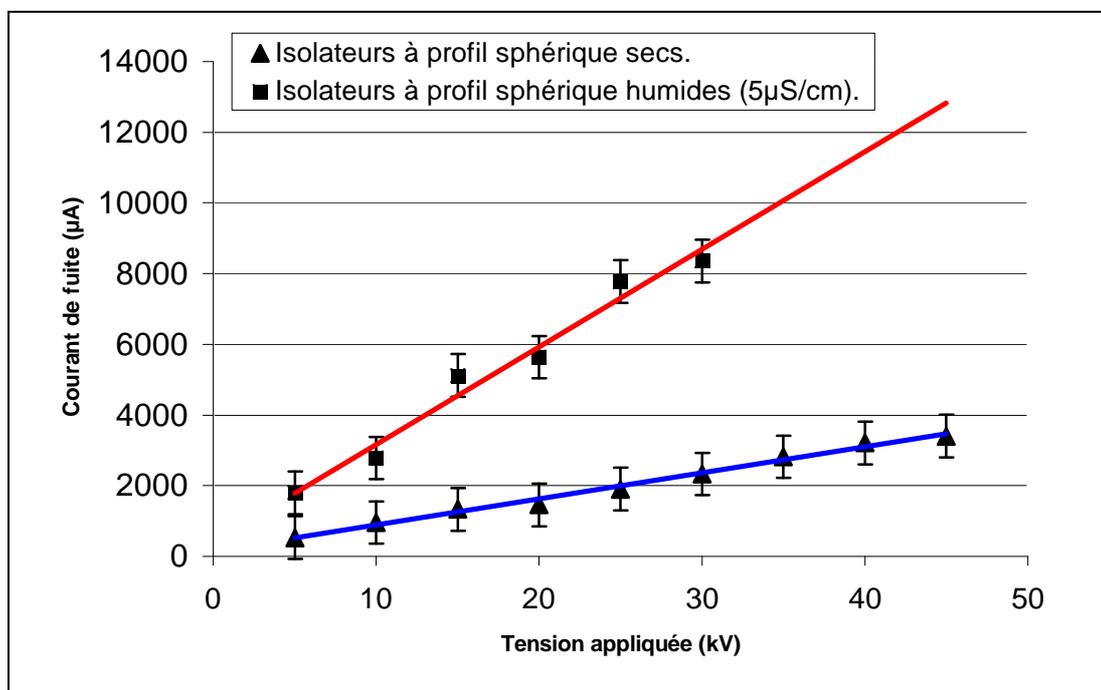
Nous voyons bien que l'influence de l'état de surface des isolateurs (sec ou humide) est très importante. Il suffit d'une eau distillée avec une conductivité négligeable ( $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) pour humidifier la surface des isolateurs et les valeurs du courant de fuite augmentent considérablement pour les mêmes niveaux de tensions et pour les mêmes isolateurs par rapport à l'état sec (**Fig. III.59** à **Fig. III.61**).



**Figure III.59** : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée. Isolateurs à profil standard pour les états sec et humide.



**Figure III.60** : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée des isolateurs à profil antibrouillard pour les états sec et humide.

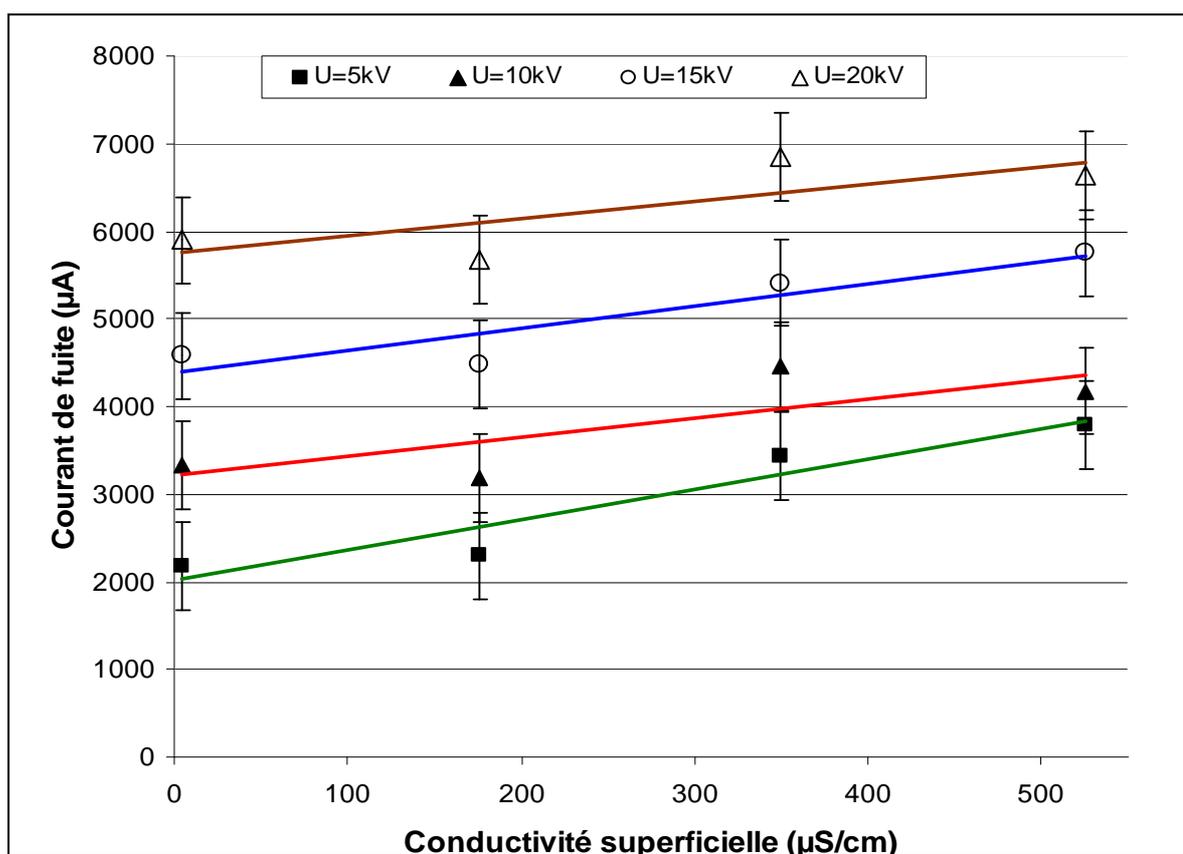


**Figure III.61** : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée. Isolateurs à profil sphérique pour les états sec et humide.

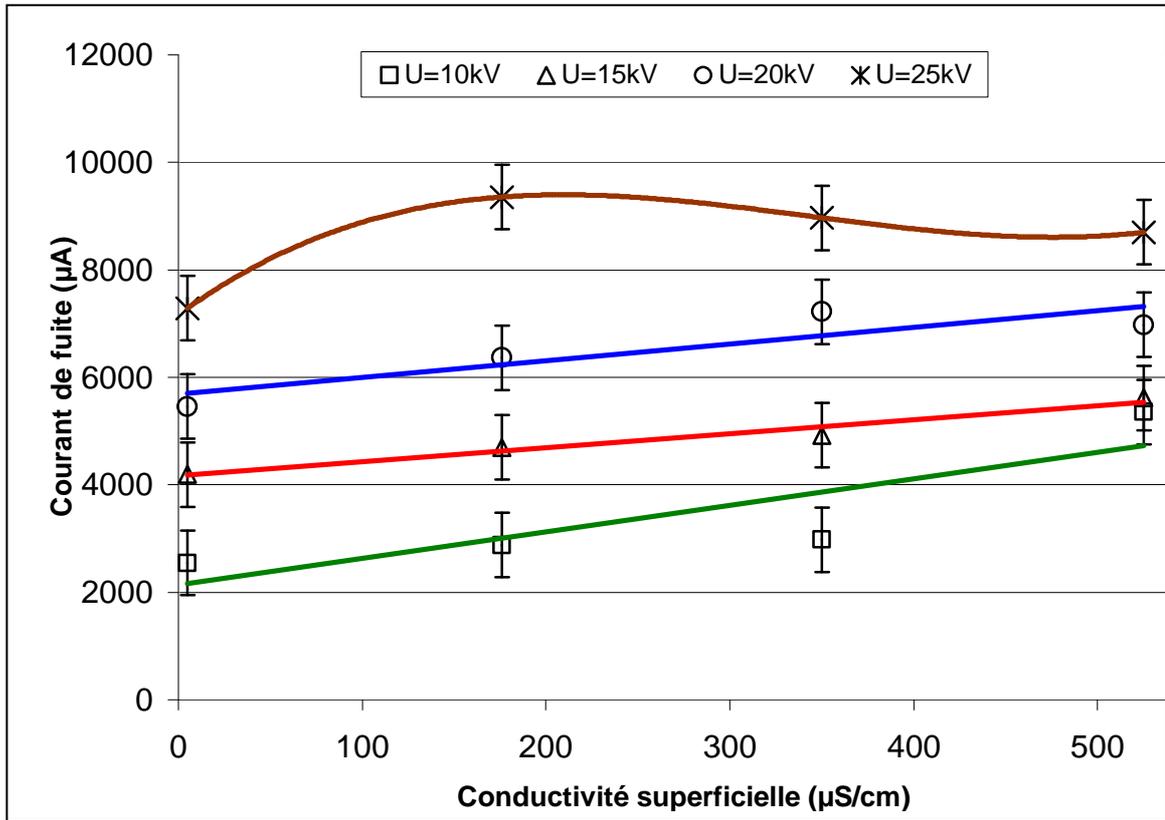
### III.5.2.4. influence de la conductivité :

Nous remarquons que pour toutes les caractéristiques courant de fuite-conductivité que nous avons présenté, que la valeur du courant de fuite augmente toujours avec l'augmentation de la conductivité. Ce qui change par contre, est la façon de son évolution pour les différents profils d'isolateurs et pour les différents niveaux de tension appliqués (**Fig. III.62** à **Fig.III.64**).

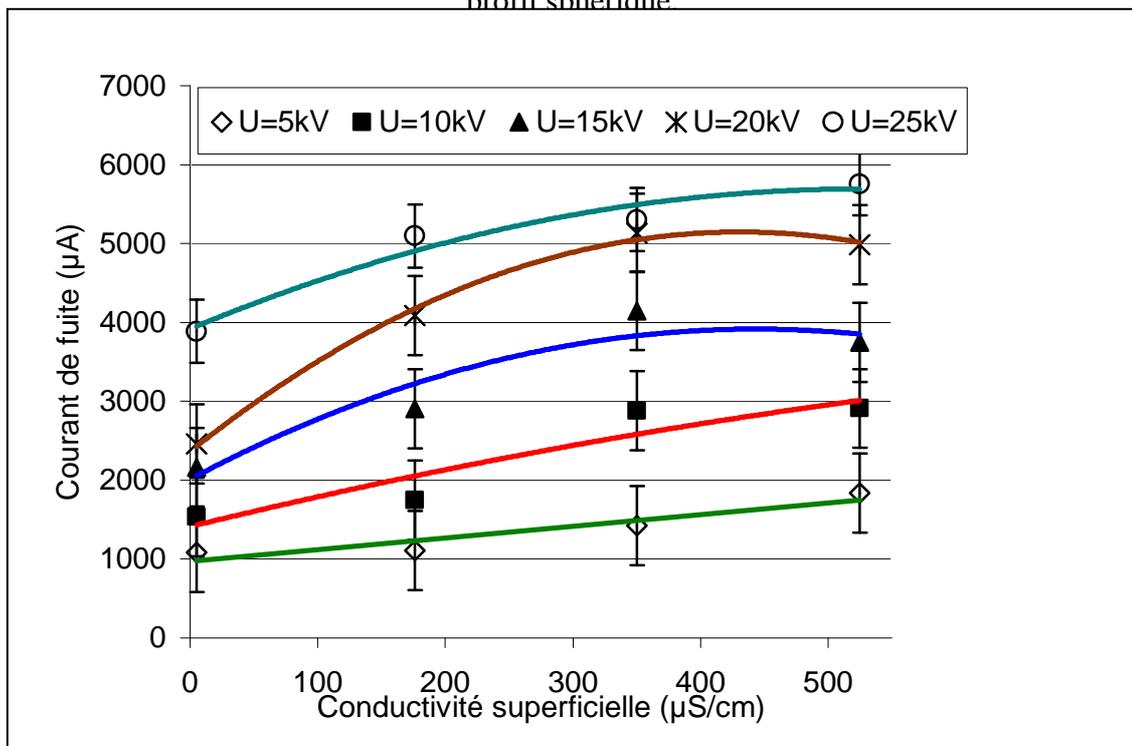
Pour les isolateurs à profil standard, l'augmentation de la valeur du courant de fuite est linéaire pour tous les niveaux de tension (**Fig. III.60**), mais pour les deux autres profils (sphérique et antibrouillard) l'évolution est linéaire pour les niveaux de tension relativement faibles (inférieurs à 20 kV pour les isolateurs à profil sphérique et inférieurs à 15 kV pour les isolateurs à profil antibrouillard).cela est peut être du aux formes des différents profils (**Fig. III.63** et **Fig. III.64**).



**Figure III.62** : Caractéristiques courant de fuite-conductivité pour les isolateurs à profil standard.



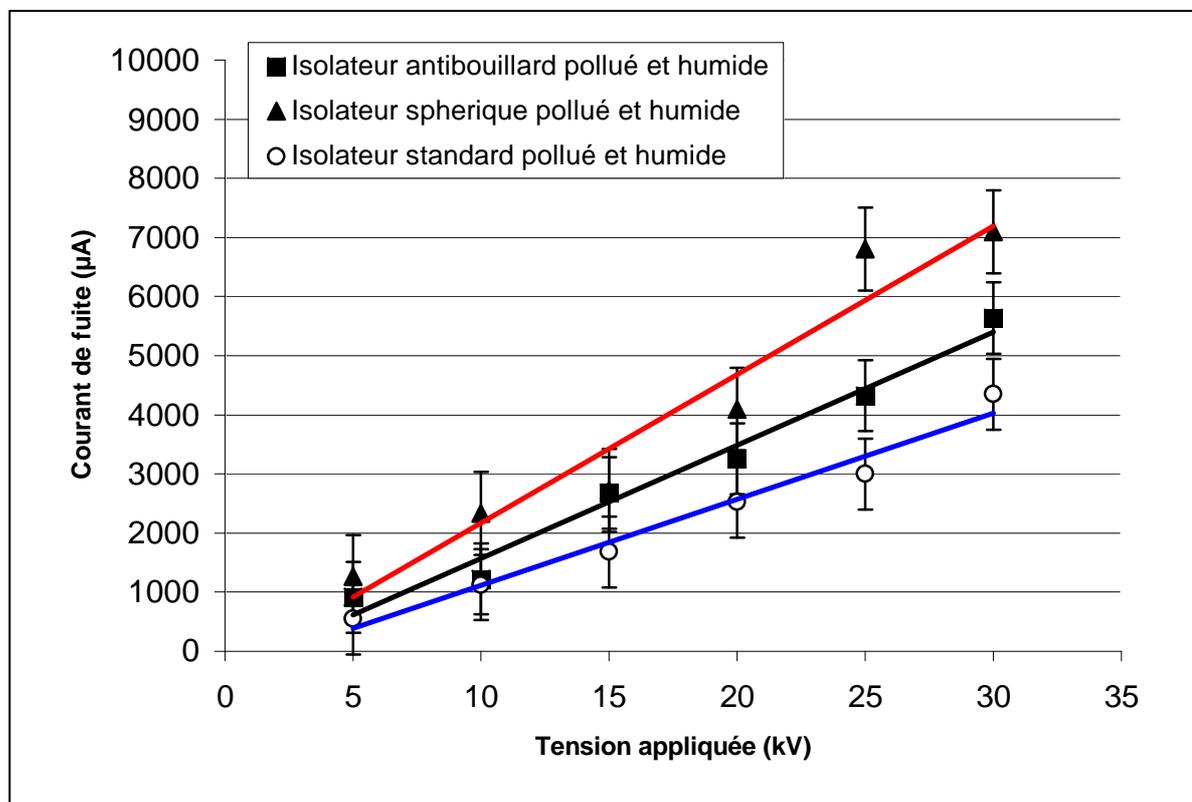
**Figure III.63 :** Caractéristiques courant de fuite-conductivité pour les isolateurs à profil sphérique



**Figure III.64 :** Caractéristiques courant de fuite-conductivité pour les isolateurs à profil antibrouillard.

### III.5.2.5. Influence du profil de l'isolateur:

Le profil de l'isolateur a une grande influence sur sa rigidité diélectrique et son courant de fuite. Nous remarquons que la valeur du courant de fuite pour la même pollution qui est l'eau d'une conductivité égale à  $525 \mu\text{S}/\text{cm}$ , et pour le même niveau de tension, est plus important pour les isolateurs à profil sphérique que celui des isolateurs à profil antibrouillard, et ce dernier est plus important que celui des isolateurs à profil standard. Ce qui veut dire que la rigidité diélectrique des isolateurs à profil standard est élevée par rapport à celle à profil antibrouillard et la rigidité des ces dernier est élevée par rapport à celle des isolateurs à profil sphérique. Cela est dû essentiellement à la longueur de la ligne de fuite (**Fig. III.57**).



**Figure III.57 :** Comparaison entre les courants de fuite des différents profils des isolateurs.

**III.6. Conclusion :**

Après avoir effectué les essais de contournement des isolateurs, nous avons pu constater l'influence négative de la pollution qui se manifeste par la diminution de la tension de tenue des isolateurs. Cette diminution sera plus importante si la pollution est humidifiée.

En analysant la forme et l'amplitude du courant de fuite, nous pourrions déduire des informations sur la sévérité de la pollution du site où est installé l'isolateur, sur son état (sèche ou humide) et même sur sa répartition (couche de pollution continue ou discontinue).

L'augmentation de la conductivité des agents polluants joue un rôle important dans l'augmentation de la valeur du courant de fuite et l'allongement de l'arc jusqu'au contournement total de l'isolateur pollué.

Chapitre IV  
*Modèle expérimental.*

## *Introduction*

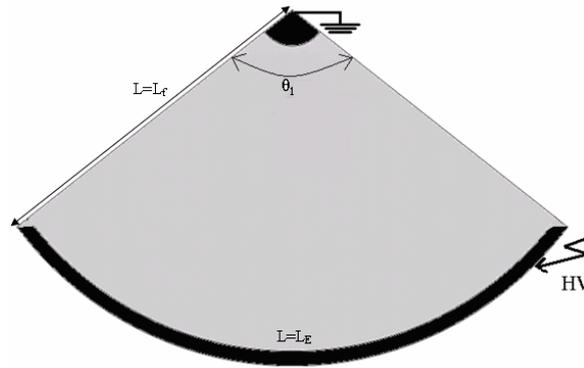
Afin de mieux étudier le comportement des isolateurs, différents modèles de laboratoire ont été proposés dans la littérature [1, 27, 28]. En effet, les isolateurs réels sont souvent remplacés par des modèles de géométrie simple. Dans ces modèles, les formes complexes des isolateurs sont représentées par des rectangles équivalents et la ligne de fuite de l'isolateur par la longueur inter-électrode. Même si ces isolateurs ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent tout de même une meilleure visualisation du phénomène des décharges électriques.

De ces investigations, il apparaît que le courant de fuite offre un atout primordial pour la surveillance du comportement des isolateurs. La valeur de ce courant nous permet d'apprécier le degré de dégradation du système isolant.

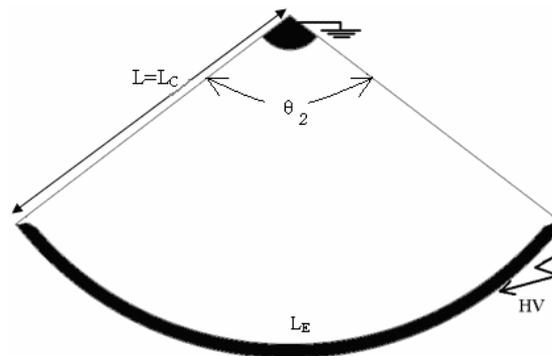
Le but de ce chapitre est de concevoir et réaliser un modèle expérimental qui tient compte de la forme géométrique de l'isolateur, dont les résultats obtenus seront comparés à ceux obtenus sur un isolateur réel (tension de contournement et courant de fuite).

### *IV.1. Description du modèle proposé:*

A cause de la symétrie de l'isolateur nous proposons un modèle plan dont la forme est une portion de disque. Ce modèle est constitué d'une plaque isolante en verre, munie de deux électrodes, l'une circulaire (représente le capôt) dont le rayon est de 80 mm reliée à la terre et l'autre curviligne en forme d'arc circulaire d'angle  $\theta$  est mise à la borne haute tension. Ces électrodes sont réalisées avec du papier en Aluminium dont l'épaisseur est de  $3\mu\text{m}$ . La distance inter-électrodes  $L$  est fixée selon l'état de surface ( $L=L_F = 375$  mm si l'isolateur est à l'état humide,  $L=L_C=230$  mm si non). (**Fig. IV.1 et Fig. IV.2**).



**Figure IV.1 :** Modèle expérimental proposé (pollué)



**Figure IV.2 :** Modèle expérimental proposé (propre).



**Figure IV.3 :** Photo du modèle expérimental proposé.

- $L_F$ : distance entre électrodes, représente la ligne de fuite (cm).
- $L_C$ : distance entre électrodes, représente la ligne de contournement (cm).
- $L_E$ : La longueur de l'électrode mise sous tension d'essai, elle est égale au périmètre jupe de l'isolateur choisit
- $\theta_i$  : Angle choisit fixe tel que:

$$\theta_1 = \frac{L_E}{L_F} = \frac{256 * \pi}{375 + 40} = 1.94rd \quad \text{et} \quad \theta_2 = \frac{L_E}{L_C} = \frac{256 * \pi}{230 + 40} = 2.98rd$$

## ***IV.2. Mode opératoire:***

### ***IV.2.1. Préparation du modèle:***

Avant chaque série d'essais, la plaque isolante est bien nettoyée, puis imbibée de gaz oïl dans les endroits d'emplacement des électrodes en aluminium, de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les électrodes. Le verre est ensuite essuyé avec du coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer toute trace de gaz oïl sur la plaque isolante.

Le modèle est disposé horizontalement sur un support en Plexiglas; le tout étant posé sur une table en bois. Le modèle se trouve ainsi placé à environ un mètre vingt du sol, de manière à éviter tout phénomène de parasite dû au sol et aux bobinages du transformateur.

### ***N.B.***

Pour pouvoir comparer les résultats du modèle proposé avec ceux d'un isolateur réel, nous avons choisit comme isolateur, l'isolateur à profil antibrouillard.

En plus du modèle proposé nous avons effectué les mêmes essais sur l'isolateur à profil antibrouillard, ce dernier est bien nettoyé à l'eau distillée en suite à l'alcool isopropylique.

### ***IV.2.2. Application de la couche de pollution:***

La couche polluante est réalisée en humidifiant les surfaces de l'isolateur avec de l'eau distillée que nous dosons par du NaCl pour obtenir la conductivité désirée.

L'humidification s'est effectuée au moyen d'un pulvérisateur manuel à une distance de 1 m autour de l'objet d'essai, pour éviter la chute de grosses gouttelettes sur celui-ci.

Pour assurer l'uniformité de la couche polluante et donc une même densité superficielle de la pollution, nous avons gardé la même méthode de l'humidification durant tous les essais (même nombre de pulvérisations de chaque côté du modèle et même distance autour du model).

### ***IV.2.3. Procédés d'essais:***

Les essais que nous effectuons nous permettent de faire une analyse de l'évolution du courant de fuite et de la tension de contournement ainsi que le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée sous différentes conditions. En outre une comparaison entre le comportement du modèle de laboratoire et l'isolateur réel est faite.

#### ***IV.2.3.1. Tension de contournement:***

La mesure de la tension de contournement a été effectuée pour aussi bien le modèle que pour l'isolateur. Au moins cinq valeurs ont été relevées à l'aide d'un voltmètre de crête. Les valeurs de la tension de contournement ont été relevées pour un état sec et pour l'état humide ( $\gamma=525 \mu\text{S/cm}$ ) de sa surface.

#### ***IV.2.3.2. courant de fuite:***

Pour quatre conductivités superficielles distinctes, nous appliquons des paliers de tension allant de 5 à 30 kV par pas de 5 kV, pour chaque niveau de tension, nous prélevons cirque fois le signal du courant de fuite ainsi que sont amplitude.

#### ***IV.2.3.3. déphasage courant - tension:***

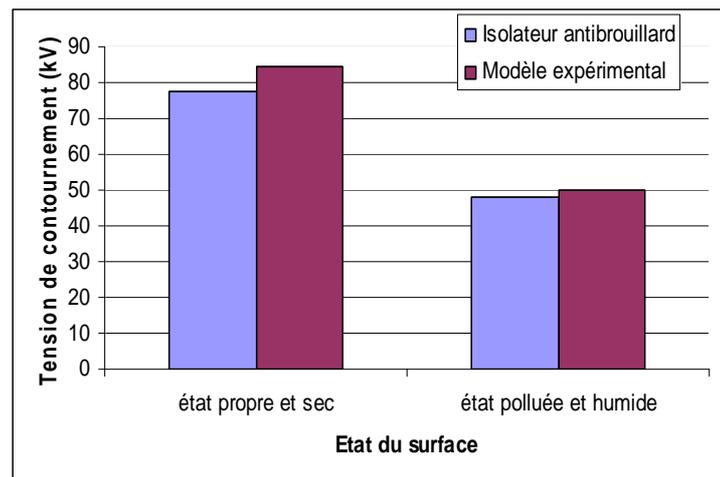
La mesure du déphasage est effectuée à l'aide d'un oscilloscope TEKTRONIX à fréquence d'échantillonnage de 100 MHz et à deux canaux d'acquisition des signaux. Nous avons photographié ainsi des images de déphasage entre l'onde du courant de fuite et l'onde de la tension au secondaire du transformateur pour quelque cas de configurations. Ces configurations concernent les deux cas extrêmes et un cas intermédiaire.

### IV.3. Résultats et interprétations : (Annexe III)

#### IV.3.1. Tension de contournement:

Les résultats donnés par la figure IV.4 montrent une concordance entre les résultats obtenus sur modèle et ceux obtenus sur isolateur réel. Cette concordance dépende de l'état de surface.

Nous remarquons que l'écart relatif entre tensions de contournement pour une surface polluée et humide ne dépasse pas 3.6%, ce qui voudra dire que, à priori, le modèle présente une impédance électrique proche de celle de l'isolateur réel. Dans le cas d'une surface propre, l'écart relatif entre tensions de contournement est relativement plus important (7.9%). Ceci peut être justifié par la dégradation visible entre le capot et la surface de l'isolant (Fig. IV.5).



**Figure IV.4:** Comparaison des tensions de contournement entre le modèle et l'isolateur réel.



**Figure IV.5:** dégradation entre le capot et la surface de l'isolant

### ***IV.3.2. Courant de fuite:***

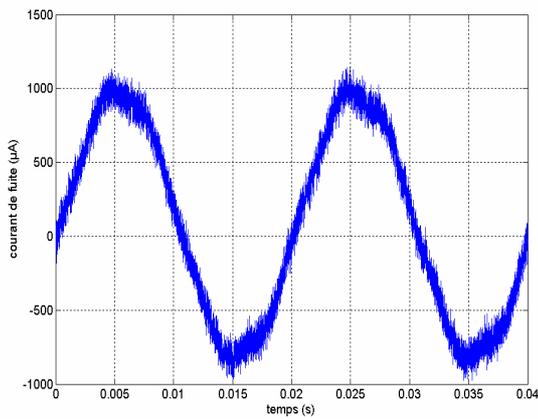
#### ***IV.3.2.1. Visualisation et analyse de la forme du signal de courant de fuite :***

Comme le montre les figures (**Fig. IV.6 à Fig. IV.29**), la forme du courant de fuite varie selon la variation de deux paramètres: la conductivité superficielle et la tension appliquée. Pour un niveau de tension relativement faible ( $< 10$  kV), le courant de fuite est parfaitement sinusoïdal (**Fig. IV.6, Fig. IV.12 et Fig. IV.18**). En augmentant la tension, nous constatons des distorsions au niveau du signal de courant de fuite. La distorsion de la forme du signal est due à l'apparition de phénomènes d'ionisation (effet de couronne), avant création d'arcs électriques.

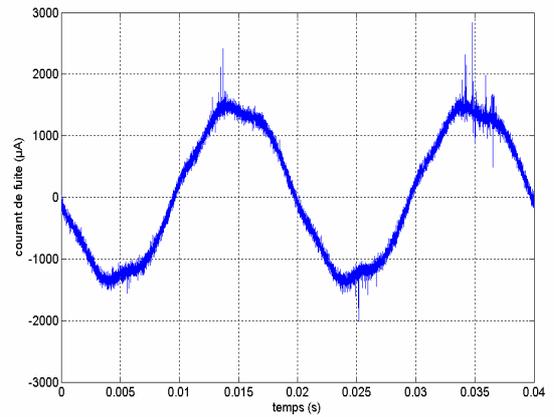
Dès le début d'apparition des premiers arcs, nous remarquons des impulsions au niveau des valeurs de crête du signal de courant. Le nombre de ces impulsions augmente lorsque la tension appliquée augmente (**Fig. IV.19 à Fig. IV.23**).

Nous remarquons également que dans le cas d'une conductivité superficielle élevée ( $> 525\mu\text{S/cm}$ ), les impulsions apparaissent rapidement (dès 5 kV) et ceci peut être justifié par la circulation d'un courant de fuite relativement élevé qui engendre un assèchement local de la surface de l'isolateur donc apparition d'arcs partiels.

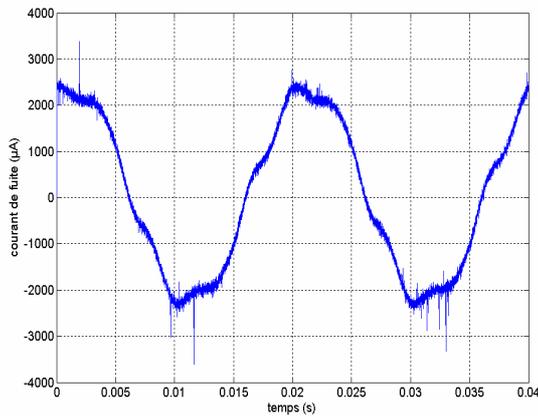
Les résultats obtenus sur le modèle de laboratoire sont presque identiques à ceux sur l'isolateur réel. La seule différence peut être remarquée sur la déformation du signal de courant de fuite. En effet la déformation du courant de fuite est plus accentuée pour l'isolateur réel.



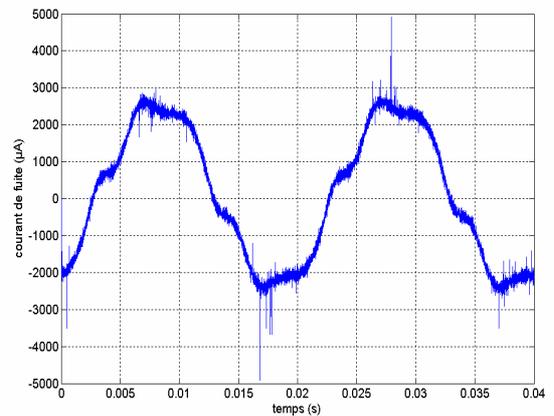
**Figure IV.6:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=5\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U = 5 \text{ kV}$ ).



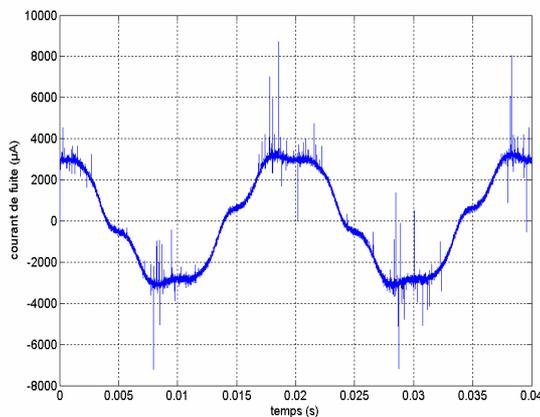
**Figure IV.7:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=5\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U = 10 \text{ kV}$ ).



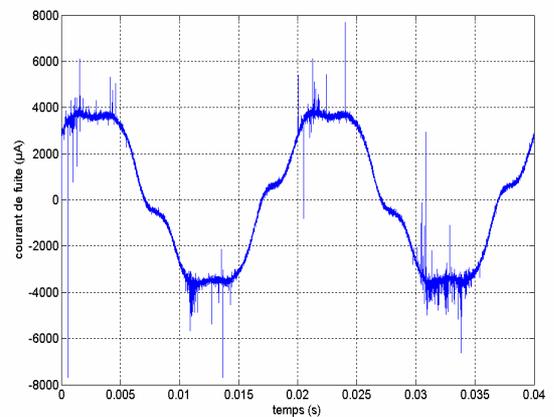
**Figure IV.8:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=5\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U = 15 \text{ kV}$ ).



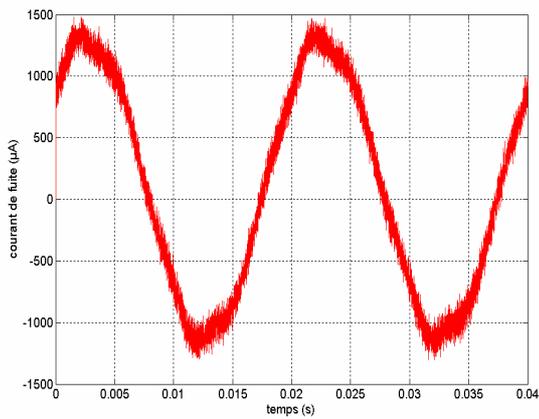
**Figure IV.9:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=5\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U = 20 \text{ kV}$ ).



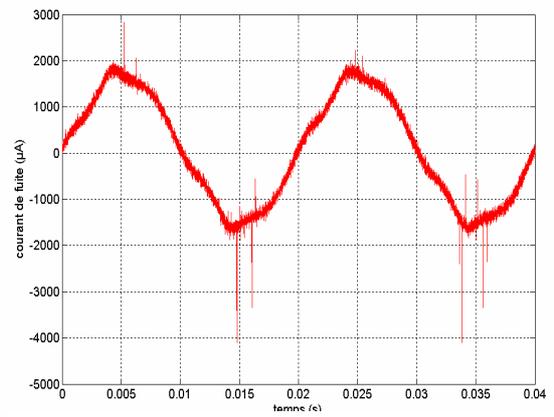
**Figure IV.10:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=5\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U = 25 \text{ kV}$ ).



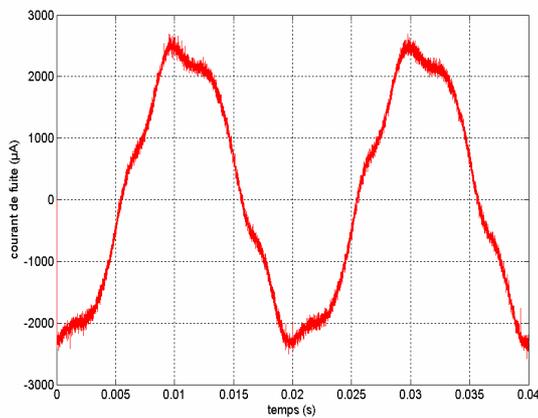
**Figure IV.11:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=5\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U = 30 \text{ kV}$ ).



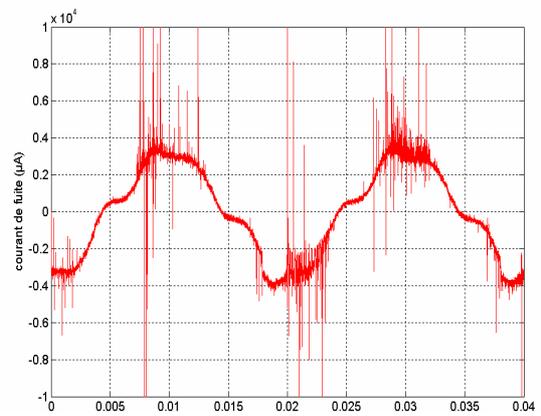
**Figure IV.12:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=175\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =5 \text{ kV}$ ).



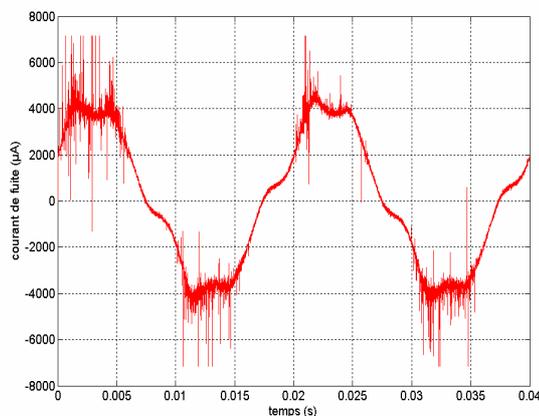
**Figure IV.13:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=175\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =10 \text{ kV}$ ).



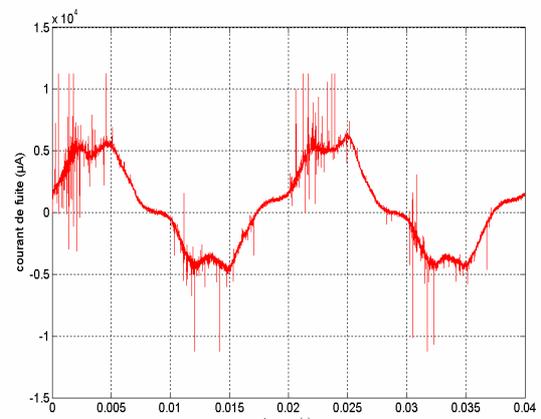
**Figure IV.14:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=175\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =15 \text{ kV}$ ).



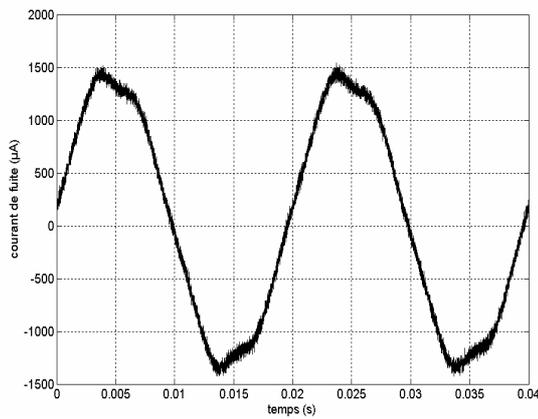
**Figure IV.15:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=175\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =20 \text{ kV}$ ).



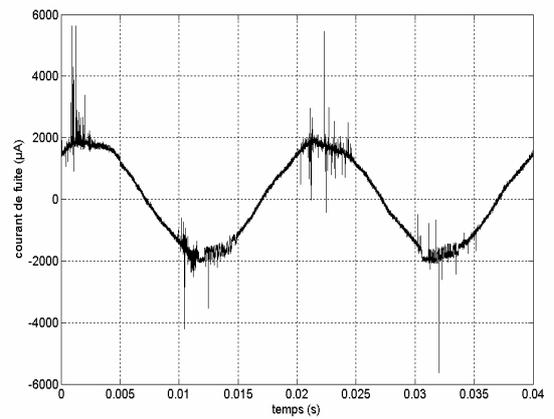
**Figure IV.16:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=175\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =25 \text{ kV}$ ).



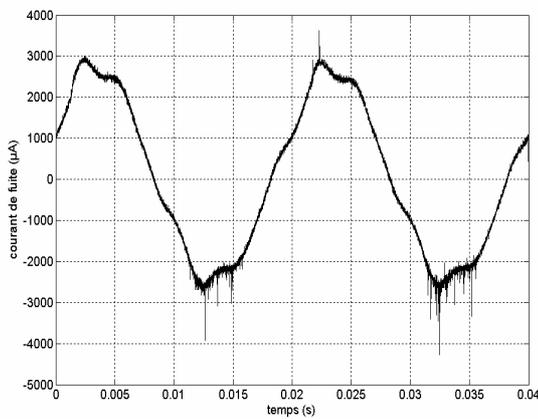
**Figure IV.17:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=175\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =30 \text{ kV}$ ).



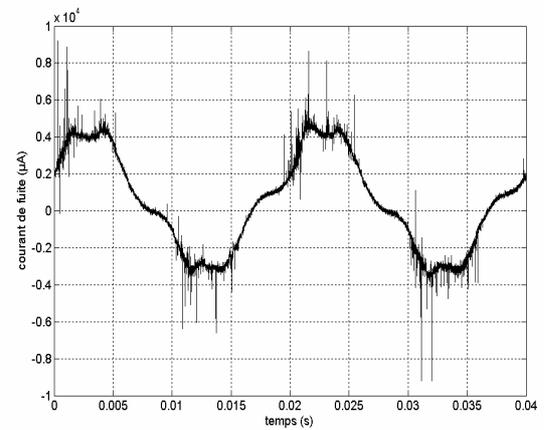
**Figure IV.18:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=350\mu\text{S/cm}$  et  $U =5$  kV)



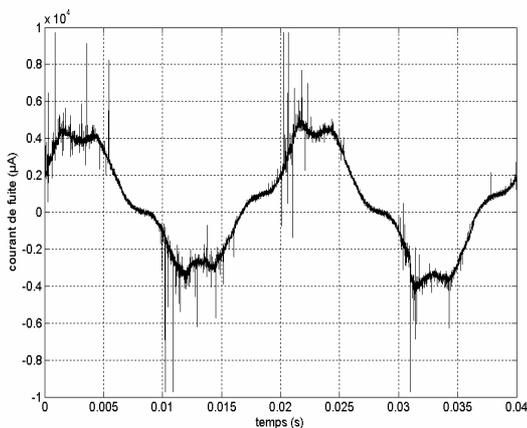
**Figure IV.19:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=350\mu\text{S/cm}$  et  $U =10$  kV).



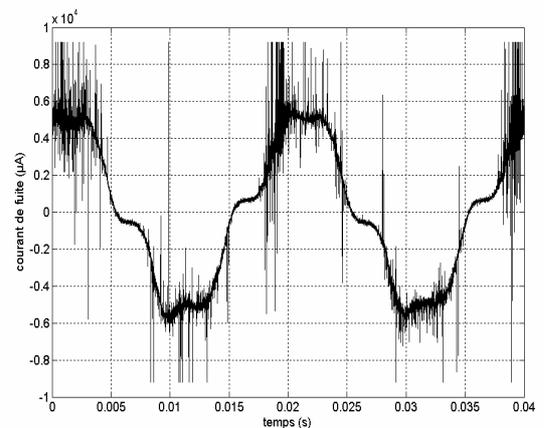
**Figure IV.20:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=350\mu\text{S/cm}$  et  $U =15$  kV).



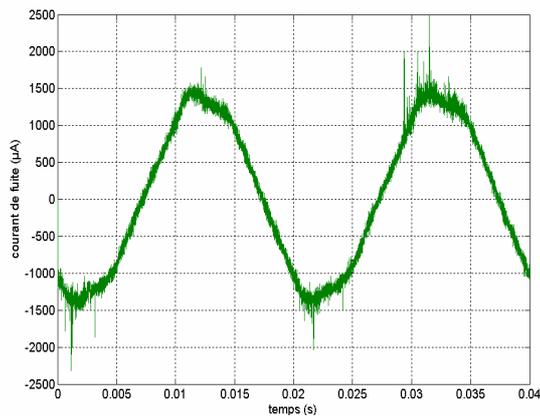
**Figure IV.21:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=350\mu\text{S/cm}$  et  $U =20$  kV).



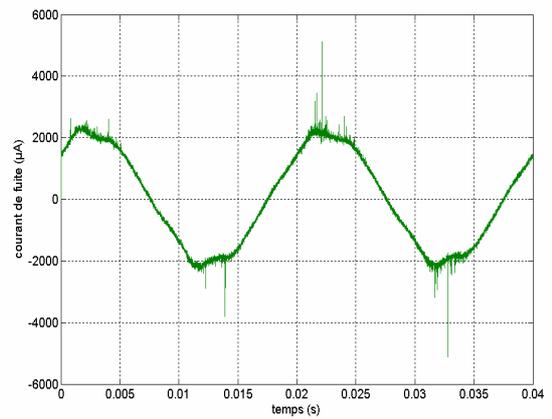
**Figure IV.22:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=350\mu\text{S/cm}$  et  $U =25$  kV).



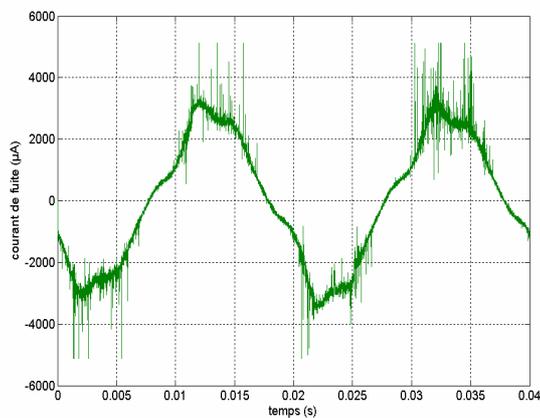
**Figure IV.23:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=350\mu\text{S/cm}$  et  $U =30$  kV).



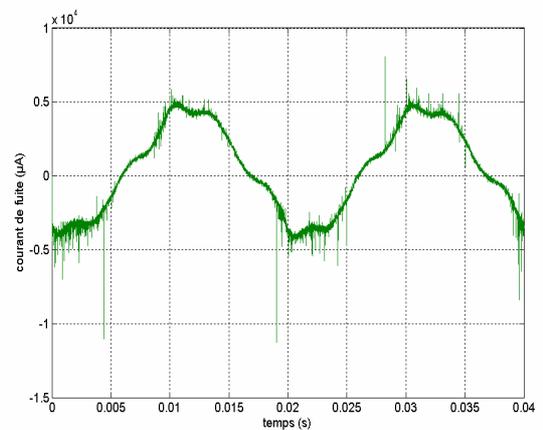
**Figure IV.24:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=525\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =5 \text{ kV}$ ).



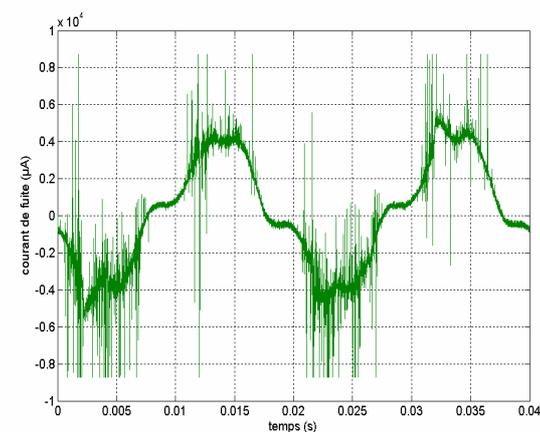
**Figure IV.25:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=525\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =10 \text{ kV}$ ).



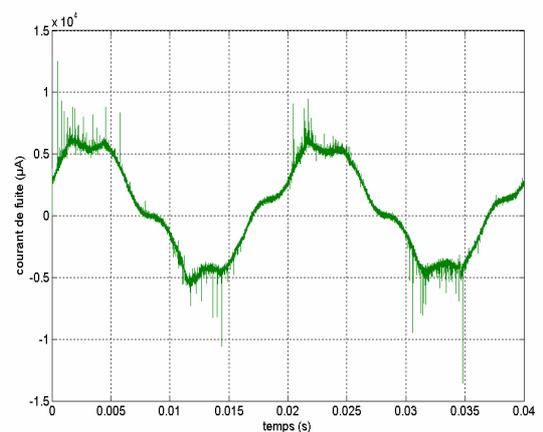
**Figure IV.26:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=525\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =15 \text{ kV}$ ).



**Figure IV.27:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=525\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =20 \text{ kV}$ ).



**Figure IV.28:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=525\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =25 \text{ kV}$ ).



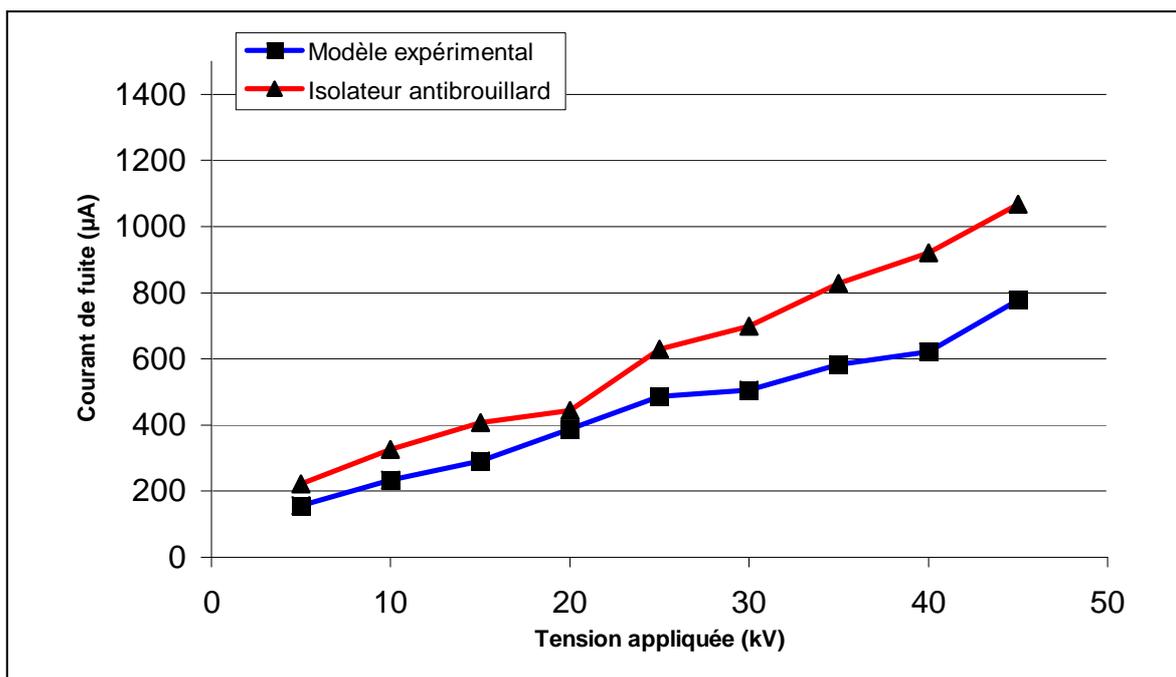
**Figure IV.29:** Signal du courant de fuite ( $\gamma=525\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $U =30 \text{ kV}$ ).

### IV.3.2.2. Comparaison de la caractéristique courant de fuite-tension appliquée:

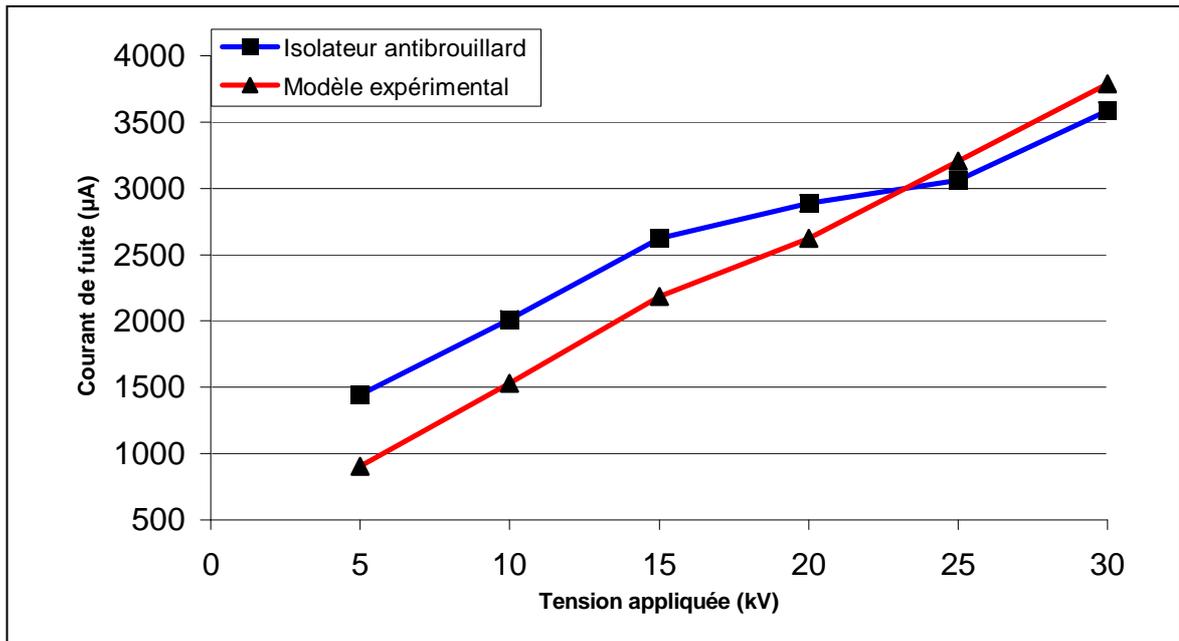
Pour les deux configurations (modèle expérimental et réel) l'amplitude du courant de fuite augmente avec l'augmentation de la tension appliquée, cette augmentation est presque linéaire tant que l'isolateur reste humide. L'isolateur pollué humide se comporte donc comme une résistance.

Pour un état propre et sec de la surface de l'isolateur, nous remarquons qu'il existe un écart entre les deux modèles, cet écart augmente avec l'augmentation de la tension appliquée (**Fig. IV.30**).

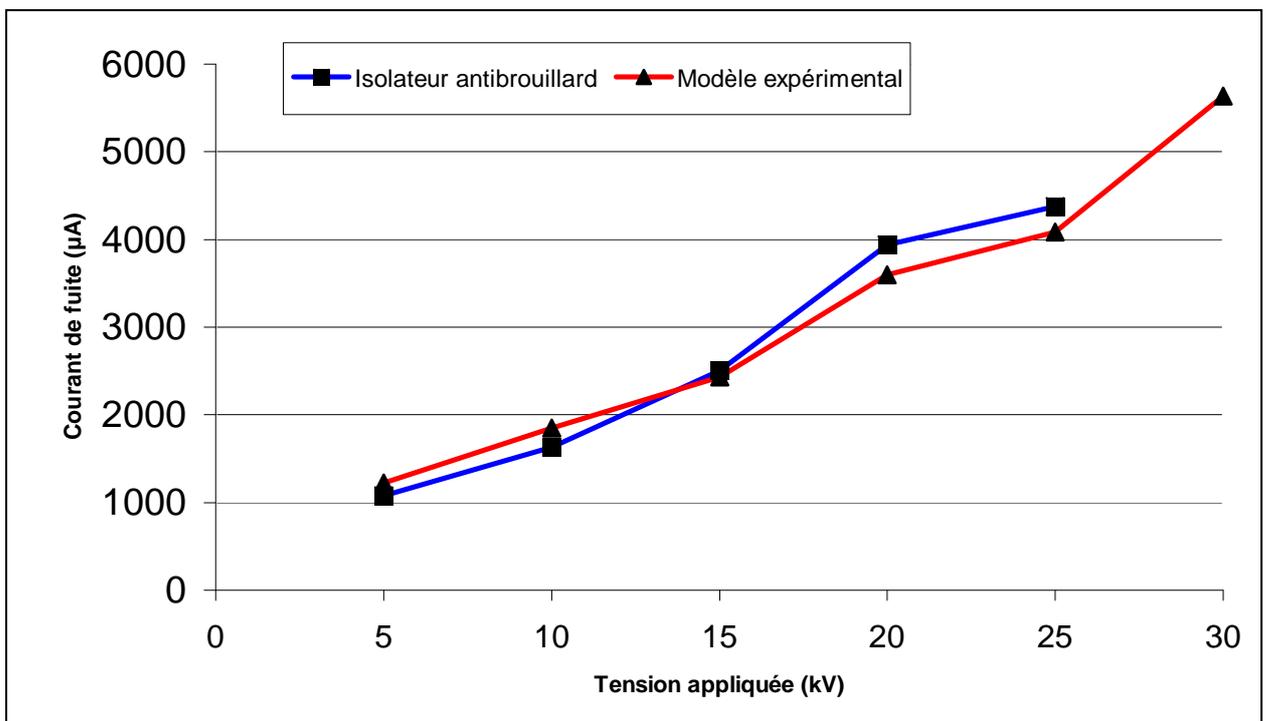
Dans le cas d'une surface polluée et humide, nous observons que ces deux caractéristiques sont très proches pour des niveaux de tension élevés alors qu'une divergence significative pour les faibles niveaux de tension est visible (**Fig. IV.31 à Fig. IV.34**).



**Figure IV.30 :** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée (état propre et sec).



**Figure IV.31:** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée ( $\gamma=5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).



**Figure IV.32:** Courant de fuite en fonction de la tension appliquée ( $\gamma=175 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

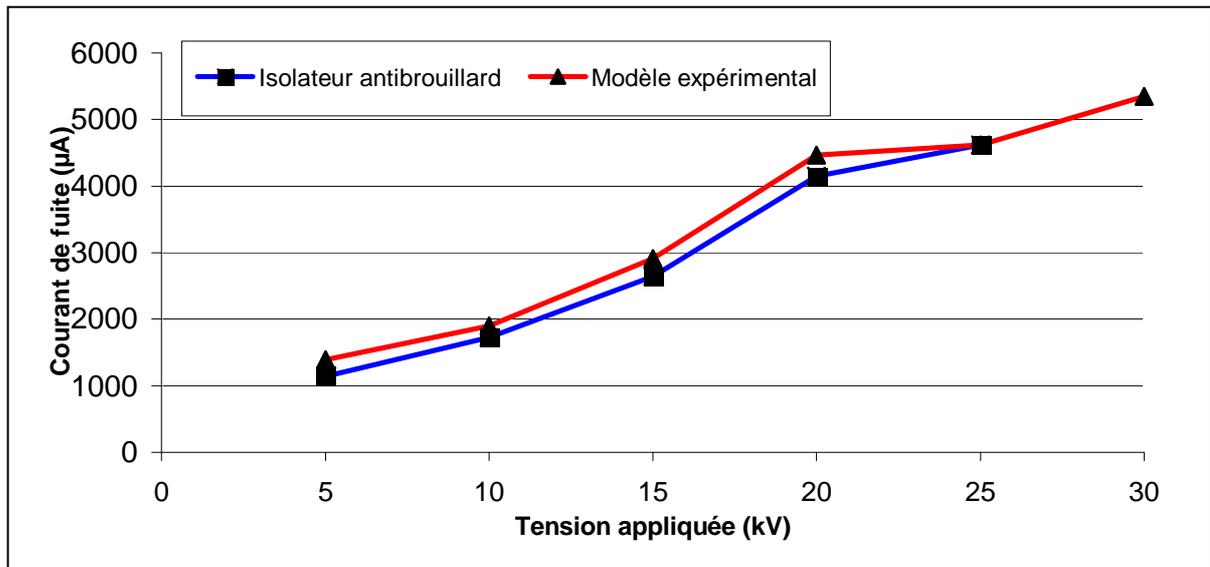


Figure IV.33: Courant de fuite en fonction de la tension appliquée ( $\gamma=350 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

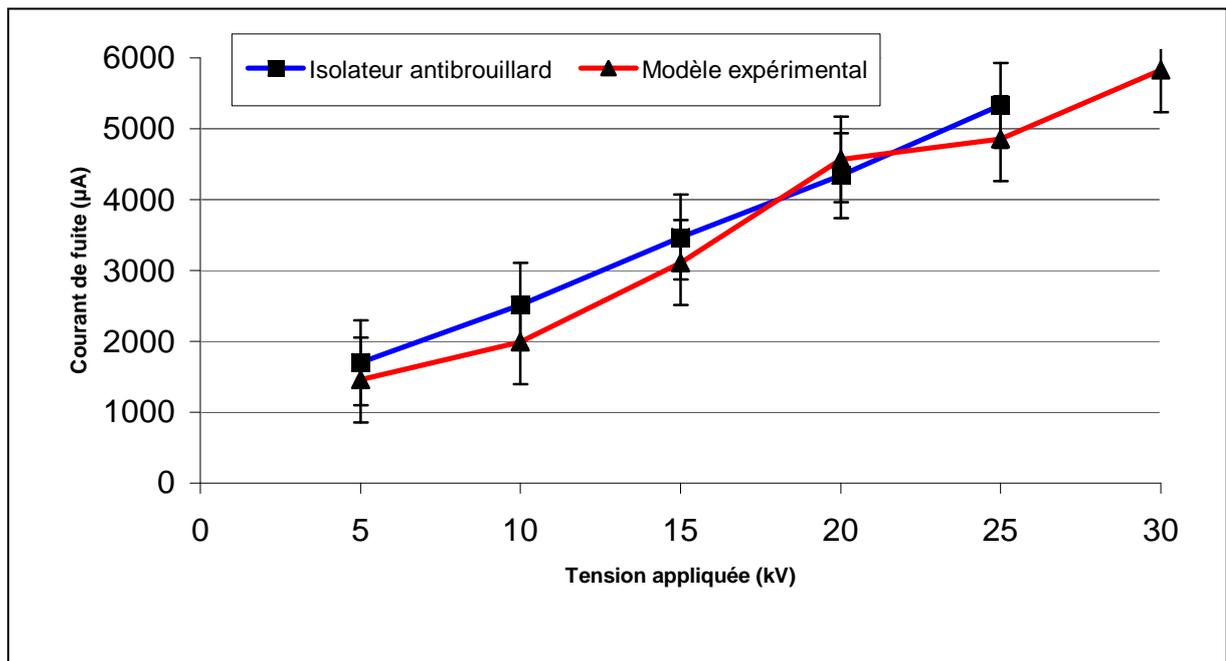


Figure IV.34: Courant de fuite en fonction de la tension appliquée ( $\gamma=525 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

### IV.3.2.3. Influence de la conductivité:

Les courbes des figures IV.35 et IV.36 représentent la variation du courant de fuite en fonction de la conductivité superficielle pour différents paliers de tension appliquée. Le courant de fuite croît avec l'accroissement de la conductivité. Ceci s'explique par la diminution de l'impédance vue entre les deux électrodes avec l'augmentation de la conductivité superficielle.

Les résultats obtenus à l'aide du modèle expérimental et du modèle réel concernant la variation du courant de fuite en fonction de la conductivité superficielle montrent qu'il existe une corrélation entre les deux modèles. (Fig. IV.37 à Fig. IV.39).

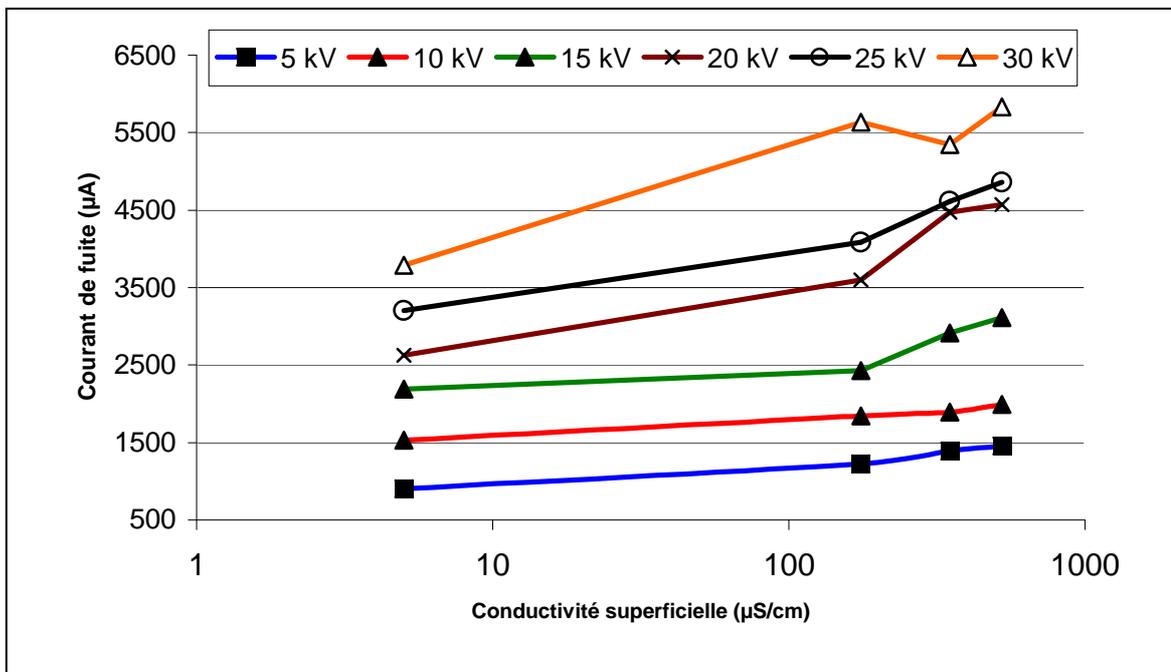


Figure IV.35 : Caractéristiques courant de fuite-conductivité pour le modèle expérimental.

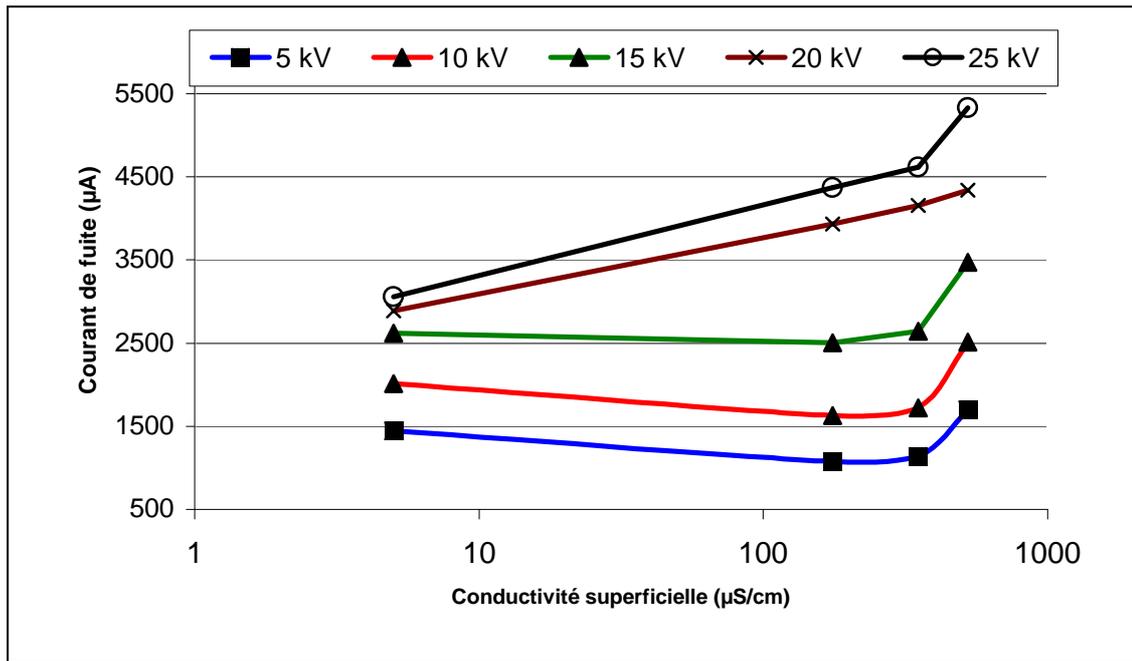


Figure VI.36 : Caractéristiques courant de fuite-conductivité pour l'isolateur antibrouillard.

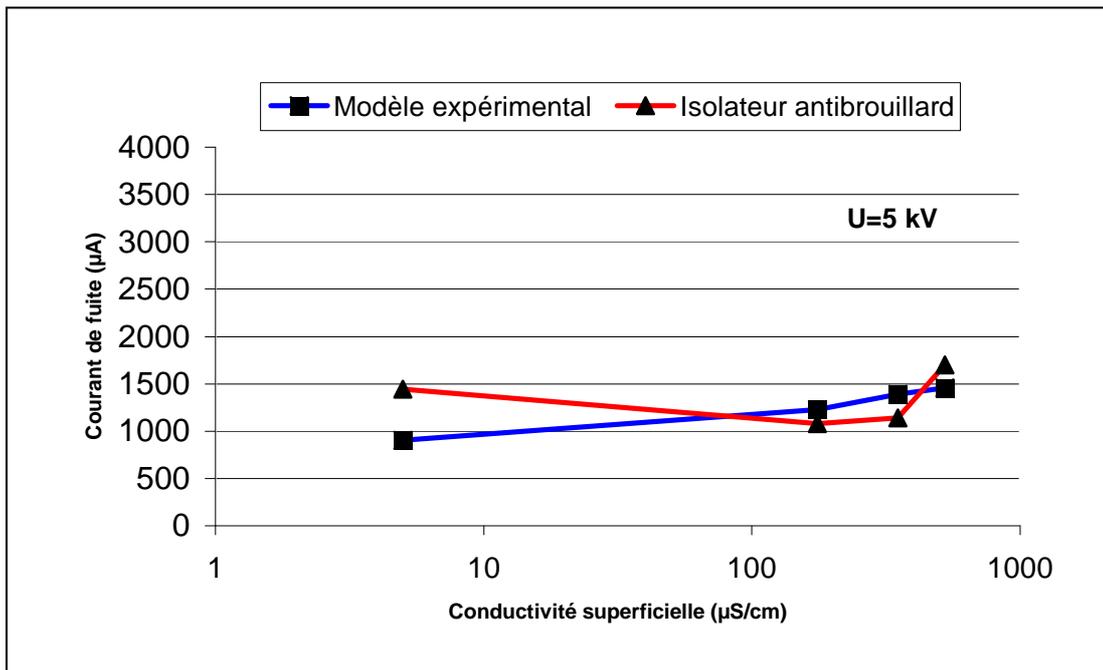


Figure VI.37 : Courant de fuite-conductivité

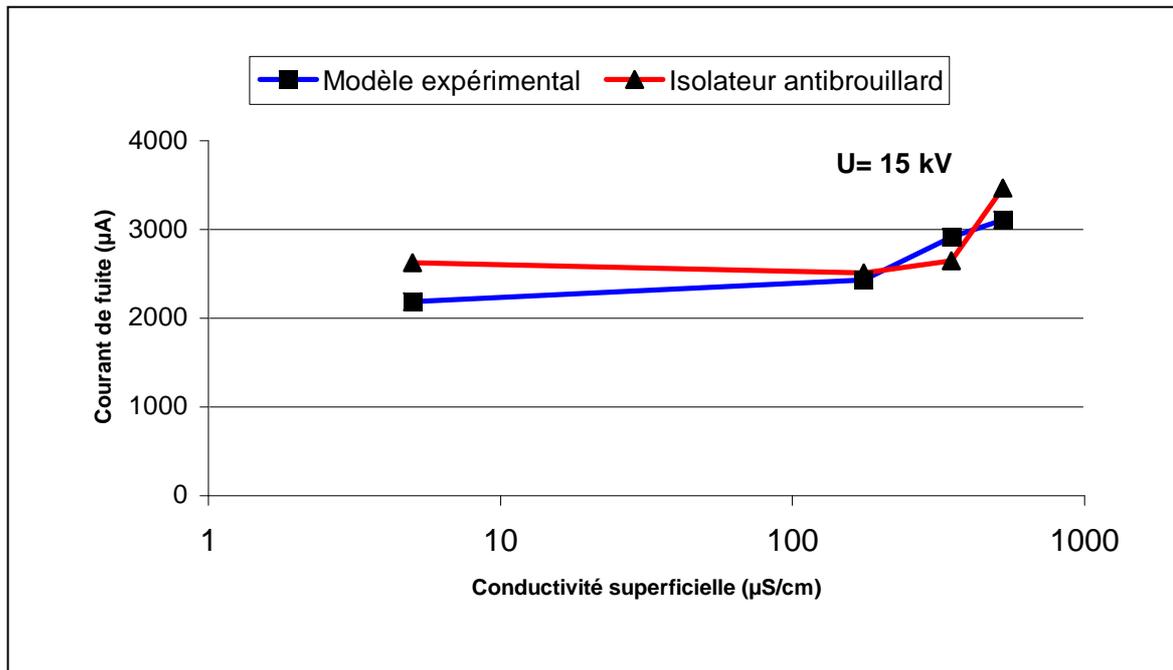


Figure IV.38 : Courant de fuite-conductivité.

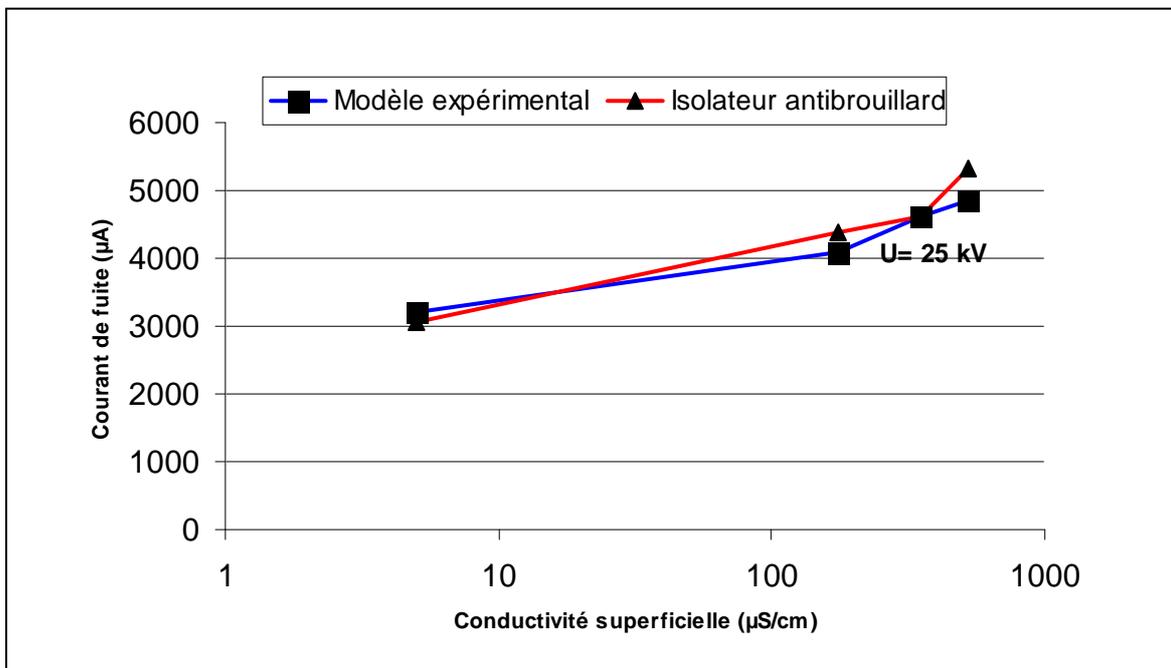
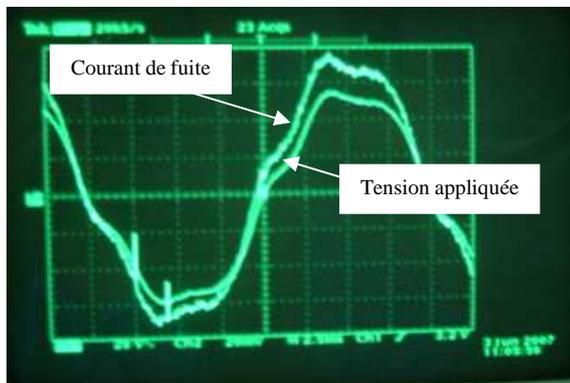


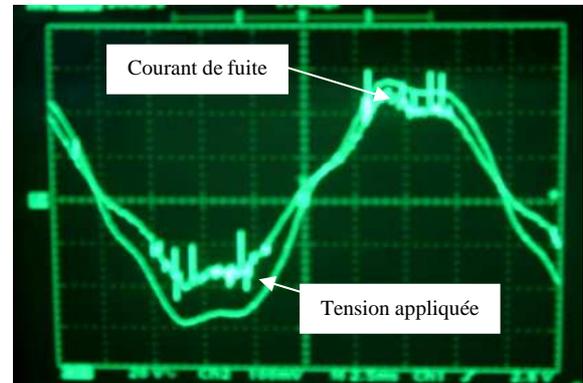
Figure IV.39 : Courant de fuite-conductivité.

### IV.3.3. Déphasage courant -tension:

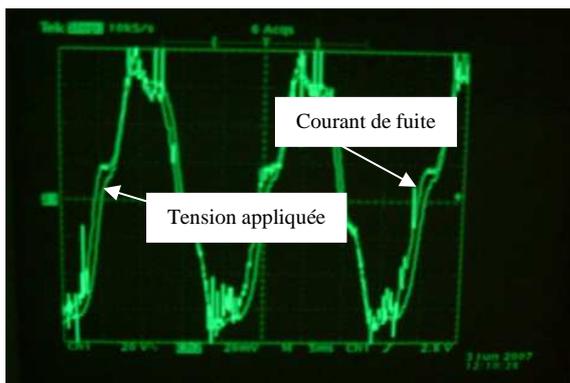
La variation de la tension d'alimentation et/ou de la conductivité superficielle engendre une variation au niveau du déphasage courant –tension (**Figures IV.40 à IV.45**).



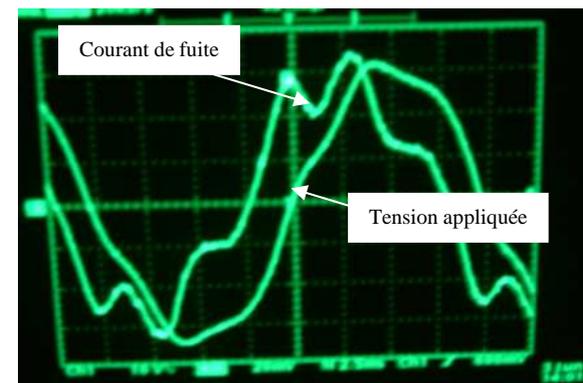
**Figure IV.40:** Courant de fuite -tension appliquée pour le modèle expérimental ( $V=20\text{ kV}$ ,  $\nu=5\text{ uS/cm}$ )



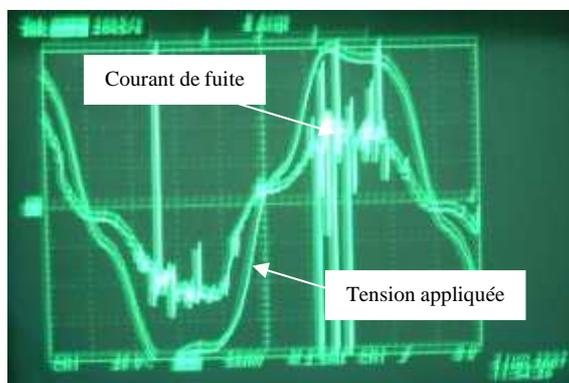
**Figure IV.41:** Courant de fuite -tension appliquée pour l'isolateur antibrouillard ( $V=5\text{ kV}$ ,  $\nu=5\text{ uS/cm}$ )



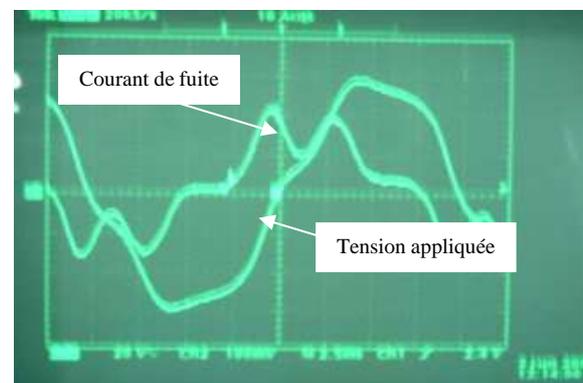
**Figure IV.42:** Courant de fuite -tension appliquée pour le modèle expérimental ( $V=10\text{ kV}$ ,  $\nu=525\text{ uS/cm}$ )



**Figure IV.43:** Courant de fuite -tension appliquée pour l'isolateur antibrouillard ( $V=10\text{ kV}$ ,  $\nu=175\text{ uS/cm}$ )



**Figure IV.44:** Courant de fuite -tension appliquée pour le modèle expérimental ( $V=20\text{ kV}$ ,  $\nu=525\text{ uS/cm}$ )

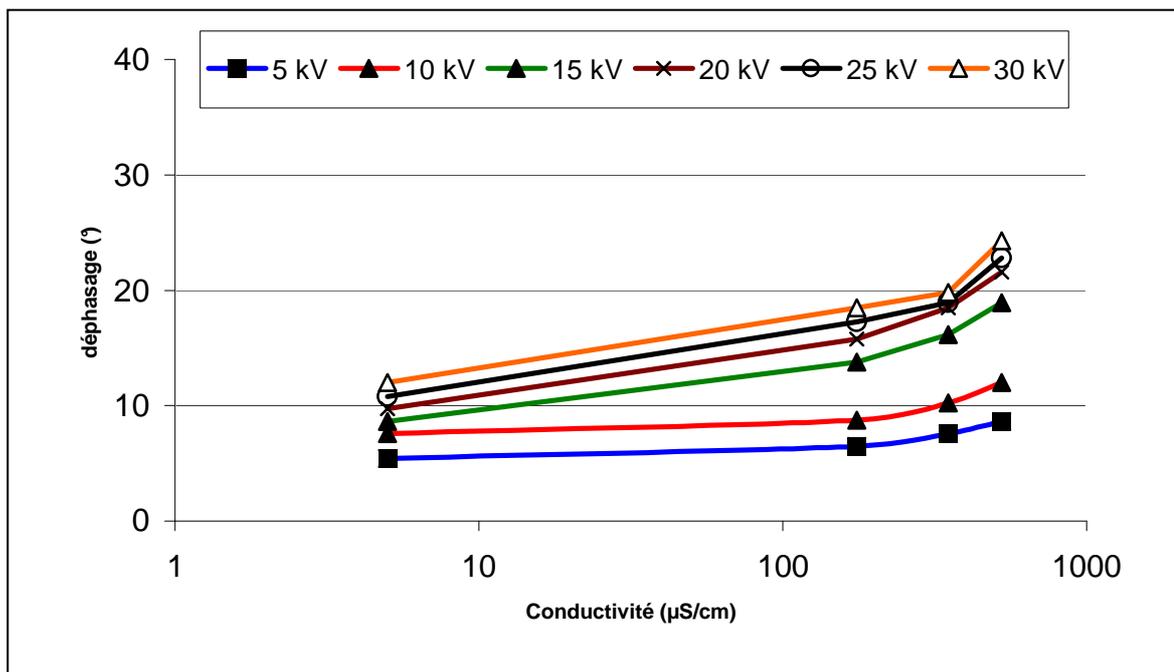


**Figure IV.45:** Courant de fuite -tension appliquée pour l'isolateur antibrouillard ( $V=20\text{ kV}$ ,  $\nu=350\text{ uS/cm}$ )

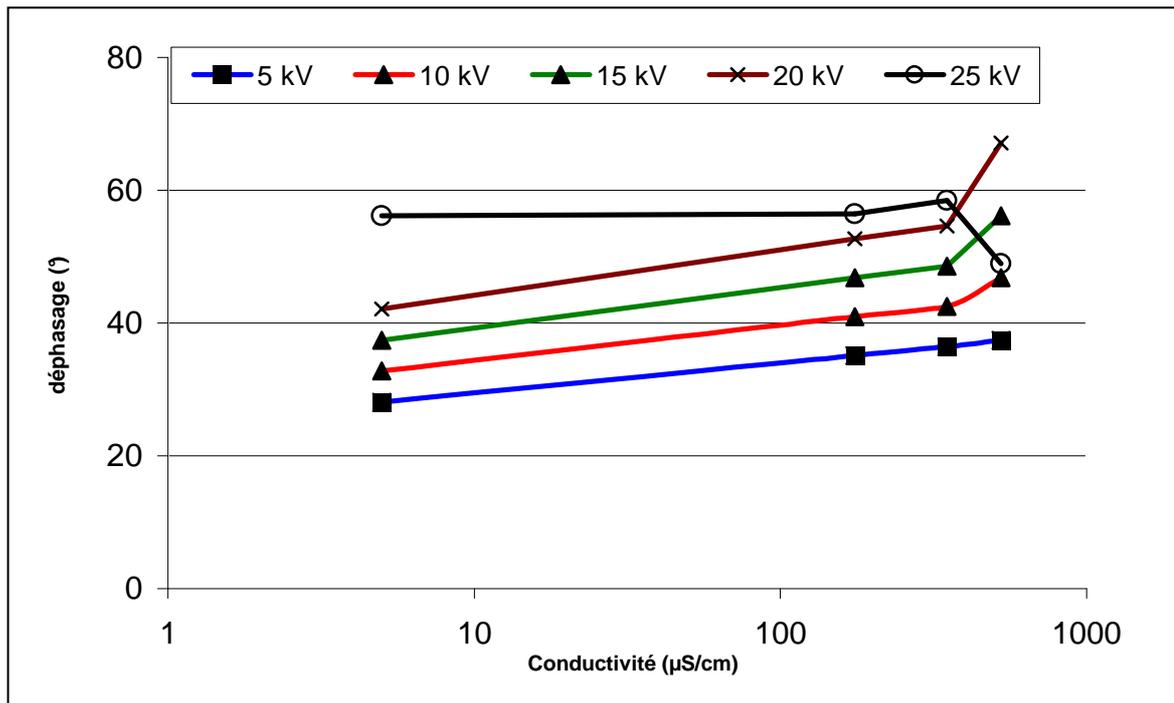
### IV.3.3.1. Influence de la conductivité superficielle:

Les résultats illustrés par les figures (Fig. IV.46 et Fig.IV.47) peuvent être résumés de la manière suivante:

- L'augmentation de la conductivité superficielle entraîne une augmentation du courant de fuite et donc une formation de bandes sèches sous l'effet de la chaleur qui en résulte et par conséquent une augmentation du déphasage.
- Le déphasage dans le cas de l'isolateur antibrouillard est supérieur au déphasage obtenu dans le cas du modèle expérimental. ceci est dû à la forme conique de l'isolateur antibrouillard qui permet une formation plus rapide des bandes sèches et sachant que ses nervures empêchent une pulvérisation complète de la surface de l'isolateur.



**Figure IV.46:** Caractéristique déphasage –conductivité superficielle pour le modèle expérimental



**Figure IV.47:** Caractéristique déphasage –conductivité superficielle pour l'isolateur antibrouillard

#### *IV.3.3.2. Influence de la tension appliquée:*

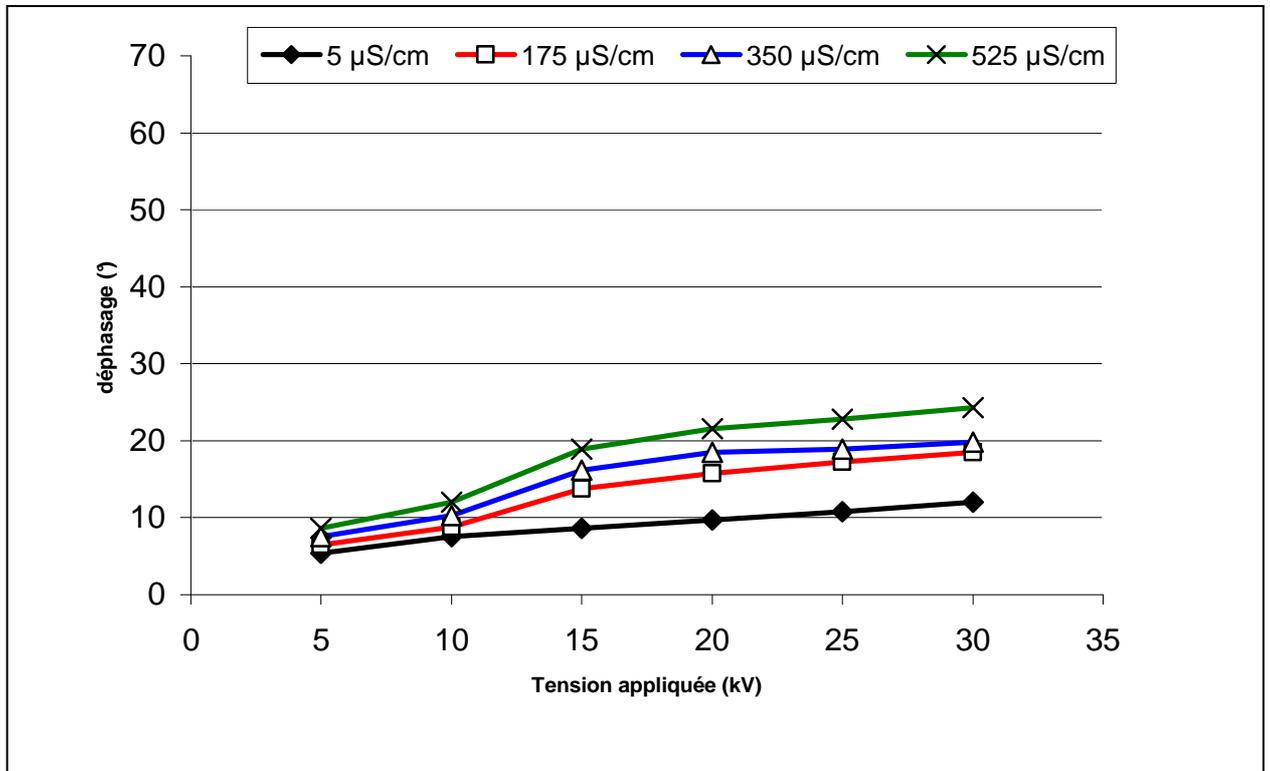
Des informations très intéressantes peuvent être obtenues en étudiant la caractéristique de déphasage courant -tension en fonction de la tension appliquée.

Dans les modèles réel et expérimental, nous remarquons que le déphasage augmente avec la tension appliquée, ce qui veut dire que l'impédance électrique est variable.

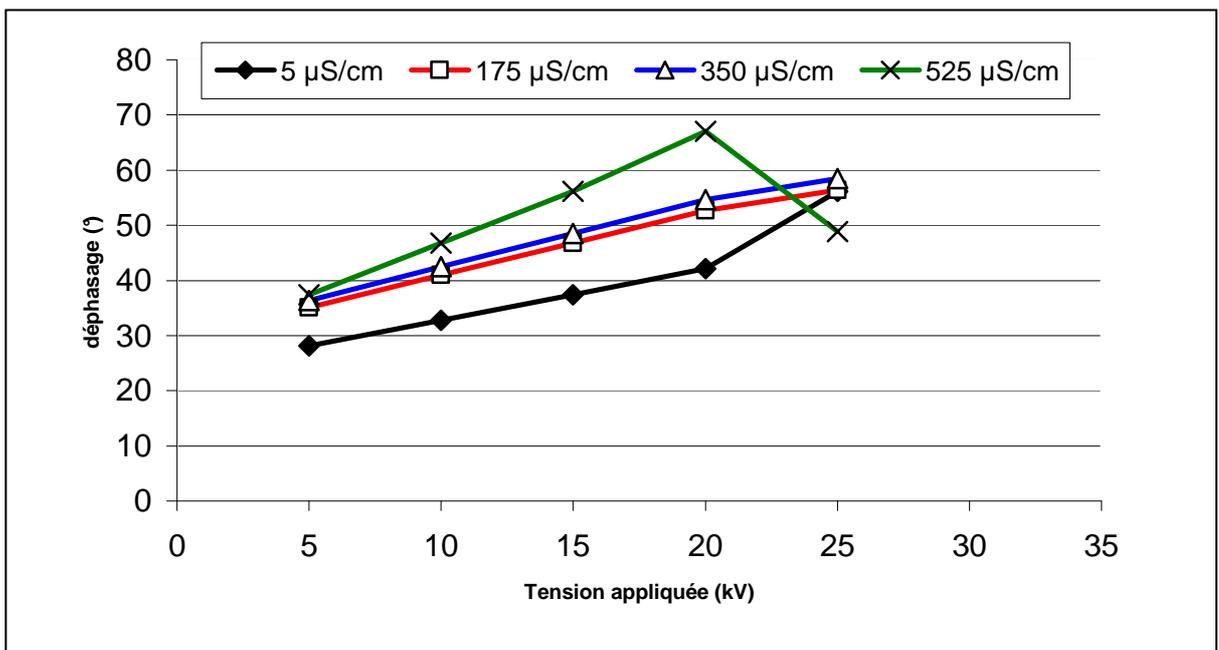
- Pour le modèle expérimental et pour les faibles niveaux de conductivités, nous remarquons une légère augmentation du déphasage lorsque la tension appliquée augmente. Pour des niveaux de conductivités relativement élevées l'augmentation de la tension appliquée engendre une augmentation du courant de fuite donc une apparition de zones sèches non contournées et par conséquent une augmentation de déphasage (**Fig. IV.48**).

- Pour le modèle réel, l'augmentation de la tension appliquée est accompagnée par une augmentation de déphasage, cette augmentation est plus rapide que dans le modèle. Ceci peut être justifié par la forme conique de l'isolateur qui permet une évaporation plus rapide sur la

surface extérieure de l'isolateur. Si la tension appliquée augmente en plus, il y aura apparition d'arcs partiels contournant les zones sèches, d'où une diminution de déphasage (**Fig. IV.49**).



**Figure IV.48:** Caractéristique déphasage – tension appliquée pour modèle



**Figure IV.49:** Caractéristique déphasage – tension appliquée pour l'isolateur

***IV.5. Conclusion:***

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus des différents essais effectués sur le modèle expérimental que nous avons proposé. La comparaison de ces résultats avec ceux du modèle réel montre qu'il existe une bonne corrélation entre ces deux modèles.

La distorsion de la forme du courant de fuite est très sensible à l'état de la surface. Par ailleurs, l'amplitude du courant de fuite augmente avec l'augmentation de la tension appliquée et/ou de la conductivité superficielle de l'isolateur ; cette augmentation est presque linéaire tant que l'état de la surface de l'isolateur reste humide.

Le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée dépend de l'état de la surface de l'isolateur d'une part, et d'autre, du niveau de la tension appliquée. En effet l'augmentation de cette dernière et/ou de la conductivité superficielle de l'isolateur entraîne une augmentation du courant de fuite et donc une formation de bandes sèches sous l'effet de la chaleur qui en résulte et par conséquent une augmentation du déphasage.

L'isolateur présente une impédance totale variable. La définition de cette impédance revient donc à la détermination de l'évolution du déphasage en fonction de la conductivité superficielle et de la tension appliquée.

*Conclusion Générale.*

### *Conclusion générale :*

Le fait d'effectuer ce travail au Laboratoire de Haute Tension à l'Ecole Nationale Polytechnique, nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la haute tension en général.

En général, la pollution pose d'immenses problèmes contraignants au bon fonctionnement et à la fiabilité de service des réseaux de transport d'électricité. Ceci conduit à intensifier les recherches concernant ce problème afin de proposer et de trouver des solutions efficaces pour éviter les contournements des isolateurs sous pollution.

La région électrique du centre Algérien (région d'Alger) est une région très active avec une population trop importante. Donc son réseau de transport d'énergie électrique doit être aussi important, ce qui est le cas.

Les conditions climatologiques ont une influence fondamentale sur l'état des dépôts polluants accumulés sur les surfaces des isolateurs, donc sur la tension de tenue de ces isolateurs. Après traitements des incidents qui ont eu lieu sur le réseau de 220 kV et qui sont dus à la pollution des isolateurs, et en tenant compte des conditions climatologiques, nous pouvons dire que la saison où le réseau est le plus exposé à ce problème est l'été. Le traitement des données concernant les précipitations pluviales durant les trois années considérées et en particulier l'année 2004 indique que les précipitations pluviales importantes ayant eu lieu durant le mois de mai (juste avant l'été), a réduit considérablement le nombre d'incidents durant l'été, donc durant l'année. A partir de là, nous suggérons aux exploitants des réseaux de transport d'électricité, comme première possibilité, un lavage manuel des isolateurs vers le mois de Mai de chaque année surtout pour les zones trouvées polluées.

Les principaux résultats que nous pouvons donner sur la base des essais effectués sur les isolateurs sous différentes conditions au laboratoire sont les suivants :

- Le degré de pollution influe directement sur la tension de contournement des isolateurs. En effet, l'augmentation du degré de pollution des isolateurs diminue énormément la tension de contournement, donc la tension de tenue.
- L'état de la surface (sec ou humidifié) agit fortement sur la tension de contournement des isolateurs, l'humidification des polluants diminue cette tension notablement.
- La valeur du courant de fuite augmente avec l'augmentation du degré de la pollution, principalement lorsque celle-ci est humidifiée.

## *Conclusion générale.*

---

- Le profil de l'isolateur aussi a une répercussion intéressante sur la valeur du courant de fuite. En particulier, si la longueur de fuite augmente, la valeur du courant de fuite diminue et l'inverse est juste.
- Le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée dépend de deux paramètres essentiels. En effet, l'augmentation de la tension appliquée et/ou de la conductivité superficielle de l'isolateur entraîne une augmentation du déphasage.

Dans le but de pouvoir simplifier les manipulations qui doivent être effectuées sur les isolateurs au laboratoire, nous proposons un modèle plan. Ce modèle simule un isolateur à profil antibrouillard de forme B. Après sa réalisation, nous avons effectué de nombreux essais sur le comportement de ce modèle expérimental, et nous avons obtenu les mêmes constats faits pour l'isolateur à profil antibrouillard de forme B concernant les tensions de contournement, le courant de fuite et même le déphasage entre ce dernier et la tension appliquée. Donc nous pouvons dire que notre modèle répond à notre besoin. Nous souhaitons néanmoins, que d'autres essais soient effectués sur ce même modèle afin de bien établir la bonne corrélation entre notre modèle et l'isolateur réel de haute tension considéré.

*Références  
Bibliographiques.*

- [1] A. MEKHALDI, " Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolateurs Polluées sous Tension Alternative 50 Hz ", Thèse de doctorat d'Etat, Laboratoire de Haute Tension, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Septembre 1999.
- [2] M. TEGUAR, "Modélisation d'Isolateurs Pollués Soumis a Divers Paramètres Electrogéométriques", Laboratoire de Haute Tension, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2004.
- [3] 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, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 1998.
- [4] Z. SAHLI, " Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur les Caractéristiques de Contournement des Isolateurs Réels Pollués sous Tension Continue ", Thèse de Magistère, Département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bédjaïa.
- [5] S. GUERFI, " Modélisation des Isolateurs de Haute Tension Pollués sous Tension Continue ", Thèse de Magistère, Laboratoire de Haute Tension, Département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bédjaïa.
- [6] Xing CHEN, " Modeling of Electrical Arc on Polluted Ice Surfaces ", philosophiae doctor, Département de génie électrique et de génie informatique école polytechnique de Montréal, février 2000.
- [7] M.TEGUAR, A.BOUBAKEUR, " Pollution des Isolateurs de Haute Tension ", Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.).
- [8] A, MEKHALDI, H, BOUDJELTHIA, " Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique de Annaba ", PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), juin 1984.

- [9] M. TERKMANI, M.BABOUAMER, " Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension ", PFE, USTO, juin 2005.
- [10] L. CHOUGUI, R. BELAICHA, " Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région d'Arzew ", PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), Janvier 1983.
- [11] 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 '' , PFE, Département d'électronique et d'électrotechnique, université des sciences et de la technologie d'Alger, Juin 1982.
- [12] Z. DJEMAI, F. BENNAI, " Essais sur Site et au Laboratoire d'Isolateurs Contamines par la Pollution Industrielle au Bord de la Mer ", PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), Juin 1986.
- [13] L.ARRABIY, " Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée ", PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), 1999.
- [14] A. AHMINA, M. DJEBROUNI, " Calcul de la Tension de Contournement des Isolateurs Pollués sous Tension Alternative ", PFE, Institut d'électronique département d'électrotechnique université des sciences et de la technologie HOUARI Boumediene (U.S.T.H.B.), Septembre 1995.
- [15] M. SOUFI, M. ZEMIRLINE, " Conception d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tension Alternative 50 Hz ", PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), Juin 2004.
- [16] A.TSAMDA, M.KADOUR, " Sources de Pollution dans la Région Electrique d'Oran ", Séminaire, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2006.

- [17] B.HAMOUM, A.KERBOUCHE, "Étude du Phénomène de la Pollution des Isolateurs dans la Région Electrique d'Oran. Statistiques des Incidents–Région Electrique d'Oran", Séminaire, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2006.
- [18] Données climatologiques, ONM (Office National de Météorologie).
- [19] Statistiques des incidents sur les réseaux nationaux de transports d'électricité pour les années 2001, 2003 et 2004. GRTE (Gestion des Réseaux de Transport d'Electricité)
- [20] Rapport sur l'état de l'environnement, ONS (Office National des Statistiques), 1995.
- [21] La Carte de réseau de transport d'électricité (220 kV), Région Electrique du Centre Algérien, GRTE (Gestion des Réseaux de Transport d'Electricité)
- [22] M, REBAÏ, F, HANNACHI, " Modélisation Mathématique en Alternatif et en Continu des Isolateurs Pollués ", PFE, Institut d'électrotechnique, Centre Universitaire de Médéa, 1995.
- [23] R. MOUMENI, A. BAHOS, " Modélisation Dynamique de l'Arc Electrique sur des Isolateurs Pollués de Haute Tension ", PFE, institut d'électronique département d'électrotechnique université des sciences et de la technologie HOUARI Boumediene (U.S.T.H.B.), septembre 1996.
- [24] M.MOKHTARI, " Matlab 5.2 & 5.3 et Simulink 2 &3 pour Etudiants et Ingénieurs ", édition Springer.
- [25] F.MUDRY, " introduction à matlab, quelques exemples ", laboratoire d'automatique, département d'électricité et informatique, école d'ingénieurs du Canton de Vaud, septembre 2002.
- [26] Richard Youmaran, Martin Bouchard, " Introduction à Matlab ", ELG 3520.

## Références Bibliographiques.

---

[27] Jean-Luis Rafnoumanana. "Modélisation par la Méthode des Equations Intégrales de Frontière de Phénomènes de Conduction Surfaiques sur les Isolateurs Pollués.", Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Centrale de Lyon, Mai 1992.

[28] Farouk A.M. RIZK. 'Modèles Mathématiques du Contournement des Isolateurs sous Pollution', ELECTRA.

*Annexes.*

**1. données climatologiques :****1.1. Précipitations pluviale :**

Dans ce qui suit les précipitations pluviales par mois des régions Alger, Tizi-Ouzou, Médéa et Ghélif pour les trois années 2001, 2003 et 2004 (**Tab. 1 à Tab.5**).

Alger	précipitation en (mm).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	126	200	90	106
Février	73	133	46	76
Mars	0	22	79	57
Avril	34	87	56	65
Mai	14	20	149	36
Juin	1	0	1	14
Juillet	0	0	2	2
Août	3	28	1	4
Septembre	45	40	12	27
Octobre	39	38	43	84
Novembre	49	58	116	93
Décembre	57	110	109	117

**Tableau 1 :** Précipitation pluviale de la région d'Alger pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

Tizi-Ouzou	précipitation en (mm).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	232	303	128	141
Février	74	106	52	99
Mars	4	59	104	92
Avril	41	129	86	78
Mai	46	34	146	44
Juin	0	1	5	17
Juillet	0	3	0	4
Août	2	3	10	5
Septembre	35	22	36	37
Octobre	9	67	37	99
Novembre	52	78	107	115
Décembre	63	167	197	160

**Tableau 2 :** Précipitation pluviale de la région de Tizi-Ouzou pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

Médéa	précipitation en (mm).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	205	227	66	122
Février	48	180	53	104
Mars	1	10	70	70
Avril	84	108	59	57
Mai	3	38	96	36
Juin	0	7	7	13
Juillet	0	4	3	1
Août	1	24	4	15
Septembre	44	56	28	31
Octobre	4	75	38	55
Novembre	70	134	108	101
Décembre	61	151	139	144

**Tableau 3** : Précipitation pluviale de la région de Médéa pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

Chélif	précipitation en (mm).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	59	72	30	66
Février	20	56	44	44
Mars	3	13	16	39
Avril	29	33	29	43
Mai	12	33	79	32
Juin	12	0	8	9
Juillet	0	1	0	1
Août	0	11	3	4
Septembre	9	2	0	23
Octobre	11	50	37	47
Novembre	97	78	30	48
Décembre	28	56	83	68

**Tableau 4** : Précipitation pluviale de la région de Chélif pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

moyenne entre toutes les régions	précipitation en (mm).			
	moy 2001	moy 2003	moy 2004	moy Normale
Janvier	155.5	200.5	78.5	108.75
Février	53.75	118.75	48.75	80.75
Mars	2	26	67.25	64.5
Avril	47	89.25	57.5	60.75
Mai	18.75	31.25	117.5	37
Juin	3.25	2	5.25	13.25
Juillet	0	2	1.25	2
Août	1.5	16.5	4.5	7
Septembre	33.25	30	19	29.5
Octobre	15.75	57.5	38.75	71.25
Novembre	67	87	90.25	89.25
Décembre	52.25	121	132	122.25

**Tableau 5** : Moyenne des précipitations pluviales entre toutes les régions pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

### *1.2. Température :*

Dans ce qui suit les températures mensuelles des régions Alger, Tizi-Ouzou, Médéa et Chélif pour les trois années 2001, 2003 et 2004 (**Tab.6** à **Tab.10**).

Alger	Température moyenne par mois en (°C).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	11.6	10.7	11.1	10.8
Février	10.6	10.3	12	11.3
Mars	16.4	13.5	12.9	13.4
Avril	15.1	15.5	14.8	15.4
Mai	18.1	18.4	16.6	18
Juin	24	25.4	22.2	21.7
Juillet	25.5	27.7	24.9	24.5
Août	26.5	28.3	27.2	25.3
Septembre	23.3	23.9	27.9	23.4
Octobre	22.3	20.5	17.3	19.3
Novembre	15.4	15.9	13.1	15.3
Décembre	9.6	11.4	12.1	12.1

**Tableau 6** : Températures mensuelles de la région d'Alger pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

Tizi-Ouzou	Température moyenne par mois en (°C).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	10.8	10.1	10.6	10
Février	10.3	9.2	12.2	10.9
Mars	16.8	13.8	12.6	13.6
Avril	15.8	15.7	14.7	15.8
Mai	19.1	18.7	16.6	18.9
Juin	26.6	27.1	23.8	23.7
Juillet	28.2	29.8	26.6	27.5
Août	29.1	29.5	29.6	28.1
Septembre	24.7	23.8	25.2	25
Octobre	23.1	20.5	22.6	19.4
Novembre	13.6	12.5	13.3	14.6
Décembre	9.2	10.6	11.5	12

**Tableau 7 :** Températures mensuelles de la région de Tizi-Ouzou pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

Médéa	Température moyenne par mois en (°C).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	6.9	4.8	6.5	6.2
Février	6.8	4.7	9.2	6.9
Mars	13.2	10.1	9.5	8.9
Avril	12	12.1	10.9	11
Mai	14.8	16.5	12	15
Juin	24	25.4	21.9	19.6
Juillet	26	28.2	25.5	24.4
Août	26.6	26.9	26.2	24.2
Septembre	20.9	20.3	21.8	20.3
Octobre	20.3	16.1	21.2	17.1
Novembre	11.6	10.6	9.2	10.3
Décembre	6.1	6.1	6.2	7.2

**Tableau 8 :** Températures mensuelles de la région de Médéa pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

Chélif	Température moyenne par mois en (°C).			
	2001	2003	2004	Normale
Janvier	11	9.9	10.8	10
Février	11	10.3	12.3	11.2
Mars	16.9	14.5	13.1	14.2
Avril	16.7	16.2	16	16.8
Mai	19.5	20.9	17.9	20.5
Juin	29.7	29.4	26.3	25.8
Juillet	29.6	30.4	29.8	29.4
Août	30.4	30.9	30.6	29.3
Septembre	25.8	25.7	26.8	25.8
Octobre	24	20.7	22.3	19.9
Novembre	15.5	15.1	13.6	14.7
Décembre	9.9	10.7	11.2	11.3

**Tableau 9** : Températures mensuelles de la région de Chélif pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

moyenne de température pour toutes les zones.	Température moyenne par mois en (°C).			
	moy 2001	moy 2003	moy 2004	moy Normale
Janvier	10.075	8.875	9.75	9.25
Février	9.675	8.625	11.425	10.075
Mars	15.825	12.975	12.025	12.525
Avril	14.9	14.875	14.1	14.75
Mai	17.875	18.625	15.775	18.1
Juin	23.575	26.825	23.55	22.7
Juillet	27.325	29.025	26.7	26.45
Août	28.15	28.9	28.4	26.725
Septembre	23.675	23.425	25.425	23.625
Octobre	22.425	19.45	20.85	18.925
Novembre	14.025	13.525	12.3	13.725
Décembre	8.7	9.7	10.25	10.65

**Tableau 10** : Moyennes des températures mensuelles de toutes les régions pour les trois années 2001, 2003 et 2004.

*Statistiques des incidents.***1. Récapitulatif des incidents :**

Année	Nombre d'incidents
2001	633
2003	300
2004	130

**Tableau 1** : Nombre d'incidents pour chaque année 2001, 2003 et 2004.**2. Densité d'incidents par km pour chaque zone :**

zone	nombre d'incidents durant les trois années	densité d'incidents
ALE-TIO	113	1.44
ALE-RDJ	168	1.15
ALE-KOB	79	1.13
ALE-OFA	101	1.01
KHE-BMR	73	0.97
ALE-ARB	56	0.97
ALE-BRA	63	0.80
ARB-KHE	51	0.53
ARB-BMR	19	0.51
HAP-KOB	2	0.50
BRA-DAR	58	0.40
OFA-BMR	12	0.39
KHE-OUS	69	0.35
BER-DJE	55	0.31
EKS-TIO	22	0.30
BRA-MSP	26	0.23
BER-KHE	13	0.20
DJE-MSP	33	0.18
BER-BRA	11	0.11
KRB-OUS	4	0.06
OUS-KER	3	0.04
KHE-KHR	1	0.03

**Tableau 2** : Densité d'incidents pour chaque zone durant les trois années 2001, 2003 et 2004.

**3. Répartition des incidents par saisons :**

2001			
hiver	printemps	été	automne
35	110	472	16
2003			
hiver	printemps	été	automne
23	92	120	65
2004			
hiver	printemps	été	automne
42	40	47	33

**Tableau 3 :** Répartition des incidents par saisons pour chaque année 2001, 2003 et 2004.**4. Répartition horaire des incidents :**

année 2001			
automne			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
6	3	1	6
hiver			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
5	4	14	12
printemps			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
16	4	36	56
été			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
48	6	73	359

**Tableau 4 :** Répartition horaire des incidents par saisons pour l'année 2001.

Année 2003			
Automne			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
2	3	2	2
Hiver			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
7	3	3	8
Printemps			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
5	8	19	13
Eté			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
26	8	21	57

**Tableau 5 :** Répartition horaire des incidents par saisons pour l'année 2003.

Année 2004			
Automne			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
10	3	4	16
Hiver			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
8	4	13	17
Printemps			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
7	7	11	15
Eté			
6 h/ 12 h	12 h/ 18 h	18 h/ 00 h	00 h/ 6 h
11	7	6	23

**Tableau 6** : Répartition horaire des incidents par saisons pour l'année 2004.

**Résultats expérimentaux.****1. Tension de contournement des isolateurs :**

N° de l'isolateur sur la chaîne	Tension de contournement à l'état pollué et sec (kV).	Tension de contournement à l'état pollué et humide (kV).
2	45.29	33.33
3	44.12	33.82
4	44.90	34.50
5	44.90	37.90
6	44.51	31.88
7	45.48	32.85
8	43.15	31.39
9	43.93	33.04
10	46.65	31.78
12	43.15	30.42
13	45.68	32.85
14	44.31	31.29
Moyenne.	<b>44.67</b>	<b>32.92</b>
Ecart type (kV).	<b>1.03</b>	<b>1.95</b>
Ecart type relatif (%).	<b>2.30</b>	<b>5.93</b>

**Tableau 1** : Tensions de contournement des isolateurs à profil standard.

N° de l'isolateur sur la chaîne	Tension de contournement à l'état sec (kV).	Tension de contournement à l'état humide (kV).
1	60.06	42.18
2	58.11	36.54
3	59.28	39.07
4	57.92	43.93
5	55.78	37.90
6	56.95	38.87
7	56.37	35.37
8	58.50	39.84
9	60.84	36.35
10	58.50	40.04
11	59.28	38.68
Moyenne.	<b>58.33</b>	<b>38.98</b>
Ecart type (kV).	<b>1.54</b>	<b>2.52</b>
Ecart type relatif (%).	<b>2.63</b>	<b>6.48</b>

**Tableau 2** : Tensions de contournement des isolateurs à profil sphérique.

N° de l'isolateur sur la chaîne	Tension de contournement à l'état sec (kV).	Tension de contournement à l'état humide (kV).
1	74.25	48.43
2	71.33	53.28
3	71.91	56.69
4	72.11	51.02
5	73.66	51.51
6	72.50	51.99
7	72.50	54.42
8	75.80	46.36
9	75.61	51.70
10	74.83	51.31
11	78.33	47.13
12	74.44	47.13
13	74.44	47.82
14	57.34	47.42
Moyenne.	<b>72.79</b>	<b>50.44</b>
Ecart type (kV).	<b>4.82</b>	<b>3.14</b>
Ecart type relatif (%).	<b>6.63</b>	<b>6.22</b>

**Tableau 3** : Tensions de contournement des isolateurs à profil antibrouillard.

## 2. Courants de fuite:

Tension appliqué (kV). Type d'isolateur.	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Standard ( $\mu\text{A}$ ).	1061.9	1445.7	1756.9	2071.7	2251.5	2554.5	-----	-----	-----
Antibrouillard ( $\mu\text{A}$ )	359.6	647.2	929.1	1158.4	1350.8	1545.2	1717.2	1829.9	1875.6
Sphérique ( $\mu\text{A}$ ).	529.6	952.4	1331.4	1457.7	1904.8	2332.4	2818.3	3207.0	3401.4

**Tableau 4** : courants de fuite pour tous les isolateurs des trois profils à l'état sec.

Isolateurs à profil antibrouillard.						
Niveau de tension appliqué (kV). Conductivités.	5	10	15	20	25	30
5 $\mu\text{S/cm}$ .	1603.5	2235.2	2915.5	3207.0	3401.4	3984.5
175 $\mu\text{S/cm}$ .	1106.6	1749.3	2904.43	4084.9	5096.5	-----
350 $\mu\text{S/cm}$ .	1198.3	1814.4	2786.2	4373.2	4859.1	-----
525 $\mu\text{S/cm}$ .	2461.6	3498.5	4276.0	5150.6	6446.1	-----

**Tableau 5** : courants de fuite pour les isolateurs à profil antibrouillard à l'état humidifié.

Niveau de tension appliqué (kV). Conductivités.	5	10	15	20	25	30
5 $\mu\text{S/cm}$ .	1263.4	2332.4	2721.1	4097.9	6802.7	7094.3
175 $\mu\text{S/cm}$ .	1457.7	1603.5	3887.3	5636.5	7774.5	-----
350 $\mu\text{S/cm}$ .	2786.2	2980.6	4924.2	7223.5	8969.9	-----
525 $\mu\text{S/cm}$ .	2040.8	3595.7	4373.2	6511.2	9621.0	-----

**Tableau 6** : courants de fuite pour les isolateurs à profil sphérique à l'état humidifié.

Tension appliqué (kV). Conductivités.	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
5 $\mu\text{S/cm}$ .	971.8	1633.6	2607.4	3231.3	4016.5	4632.7	5021.4
175 $\mu\text{S/cm}$ .	2040.8	3595.7	3692.9	4210.9	4502.4	5053.4	5215.7
350 $\mu\text{S/cm}$ .	3154.5	3887.3	4664.7	4632.7	5150.6	5960.2	6576.3
525 $\mu\text{S/cm}$ .	3563.7	3887.3	3984.5	4859.1	6073.9	6219.6	7288.6

**Tableau 7** : courants de fuite pour les isolateurs à profil standard à l'état humidifié.

**Modèle expérimental:****3. Tension de contournement :**

N° d'essai Tensions de contournement	1	2	3	4	5	6	Moyenne.	Moyenne corrigée.
L'isolateur à l'état propre et sec.	78	81	80	83	78	80	80	77.75
Le modèle à l'état propre et sec.	85	86	89	86	87	88	86.83	84.39
L'isolateur à l'état pollué et humidifier (525 $\mu$ S/cm).	50	49	50	47	45	55	49.33	47.94
Le modèle à l'état pollué et humidifier (525 $\mu$ S/cm).	50	54	54	49	49	51	51.17	49.72

**Tableau 8 :** Tensions de contournement du modèle et d'isolateur à profil antibrouillard pour les deux états sec et humidifié.

**4. Courants de fuite :**

Tensions appliquées (kV).	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Isolateur à profil antibrouillard ( $\mu$ A).	229	350	425	475	594	660	781	869	1006.5
Modèle ( $\mu$ A).	160	240	300	400	500	520	600	640	800

**Tableau 9 :** Courants de fuite pour l'isolateur à profil antibrouillard et le modèle à l'état sec.

Isolateurs à profil antibrouillard (nettoyé).						
Niveau de tension appliqué (kV)	5	10	15	20	25	30
Conductivités						
5 $\mu\text{S/cm.}$	1443.1	2011.7	2623.9	2886.3	3061.2	3586.0
175 $\mu\text{S/cm.}$	1078.4	1632.9	2507.6	3935.9	4373.2	-----
350 $\mu\text{S/cm.}$	1138.1	1723.3	2646.7	4154.4	4616.05	-----
525 $\mu\text{S/cm.}$	1699.8	2509.8	3469.8	4340.1	5329.8	-----

**Tableau 10** : Courants de fuite pour l'isolateur à profil antibrouillard à l'état sec humidifié.

Modèle expérimental.						
Niveau de tension appliqué (kV)	5	10	15	20	25	30
Conductivités						
5 $\mu\text{S/cm.}$	903.8	1530.6	2186.6	2623.9	3207.0	3790.1
175 $\mu\text{S/cm.}$	1224.5	1846.5	2429.5	3595.7	4081.6	5636.5
350 $\mu\text{S/cm.}$	1389.7	1895.0	2915.5	4470.4	4616.1	5345.0
525 $\mu\text{S/cm.}$	1457.7	1992.2	3109.8	4567.5	4859.1	5830.9

**Tableau 11** : Courants de fuite pour le modèle à l'état sec humidifié.

### 5. déphasages :

Tension appliquée (kV).	5	10	15	20	25	30
Conductivités.						
5 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$	5.4	7.56	8.64	9.72	10.8	12
175 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$	6.48	8.76	13.8	15.78	17.28	18.48
350 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$	7.56	10.26	16.164	18.48	18.9	19.8
525 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$	8.64	12	18.9	21.6	22.8	24.3

**Tableau 12** : Déphasages du courant de fuite par rapport à la tension appliquée pour le modèle.

Tension Appliquée (kV) / Conductivités.	5	10	15	20	25
5 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$ .	28.08	32.76	37.44	42.12	56.16
175 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$ .	35.1	40.95	46.8	52.65	56.42
350 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$ .	36.4	42.458	48.529	54.6	58.5
525 $\mu\text{S/cm. (}^\circ\text{)}$ .	37.44	46.8	56.16	67.08	48.9

**Tableau 13 :** Déphasages du courant de fuite par rapport à la tension appliquée pour le modèle.

*Ces programmes ont été faits par '' Matlab ''.*

### 1. Premier programme :

Ce programme effectue les correction des tensions pour les ramenées aux conditions normales, ainsi que le calcul de la valeur du courant de fuite en  $\mu\text{A}$ , et enfin les dessins des signaux des ces derniers.

```

x1=m1*20000;
x2=m2*20000;
x3=m3*20000;
x4=m4*20000;
x5=m5*20000;
x6=m6*20000;
x7=m7*20000;
x8=m8*20000;
x9=m9*20000;
x10=n9*20000;
x11=n10*20000;
x12=n11*20000;
t=0:0.04/10000:0.04;

figure(1)
subplot(2,3,1)
plot(t,x1)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu\text{A}$ ')),grid
subplot(2,3,2)
plot(t,x2)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu\text{A}$ ')),grid
subplot(2,3,3)
plot(t,x3)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu\text{A}$ ')),grid
subplot(2,3,4)
plot(t,x4)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu\text{A}$ ')),grid
subplot(2,3,5)
plot(t,x5)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu\text{A}$ ')),grid
subplot(2,3,6)
plot(t,x6)

```

```
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu$ A)'),grid
figure(2)
subplot(2,3,1)
plot(t,x7)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu$ A)'),grid
subplot(2,3,2)
plot(t,x8)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu$ A)'),grid
subplot(2,3,3)
plot(t,x9)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu$ A)'),grid
subplot(2,3,4)
plot(t,x10)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu$ A)'),grid
subplot(2,3,5)
plot(t,x11)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu$ A)'),grid
subplot(2,3,6)
plot(t,x12)
xlabel('temps (s)')
ylabel('courant de fuite ( $\mu$ A)'),grid
```