

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES**

*Présenté par*

**Lynda BEKDACHE**

**Sonia BELHAMICHE**

Thème

# Étude du contournement des isolateurs sous pollution marine

*Mémoire soutenu publiquement le 11 septembre 2014 devant le jury composé de :*

**M Ahmed CHALLAL**

Maitre Assistant, UMMTO, Président

**M Mohand Amokrane HANDALA**

Maitre de Conférences, UMMTO, Rapporteur

**M Boukhalfa AIT-MENGUELLET**

Maitre Assistant, UMMTO, Examineur

**M El Hadi BELHITECHE**

Doctorant, UMMTO, Examineur

## **Remerciements :**

*Au terme de ce mémoire de fin d'études de Master, nous tenons à formuler nos chaleureux remerciements à notre promoteur Mr. **M. HANDALA**, maître de conférences à la faculté de génie électrique et d'informatique à l'université Mouloud MAMMERY de Tizi Ouzou. Qu'il trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance pour ses précieuses directives, sa très grande disponibilité, ses fructueux conseils, son suivi constant, sa courtoisie si raffinée et ses qualités humaines.*

*Nous remercions aussi Monsieur **A. BOUBAKEUR** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, Monsieur **M. TEGUAR** maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur **S. BOUAZABIA** enseignant à l'ENP pour leur précieuse aide. Sans oublier Monsieur **El Hadi BELHITECHE**, **doctorant** au département d'électrotechnique à l'université Mouloud MAMMERY de Tizi Ouzou, pour son soutien.*

*Nous adressons nos vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

*Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants de la faculté des sciences et techniques et de génie électrique pour leurs efforts déployés à notre égard tout au long de notre parcours universitaire.*

*Enfin, Nous remercions énormément Mr. **N. BECHAR**, ainsi que ses collègues au CREDEG (Centre de Recherche et du Développement de l'Electricité et du Gaz), qui nous ont si bien aidé à accomplir ce travail.*

# *Dédicaces*

# *Dédicaces*

*Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier des personnes qui nous sont proches.*

*Chaleureusement, je dédie ce modeste travail :*

*A ma très chère famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*Lynda...*

# *Dédicaces*

*Nulle œuvre n'est exaltante que celle réalisée avec le soutien moral et financier des personnes qui nous sont proches.*

*Chaleureusement, je dédie ce modeste travail :*

*A ma très chère famille.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*A une personne particulièrement proche.*

*Sonia...*

# *Sommaire*

## *Sommaire*

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

<b>I.1.Introduction.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2. Définitions.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.1.Isolateurs.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.2.Contournement.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.3.Ligne de fuite .....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.4.Ligne de contournement.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2.5.Tension de contournement.....</b>	<b>04</b>
<b>I.2.6.Tension de tenue .....</b>	<b>04</b>
<b>I.2.7.Tension de perforation ou de claquage.....</b>	<b>04</b>
<b>I.2.8.Courant de fuite .....</b>	<b>04</b>
<b>I.2.9.Courant de fuite critique.....</b>	<b>04</b>
<b>I.2.10.Longueur critique d'arc .....</b>	<b>04</b>
<b>I.2.11.Conductance superficielle .....</b>	<b>05</b>
<b>I.3.Fonctionnement et constitution d'un isolateur .....</b>	<b>05</b>
<b>I.4.Principaux types d'isolateurs.....</b>	<b>05</b>
<b>I.4.1.Isolateurs de type rigide .....</b>	<b>05</b>
<b>I.4.2.Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.....</b>	<b>06</b>
<b>I.4.2.1. Isolateurs à capot et tige .....</b>	<b>07</b>
<b>I.4.2.2. Isolateur à long fût.....</b>	<b>08</b>
<b>I.5.Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs .....</b>	<b>09</b>
<b>I.5.1.Céramique.....</b>	<b>09</b>
<b>1.5.2. Verre .....</b>	<b>09</b>

I.5.2.1.Le verre trempé.....	10
I.5.2.2.Le verre recuit.....	10
I.5.3.Matériaux synthétiques.....	10
I.6.Contraintes subites par l'isolateur .....	11
I.6.1.Contraintes mécaniques .....	11
I.6.2.Contraintes climatiques et d'environnement .....	11
I.6.3.Contraintes électrique .....	12
I.7.Choix des isolateurs .....	12
I.8.Déroulement du contournement.....	13
I.9.Pollution des isolateurs.....	13
I.9.1.Formation des couches polluantes sur les isolateurs.....	14
I.9.2.Sources de pollution.....	15
I.9.2.1.Pollution naturelle .....	15
I.9.2.2. Pollution industrielle .....	15
I.9.2.3. Pollution mixte.....	16
I.9.3.Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués.....	16
I.9.4.Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolateurs.....	17
I.9.4.1.Répartition Longitudinale non-uniforme et non-périodique par groupe .....	17
I.9.4.2.Répartition transversale non-uniforme .....	17
1.9.4.3. Répartition Longitudinale non-uniforme périodique .....	17
I.9.5.Mesure de la sévérité de pollution des sites.....	17
I.9.5.1.Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE).....	18
I.9.5.2. Densité de dépôt non soluble (DDNS) .....	18
I.9.6.Classification des sites pollués .....	18
I.9.7.Conséquences de la pollution .....	19
I.9.8.Techniques de lutte contre la pollution.....	20
I.9.8.1. Allongement de la ligne de fuite .....	20
I.9.8.2. Isolateurs plats.....	20
I.9.8.3. Graissage périodique.....	20
I.9.8.4.Revêtement silicone .....	20
I.9.8.5. Les isolateurs composites.....	21
I.9.8.6.Nettoyage des isolateurs.....	21
I.10.Conclusion .....	21

## **Chapitre II : Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

<b>II.1.Introduction .....</b>	<b>22</b>
<b>II.2.Pollution marine en Algérie.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3. Données météorologiques .....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.1. Température .....</b>	<b>24</b>
<b>II.3.2. Précipitation.....</b>	<b>25</b>
<b>II.3.3. Vent moyen .....</b>	<b>26</b>
<b>II.3.4.Données météorologiques de la Région Ouest .....</b>	<b>27</b>
<b>II.3.4.1. Précipitations .....</b>	<b>27</b>
<b>II.3.4.2.Températures.....</b>	<b>28</b>
<b>II.3.4.3.Vent.....</b>	<b>29</b>
<b>II.3.4.4.Humidité.....</b>	<b>29</b>
<b>II.3.5. Données météorologiques de la Région Centre.....</b>	<b>30</b>
<b>II.3.5.1.Précipitation.....</b>	<b>30</b>
<b>II.3.5.2.Température .....</b>	<b>30</b>
<b>II.3.5.3.Vent.....</b>	<b>31</b>
<b>II.3.5.4.Humidité.....</b>	<b>31</b>
<b>II.3.6.Données météorologiques de la Région Est.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3.6.1.Précipitation.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3.6.2.Température .....</b>	<b>33</b>
<b>II.3.6.3.Vent.....</b>	<b>33</b>
<b>II.3.6.4.Humidité.....</b>	<b>34</b>
<b>II.4. Sites d'installation des stations de mesure de pollution.....</b>	<b>35</b>
<b>II.4.1. Proposition des Sites d'installation des stations de mesure.....</b>	<b>36</b>
<b>II.4.2. Les Cinq premières stations de mesure.....</b>	<b>37</b>
<b>II.4.3. Mise en place des chaînes d'isolateurs au niveau de la station .....</b>	<b>38</b>
<b>II.4.4. Résultats des degrés de sévérité de pollution.....</b>	<b>39</b>

<b>II.4.5. Interprétations</b> .....	<b>41</b>
<b>II.5. Incidents enregistrés sur le réseau de distribution de la SDC</b> .....	<b>42</b>
<b>II.5.1. Incidents majeurs</b> .....	<b>42</b>
<b>II.5.2. Incidents indirects de la pollution</b> .....	<b>42</b>
<b>II.6. Traitements Statistiques des incidents sur le réseau national</b> .....	<b>44</b>
<b>II.6.1. Incidents durant les trois années (2009-2011)</b> .....	<b>44</b>
<b>II.6.2. Analyse des incidents annuels par saison</b> .....	<b>44</b>
<b>II.6.2.1. Répartition des incidents annuels par saison (Année 2009)</b> .....	<b>45</b>
<b>II.6.2.1.1. Répartition horaire des incidents pour chaque saison</b> .....	<b>45</b>
<b>II.6.2.2. Répartition des incidents annuels par saison (Année 2010)</b> .....	<b>47</b>
<b>II.6.2.2.1. Répartition horaire des incidents pour chaque saison</b> .....	<b>47</b>
<b>II.6.2.3. Répartition des incidents annuels par saison (Année 2011)</b> .....	<b>49</b>
<b>II.6.2.3.1. Répartition horaire des incidents pour chaque saison</b> .....	<b>50</b>
<b>II.7. Conclusion</b> .....	<b>51</b>

## **Chapitre III : Les modèles du contournement des isolateurs pollués.**

<b>III.1. Introduction</b> .....	<b>52</b>
<b>III.2. Principaux modèles statiques de contournement</b> .....	<b>52</b>
<b>III.2.1. Modèle d'Obenaus</b> .....	<b>52</b>
<b>III.2.2. Modèle de Neumarker</b> .....	<b>54</b>
<b>III.2.3. Modèle de Danis</b> .....	<b>55</b>
<b>III.2.4. Modèle de Rizk</b> .....	<b>56</b>
<b>III.2.5. Modèle de Claverie et Porcheron</b> .....	<b>56</b>

III.2.6.Modèle de Rao et Gopal .....	57
III.2.7.Modèle d'Alston et Zoledziowski .....	57
III.2.8.Modèles de Tegar.....	58
III.2.9.Modèle de Namane, Mekhaldi et Bouazabia.....	59
III.3.Principaux modèles dynamiques de contournement.....	61
III.3.1.Mécanisme de propagation .....	61
III.3.2.Modèles dynamiques .....	63
III.3.3.Organigramme typique des modèles dynamiques.....	67
III.4.Conclusion .....	67

## **Chapitre IV : modélisation dynamique du contournement.**

VI. Introduction.....	69
IV.2. Hypothèse simplificatrices .....	69
IV.3.Base du modèle.....	69
IV.4. Critères de propagation de la décharge.....	70
IV.5. Circuit de propagation .....	70
IV.6. Paramètres du circuit électrique .....	71
IV.7. Courant critique et tension de contournement .....	73
IV.8.Simulation numérique .....	75
IV.9. Résultats de la simulation numérique.....	78
IV. 10. Interprétation .....	80
IV.11. Conclusion .....	81
Conclusion générale .....	82

## **I.1.Introduction**

Les matériels, destinés à supporter des organes sous tension dans l'air et les isoler entre eux ou par rapport à la terre, ont un comportement particulier dans le sens où la défaillance de l'isolation peut se manifester soit par un arc de contournement dans l'air à la surface de l'isolateur, soit par une perforation du matériau solide constituant l'isolateur et provoquant sa destruction. La distance d'amorçage dans l'air le long de l'isolateur doit être suffisante pour assurer l'isolation souhaitée, compte tenu de l'environnement (pluie, brouillard, salin, pollutions diverses) qui peut réduire notablement la tension d'amorçage. À cet effet, les isolateurs sont munis de jupes destinées à allonger la ligne de fuite dans l'air [1].

En outre, ils sont conçus pour que la perforation soit impossible. Cette précaution permet aux isolateurs de continuer à assurer leur fonction de support mécanique même lorsque leur fonction d'isolation n'est plus remplie. Cela est très important dans la pratique.

## **I.2. Définitions**

### **I.2.1.Isolateurs**

L'isolateur est un matériau isolant solide qui présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les court-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

### **I.2.2.Contournement**

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air [2].

### **I.2.3.Ligne de fuite**

La ligne de fuite ( $L_f$ ) est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolateur entre les deux électrodes.

### **I.2.4.Ligne de contournement**

La ligne de contournement ( $L$ ) est la distance la plus courte dans un gaz entre les électrodes [6].

**I.2.5.Tension de contournement**

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir du quel tous les arcs joignent les deux électrodes.

Elle dépend :

- De la résistivité volumique moyenne de la pollution.
- De la répartition de la couche de pollution.
- Du profil et des dimensions de l'isolateur.

**I.2.6.Tension de tenue**

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateur) [2].

**I.2.7.Tension de perforation ou de claquage**

La tension de perforation ou de claquage est celle qui conduit à la perforation ou percement de l'isolation interne. Décharge complète et destructive au travers de l'isolant. Cette tension doit être évidemment plus grande que la tension de contournement de l'appareil [8].

**I.2.8.Courant de fuite**

C'est un courant de nature impulsionnelle. Il est de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de surface de l'isolateur .Il est donc à caractère électrolytique et de type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche de la tension de contournement.

Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques.

**I.2.9.Courant de fuite critique**

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que la forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend ce courant sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est à dire la contrainte spécifique exprimée en kV/cm.

**I.2.10.Longueur critique d'arc**

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

### **I.2.11. Conductance superficielle**

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante.

### **I.3. Fonctionnement et constitution d'un isolateur**

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

Les matériaux isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine. Mais les résines synthétiques commencent aussi à être utilisées.

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants :

- l'intervalle d'air.
- le matériau diélectrique.
- L'interface air-matériau diélectrique [2] (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

### **I.4. Principaux types d'isolateurs**

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne [6].

#### **I.4.1. Isolateurs de type rigide**

Les isolateurs rigides sont utilisés pour l'isolement de lignes aériennes HT (inférieur à 60KV). Ils permettent d'obtenir une liaison rigide entre les supports et les câbles, ils sont constitués par plusieurs éléments scellés l'un sur l'autre (figure I.1).

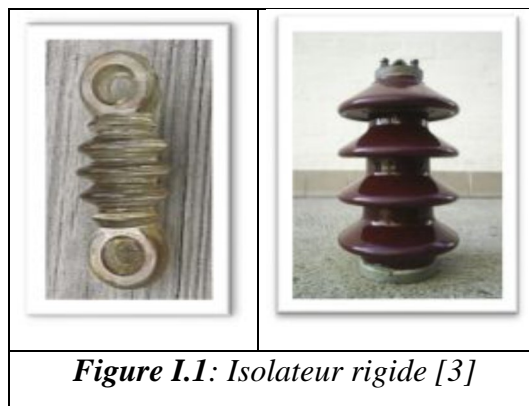
Ils sont reliés aux supports par une ferrure fixe, ces isolateurs sont soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'ils sont placés en position verticale, ils peuvent être dans certains cas en position horizontale. Le conducteur est fixé directement à l'isolateur à l'aide d'un fil d'attache, il existe également des isolateurs à socle constitués d'un ou plusieurs pièces

en céramique ou en matériaux synthétiques, assemblés de façon permanente sur un socle métallique.

L'épaisseur de l'isolateur entre la partie haute tension et la masse est telle qu'elle présente un facteur de sécurité contre la perforation supérieur à 10.

L'isolateur est fabriqué de telle sorte qu'en cas de surtension, il se produit plutôt un contournement qu'une perforation. Le contournement n'entraînant pas de dommage permanent de l'isolateur.

L'isolateur doit résister mécaniquement aux efforts combinés du poids de la ligne, du vent, de la neige et de la force horizontale de traction du conducteur en bout de ligne [1].



*Figure I.1: Isolateur rigide [3]*

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

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne, à la pince de suspension du conducteur ou au support, ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontales (chaînes d'ancrages).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

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

### I.4.2.1. Isolateurs à capot et tige

L'isolateur à capot et tige (Fig.I.2) est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine).

L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique [2].



*Figure I.2 : Isolateur capot et tige [6]*

#### I.4.2.1.1. Quelques profils des isolateurs à capot et tige

##### a. Profil standard

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée (figure.I.3).



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

##### b. Profil antibrouillard

Plus large que le profil standard, l'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou la pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire.

L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans des conditions sévères de pollution (figureI.4).



*Figure I.4: Isolateur capot et tige de profil Antibrouillard [3]*

### **c. Profil plat**

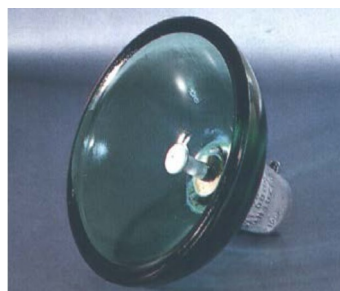
L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air, cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques ou l'auto lavage est peu fréquent par la pluie (figureI.5).



*Figure I.5 : un isolateur capot et tige de profil plat [3]*

### **d. Profil sphérique**

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel (figureI.6).



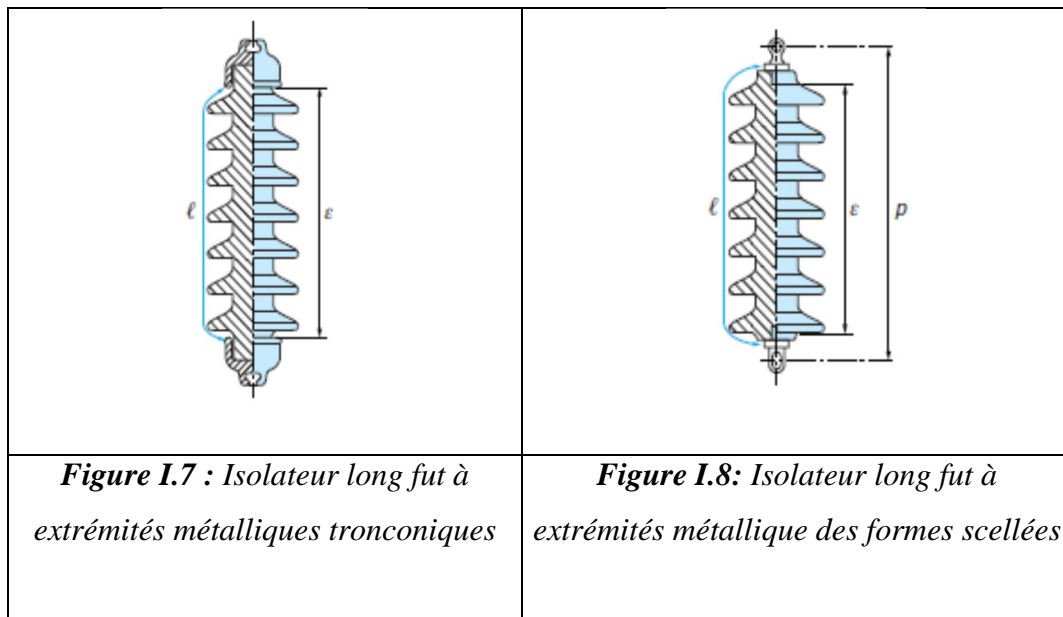
*Figure I.6 : Isolateur capot et tige de profil sphérique*

### **I.4.2.2. Isolateur à long fût**

Il est constitué d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Fig.I.7) (Fig.I.8). À chaque extrémité est fixée une pièce

métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [2].



### **I.5. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs [7]**

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 des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages, par contre on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères.

#### **I.5.1. 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.

#### **I.5.2. Verre**

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est

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

### I.5.2.1. Le verre trempé

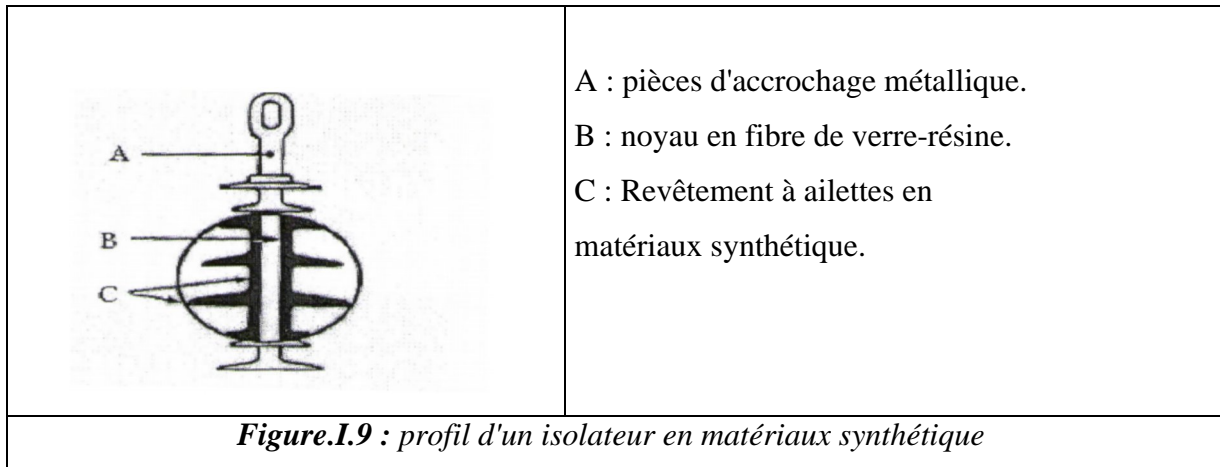
La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C.

### I.5.2.2. 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 faible et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

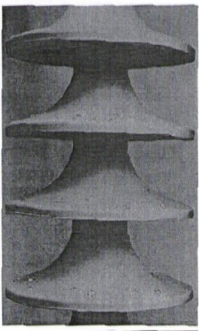
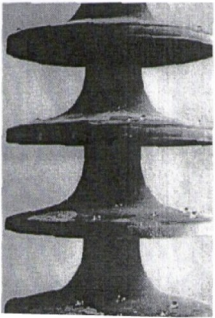
### I.5.3. Matériaux synthétiques [2]

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résinée et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leurs avantages est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (Fig.I.9).



Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (Fig.I.10).

L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécanique, atmosphériques...) (Fig.I.11).

	
<p><i>Figure.I.10 : les bonnes propriétés hydrophobes</i></p>	<p><i>Figure .I.11: le vieillissement d'isolateurs</i></p>

## I.6.Contraintes subites par l'isolateur

L'isolateur est loin d'être épargné des contraintes néfastes réparties en trois classes [4] :

### I.6.1.Contraintes mécaniques

Du fait de leurs conceptions, les chaînes d'isolateurs sont articulées (avec un faible degré de liberté) à chaque isolateur, ce qui permet de les faire travailler exclusivement à la traction, parmi ces contraintes on site :

- Charge permanente appliquée à la chaîne (le poids du conducteur, des accessoires).
- Surcharge exceptionnelle due au vent.
- Les dimensions de chaque élément d'isolateur dépendent de la charge mécanique qui est supportée en service ; lorsque la charge augmente les dimensions augmentent aussi.

### I.6.2.Contraintes climatiques et d'environnement

Les isolateurs sont spécialement influés par la contamination de l'environnement, dans les ouvrages (lignes et postes) installés aux bordures de mer, les embruns portés par les vents déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel, qui a plus au moins longue échéance, en suite recouvre toute la surface de l'isolant y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel humidifiés par les embruns eux même par un brouillard

ou simplement par condensation, devient conductrice. Ce qui donne naissance à un courant de fuite qui s'établit à travers la couche superficielle, ou dans certaines conditions des arcs peuvent se développer et provoquer le contournement total de l'isolateur.

### **I.6.3. Contraintes électrique**

Ce type de contraintes est important [1], et elles se résument en :

- Tension de service : c'est la tension normale que supporte l'isolateur en service ;
- Décharge disruptive : phénomène associé à une défaillance de l'isolateur sous l'effet de la contrainte électrique, avec chute de tension et passage d'un courant entraînant une perte permanente de la rigidité diélectrique ;
- Tension de contournement (à sec et sous pluie) : c'est la plus faible tension produisant un amorçage entre conducteur et la masse ;
- Surtensions accidentelles : elles sont de brève durée pouvant être à l'origine d'un orage ou d'un régime transitoire.

### **I.7. Choix des isolateurs**

Les isolateurs sont des éléments essentiels pour la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluant le moins élevé c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto nettoyage. L'apparition des nouvelles usines à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin, ou un événement météorologique exceptionnel peuvent changer la sévérité de pollution d'un site, ce qui peut provoquer des incidents qui influent directement sur l'isolation, pour cela il faut prévoir une protection pour les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution ; et le choix des isolateurs se fait en fonction [5] :

- De la tension de service de la ligne ;
- Des efforts mécaniques auxquels ils sont soumis ;
- De leur nature (rigide ou suspendus) ;
- Du prix de revient de la ligne et de son importance ;
- Du degré de sévérité de la pollution du site d'utilisation.

### I.8. Déroulement du contournement [2]

#### Phase 1 : dépôt de pollution

Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (Fig.I.12a).

#### Phase 2 : Formation d'un électrolyte conducteur

À sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...), elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel ( $I_f$ ) circulant sur la surface de l'isolateur (Fig.I.12b).

#### Phase 3 : formation d'une bande sèche

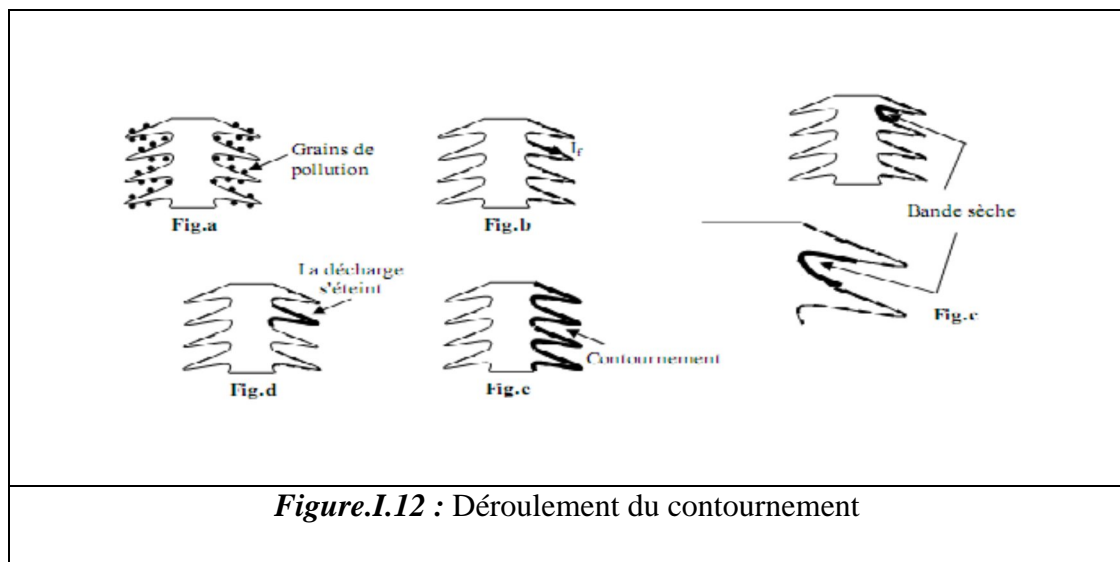
Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (Fig.I.12c).

#### Phase 4 : contournement

Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche:

- Soit la décharge s'éteint  $\Rightarrow$  pas de contournement (Fig.I.12d).
- Soit la décharge progresse sur la surface  $\Rightarrow$  contournement de l'isolateur

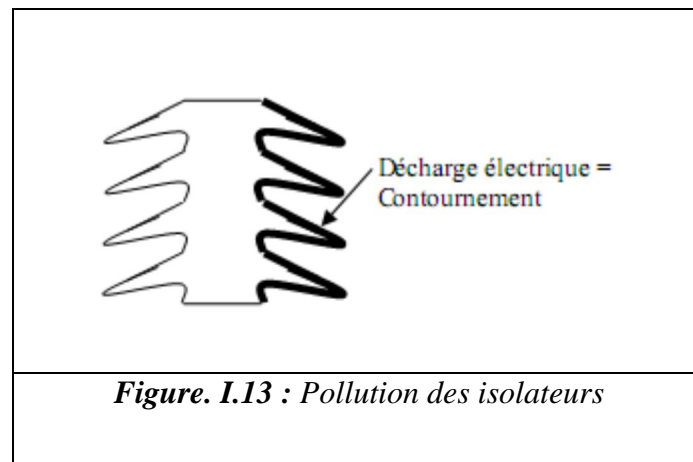
(Fig.I.12e).



### I.9. Pollution des isolateurs

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement

des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces des isolants et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs (Fig.I.13).



L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants de fuite sur la surface de ces isolateurs, entraîne des assèchements locaux de la couche de la pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur (arcs partiels).

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

### **I.9.1. Formation des couches polluantes sur les isolateurs**

Les couches de pollution se déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs des lignes de haute tension, du fait qu'ils forment des obstacles à l'écoulement d'air, transportant de diverses substances organiques ou minérales (poussières, sel marin, fumée, engrais,...). La couche de pollution se concentre en général, dans les parties protégées contre les facteurs de nettoyage naturel (vent violent, pluie abondante,...). La répartition de la pollution est loin d'être uniforme et homogène et dépend essentiellement :

- Du profil de l'isolateur (forme géométrique de la surface).
- De l'orientation (verticale ou inclinée) de la chaîne par rapport au sol.
- De la distance à la source de la pollution.
- De la nature des dépôts, poids et taille des particules.
- Des caractéristiques climatiques du site (vent, pluie, givre,...).

- Des caractéristiques géographiques du site zone urbaine, industrielle, littoral, Sahara,...etc.

### **I.9.2.Sources de pollution**

La nature de la pollution est sujette à l'origine des agents entrant dans sa formation. On distingue trois sources :

1. Pollution naturelle.
2. Pollution industrielle.
3. Pollution mixte.

#### **I.9.2.1.Pollution naturelle**

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions. Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que: sable, embruns marins,...etc. ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

##### **a. Pollution marine**

Dans les installations au voisinage de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi, une couche de sel qui recouvre toute leur surface. Cette couche, qui humidifiée par les embruns eux-mêmes, devient de plus en plus conductrice. Ce qui donne naissance à des courants de fuite encore plus intenses, et des arcs pouvant se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

##### **b. Pollution désertique**

Dans les régions désertiques, la pollution est due surtout aux tempêtes de sable. La densité de sel dans le sable est très élevée, et la rosée matinale est la seule source d'humidification dans ces régions. Cette humidification favorise la conduction sur la surface isolante.

##### **c. Autre type de Pollution naturelle**

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

#### **I.9.2.2. Pollution industrielle**

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ...etc., les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières

abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticide, engrais, grains de pollens, Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quand il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

### **I.9.2.3. Pollution mixte**

La pollution mixte est la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. Car elle résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées. La couche électrolytique formée par le processus d'humidification des dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolateurs, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique.

### **I.9.3. Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués**

La tenue électrique d'isolateurs dépend de plusieurs facteurs météorologiques et parmi eux on distingue [6]:

#### **a. Le Vent**

Le vent joue un double rôle. Il assure d'une part le transport et la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des isolateurs électriques, d'autre part il peut se comporter comme agent d'auto-nettoyage lorsque sa vitesse est élevée.

#### **b. La Pluie**

Les fortes pluies permettent en général le nettoyage des surfaces polluées des isolateurs, cependant, les fines pluies peuvent mouiller les surfaces polluées, ce qui augmente le risque de contournement.

#### **c. L'Humidité**

L'humidification est considérée comme un obstacle car elle influe négativement sur la tenue électrique des isolateurs puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés à leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue.

#### **d. La Température**

Contrairement à l'humidité, l'élévation de la température favorise l'assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité et par conséquent la tenue des isolateurs contaminés devient plus important. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

**I.9.4. Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolateurs**

La répartition de la couche de pollution dépend du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et le niveau de la tension qui leur est appliqué.

On en compte trois catégories:

- Longitudinale non-uniforme et non-périodique;
- Transversale non-uniforme;
- Longitudinale non-uniforme et périodique.

**I.9.4.1. Répartition Longitudinale non-uniforme et non-périodique par groupe**

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, dont la valeur est constante dans chaque groupe.

Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants:

- Temporairement pendant le lavage sous tension ;
- Dans les chaînes d'isolateurs en forme de « T ».

**I.9.4.2. Répartition transversale non-uniforme**

Ce type de non uniformité est caractérisé par des secteurs ou bandes de pollution de différentes largeurs, dont la conductivité superficielle est variable d'un secteur à l'autre le long du périmètre de l'isolateur tout en restant constante dans le même secteur, le long de la ligne de fuite. Ce type de répartition est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

**1.9.4.3. Répartition Longitudinale non-uniforme périodique**

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire.

Ces principales spécifications sont :

- la face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure ;
- la concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale ;
- la pollution est plus accentuée entre les nervures [6].

**I.9.5. Mesure de la sévérité de pollution des sites**

Le choix des isolateurs à installer sur le réseau ne peut se faire que si la sévérité de la pollution est connue. Les principales méthodes qui ont été employées pour caractériser la sévérité d'un site sont :

### I.9.5.1. Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'isolateur sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de Na Cl par cm<sup>2</sup> de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau.

La densité du dépôt de sel équivalent est donnée comme suit :

$$DDSE = S_a - \quad (I.1)$$

Telle que :

V : est le volume de la suspension en cm<sup>3</sup> ;

S : est la surface nettoyée en cm<sup>2</sup> ;

S<sub>a</sub> : est la salinité exprimé en kg/m<sup>3</sup>.

### I.9.5.2. Densité de dépôt non soluble (DDNS)

Elle correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS s'effectue comme suit :

- La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre.
- Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé.

La DDNS peut être calculée par la formule suivante :

$$DDNS = \frac{(\quad)}{\quad} \quad (I.2)$$

Où :

DDNS est la densité de dépôt non soluble ;

m<sub>f</sub> : est la masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en g ;

m<sub>i</sub> : est la masse initiale du papier filtre en g ;

A est la surface lavée de l'isolateur en cm<sup>2</sup> [2,6].

### I.9.6. Classification des sites pollués

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

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

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

**Classe 2** : Cette classe correspond à une pollution moyenne, naturelle (excepté marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé. En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l [Na Cl].

**Classe 3** : Elle correspond à une forte pollution marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et situées près de la mer, donc exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est 80 g/l [Na Cl].

**Classe 4** : Elle correspond à des zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution dans ces zones peut être naturelle, industrielle ou mixte. Ces zones sont sujettes aux fumées industrielles et aux poussières conductrices produisant des dépôts très épais, et situées très proches de la côte et donc soumises à des vents marins très forts et très polluants.

Elles nécessitent un isolement exceptionnel. La salinité équivalente maximale, pour cette classe, est de 160g/l[Na Cl] [2].

### **I.9.7.Conséquences de la pollution**

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard,...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur :

#### **a. Arc non localisé**

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

**b. Arc fixe**

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

**c. Court-circuit**

Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Ainsi, la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorise le passage d'un fort courant, ce cas engendre la rupture totale de l'isolation [6].

**I.9.8. Techniques de lutte contre la pollution**

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques [2]. Pour cela, plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

**I.9.8.1. Allongement de la ligne de fuite**

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution.

Deux techniques sont utilisées :

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation des matériaux polymères qui sont collés sur la surface des isolateurs existants pour prolonger la ligne de fuite.

**I.9.8.2. Isolateurs plats**

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent.

**I.9.8.3. Graissage périodique**

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs.

**I.9.8.4. Revêtement silicone**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

**I.9.8.5. Les isolateurs composites**

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

**I.9.8.6. Nettoyage des isolateurs**

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues.

Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

**I.10. Conclusion**

Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension. La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant (degré de pollution) ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante.

La connaissance de ce degré de pollution est par conséquent, une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

Les isolateurs les mieux adaptées à un environnement donné sont ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

## **II.1.Introduction**

La pollution marine sur les lignes de H.T est due à des tempêtes sur la mer, l'écume et les embruns venant des vagues conditionnent une certaine quantité de sel qui dépend de la salinité de la mer. L'eau des gouttes s'évapore partiellement et les gouttelettes sont soulevées par le vent. La précipitation des particules de sel est plus forte sur la cote, mais elle peut devenir considérable à de grandes distances de la cote si la vitesse du vent est importante. Les isolateurs de H.T se recouvrent d'un dépôt composé de sel et d'autres poussières.

Quand l'isolateur est mouillé à la première occasion, la couche de sel devient plus ou moins conductrice et un courant de fuite s'établit à la surface de l'isolateur. D'après les enregistrements statistiques réalisés en exploitation dans de nombreux pays, les défauts apparaissent souvent à cause de l'humidification des couches due à la condensation pendant la nuit et les premières heures de la matinée. La formation de l'humidité à la surface de l'isolateur est due à la baisse de la température au-dessous du point de rosée.

Les lignes de H.T situées dans le littoral algérien sont aussi exposées simultanément à la pollution marine et industrielle.

La pollution industrielle des isolateurs est due à la pollution de l'atmosphère par des usines chimiques et métallurgiques concentrées sur la cote algérienne.

## **II.2.Pollution marine en Algérie**

Le problème de la pollution marine en Algérie est peu connu. En effet, malgré la longueur considérable de la cote (1000 Km environ) aucune étude sur la pollution marine en Algérie n'a été entreprise car les contournements des isolateurs de H.T sont peu fréquents. Ceci s'explique par le niveau de la tension et le nombre des lignes de H.T. existantes sur le littoral algérien qui sont relativement réduits. D'autre part, nous verrons par la suite que la plupart des lignes de H.T sont suffisamment éloignées de la cote pour ne pas être atteintes par les vents marins.

Ces lignes sont davantage protégées par la présence de certaines montagnes (Dahra de l'Ouarsenis entre Mostaganem et Cherchell, Djurdjura en Kabylie, Edough à Annaba...) au voisinage de la cote, constituant ainsi un véritable écran naturel qui empêche la propagation des embruns marins. Malgré tout cela, des difficultés ont été rencontrées sur les lignes de H.T

## **Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

construites au voisinage immédiat de la cote, même si leur tension d'alimentation est relativement réduite, (par exemple la ligne de 60 KV entre Arzew et Mostaganem).

En effet, ces lignes sont soumises à une forte pollution marine et nécessitent une attention particulière par l'utilisation d'un moyen de lutte anti-pollution important tel que le lavage ou le graissage des isolateurs.

Ce problème de pollution prendra de l'ampleur dans les années à venir à cause de l'extension continue de l'industrie algérienne et sa concentration sur le littoral. Cette extension de l'industrie entraîne l'augmentation de la tension et du nombre de lignes de H.T. D'où la nécessité d'accorder dès maintenant une importance particulière à ce problème de pollution marine par :

- Des observations des équipements en service et leur comportement vis-à-vis de cette pollution ;
- L'implantation de stations d'essai « in situ » sur l'ensemble du littoral algérien ;
- La simulation de la pollution marine par des essais au laboratoire.

En général, le dimensionnement marginal des isolateurs par simple augmentation de la ligne de fuite paraît résoudre ces problèmes. Mais il s'avère que cette solution n'est pas satisfaisante du point de vue économique. La meilleure solution est celle qui tient compte des facteurs principaux suivants : la répartition du dépôt de sel rencontré en service pour différents types d'isolateurs en différents lieux, la fréquence du dépôt et l'effet d'auto-nettoyage naturel par le vent et la pluie.

Dans notre cas, nous nous basons sur la seule source bibliographique dont nous disposons, c'est-à-dire les statistiques météorologiques de l'ONM (Office national de la Météorologie), et les différentes données concernant l'étude du phénomène de la pollution du réseau national de transport électrique de CREDEG (Centre de Recherche et de Développement de L'Électricité et du Gaz), et GRTE (Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Électricité) pour essayer d'aborder le problème de la pollution marine en Algérie [9].

### **II.3. Données météorologiques [11]**

Les conditions météorologiques sont les causes d'apparition des contournements sur les chaînes d'isolateurs ; pour cela nous allons traiter, dans ce chapitre, les facteurs responsables du phénomène du contournement à savoir les facteurs humidificateurs

## **Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

(humidité, brouillard et pluie fine) ainsi que le vent de faible et moyenne vitesse, favorisant le dépôt de pollution. Le traitement des données enregistrées par l'ONM a permis la détermination des moyennes des températures, précipitations et vent des cinq années (2005-2010) sur tout le territoire national. Ce traitement a concerné principalement la partie nord du pays où les stations de mesures sont installées (réseau interconnecté).

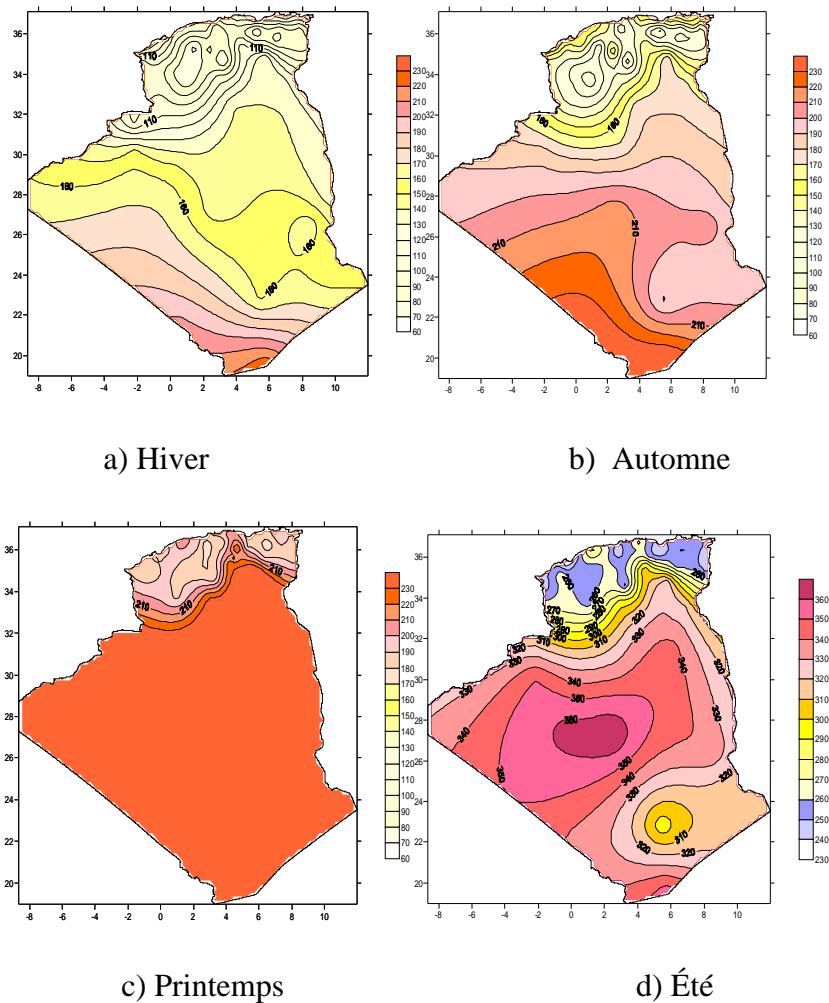
### **II.3.1. Température**

Les températures enregistrées au nord du pays entre 2005 à 2010 (figureII.1) varient en moyenne de :

- 24°C à 36°C en période d'été ;
- de 18°C à 23°C au printemps;
- 12°C à 23°C en automne ;
- 7°C à 23°C en hiver ;
- Les variations de températures en hiver et en automne sont entre 12°C à 18°C ;
- Les variations de températures en été et printemps sont entre 25 à 30°C.

Le climat du nord d'Algérie est relativement chaud (minimum 12°C et maximum 31°C), La différence de température entre le printemps et l'hiver est (10°C de différence).

## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

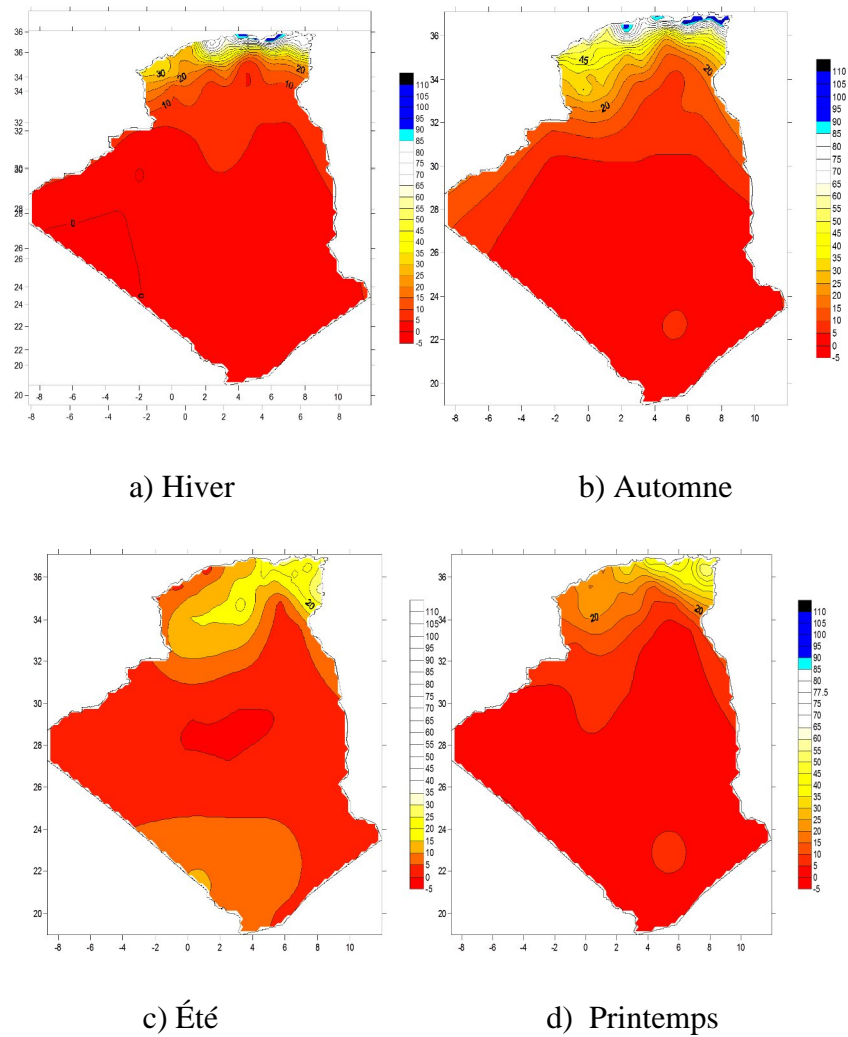


*Figure (II.1) : Distribution saisonnière de température (2005-2010)*

### II.3.2. Précipitation

- Le taux de précipitations en été et au printemps varie entre 0 et 40 mm ;
- Le taux de précipitations en hiver et en automne varie entre 0 et 110 mm ;
- Le climat du nord Algérien est plus ou moins sec pendant les quatre saisons ;
- La région Est de l'Algérie est plus pluvieuse que la région ouest (région sèche) ;
- Les taux de précipitation au printemps et en été sont faibles (climat chaud) ;
- L'hiver et l'Automne sont les saisons les plus pluvieuses.

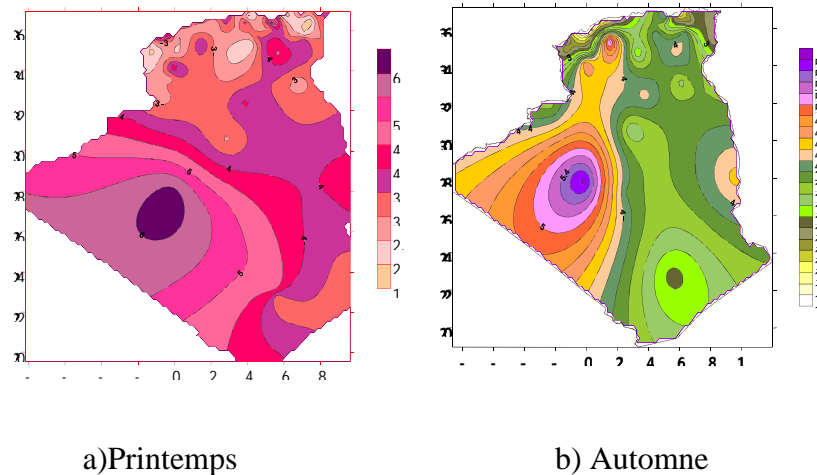
## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien



*Figure (II.2) : Distribution saisonnière de précipitation (2005-2010)*

### II.3.3. Vent moyen

Les vitesses moyennes du vent durant les années (2005-2010) varient de 1.4 à 6.8 m/s.

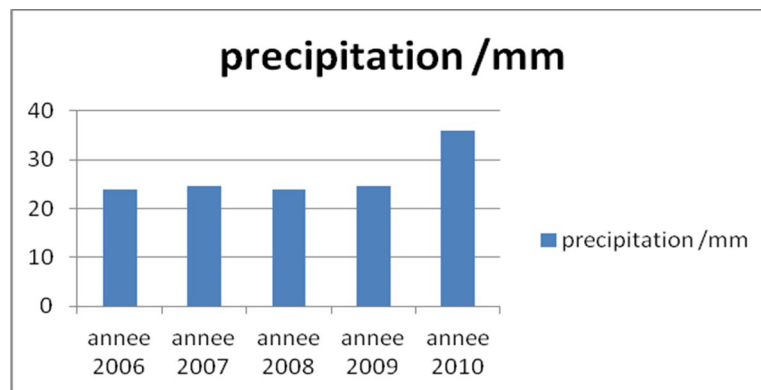


**Figure (II.3) :** Distribution saisonnière de la vitesse moyenne du vent 2005-2010

### II.3.4. Données météorologiques de la Région Ouest

D'après les données météorologiques nous avons pris la moyenne des données des stations météorologiques existantes dans la région Ouest (régions côtières) des années 2006-2010 qui sont les suivantes : Ghazaouet - beni saf - Oran port - Arzew - Mostaganem.

#### II.3.4.1. Précipitations



**Figure (II.4) :** Variation de précipitation pluviale pendant 2006-2010 dans la région Ouest

- Les précipitations en 2006, 2007, 2008 et 2009 varient entre 20 mm et 25 mm
- Les précipitations en 2010 varient entre 35 mm et 40 mm

L'année 2010 a marqué une forte pluviométrie par rapport aux années précédentes. La précipitation enregistrée a été presque d'une quantité moyenne de 30 mm, cette moyenne de précipitation représente une quantité faible pour nettoyer une bonne partie de la pollution

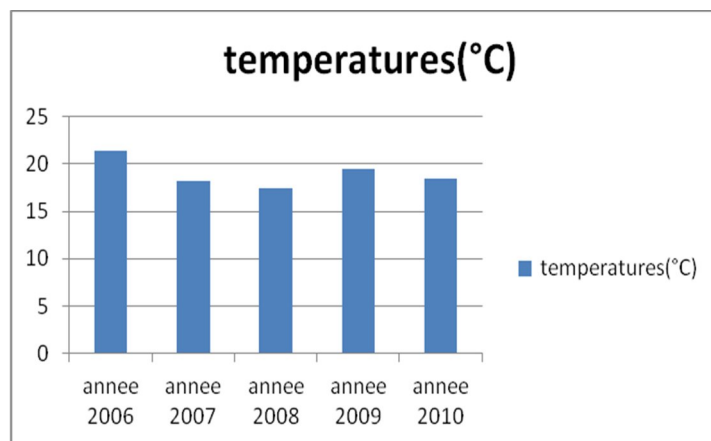
## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

déposée sur la surface des isolateurs (surfaces supérieures). Les fortes pluies permettent le nettoyage des surfaces polluées et diminuent le risque de contournement.

La présence des fines pluies et la rosée matinale constituent les deux principaux facteurs d'humidification qui favorisent l'adhérence de la pollution, ce qui augmente le risque de contournement.

Notons que la pluie fine a un effet négatif sur la tenue d'isolement des isolateurs, par contre les fortes pluies et les vents de vitesse moyenne (les vents forts représentent un facteur de détérioration) sont des excellents agents de lavage naturel. C'est pour cette raison que les compagnies d'électricité intensifient les opérations de lavages sous tension en période d'été et parfois pendant l'hiver dans les régions qui connaissent une période de sécheresse anormales.

### II.3.4.2. Températures

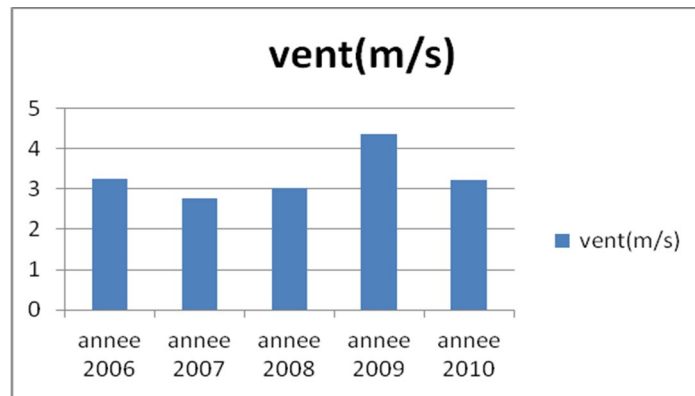


*Figure (II.5): Variation des températures pendant 2006-2010 dans la région Ouest*

- Les températures moyennes en 2006 varient entre 20°C et 30°C ;
- Les températures moyennes en 2007 jusqu'à 2009 varient entre 15°C et 20°C.

Les années 2006, 2009 et 2010 ont été caractérisées par un climat chaud (températures élevée) et une faible pluviométrie.

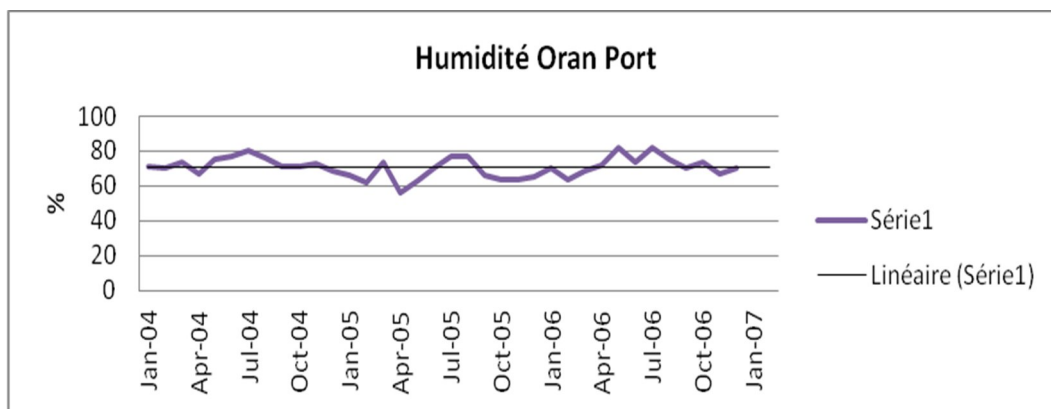
### II.3.4.3.Vent



**Figure (II.6):** Variation du vent pendant 2006-2010 dans la région Ouest

Les vitesses du vent oscillent est entre 3 m/s et 5 m/s, ce qui peut favoriser le dépôt des polluants. L'année 2009 a été très ventée ce qui pouvait favoriser le nettoyage des isolateurs. En revanche, la quantité de pluie était faible, donc l'auto nettoyage n'a pas été efficace.

### II.3.4.4.Humidité



**Figure (II.7):** Variation d'humidité pendant 2004-2007 dans la région Ouest

- Le taux d'humidité varie entre 50% et 85% ce qui représentent un taux important ;
- Le mois de juillet de chaque année est le plus humide ;
- L'année 2006 est la plus humide par rapport aux années 2004 et 2005.

### Remarque

Les conditions météorologiques favorables aux contournements des isolateurs sont réunies dans cette région, à savoir :

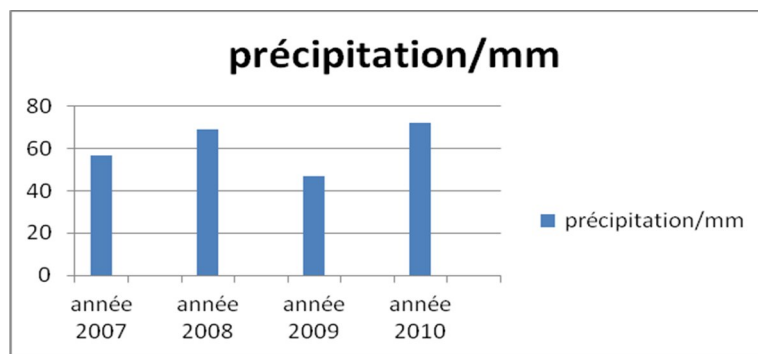
## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

- faible pluviométrie
- taux d'humidité élevé

### II.3.5. Données météorologiques de la Région Centre

D'après les données météorologiques nous avons pris la moyenne des données des stations météorologiques existantes dans la région Centre (régions côtières) des années 2007-2010 qui sont les suivantes : Alger port- Boumerdès.

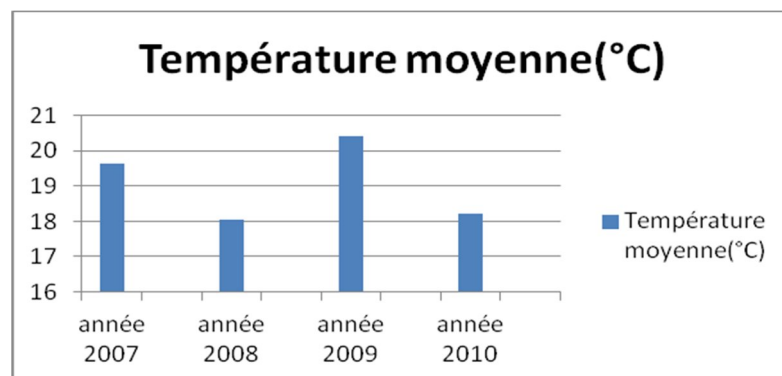
#### II.3.5.1. Précipitation



*Figure (II.8): Variation de précipitations pluviales pendant 2007- 2010  
Dans la région Centre*

Les précipitations enregistrées entre 2007 et 2010 varient entre 45 et 70 mm, cette moyenne de précipitation représente une quantité assez suffisante pour nettoyer une bonne partie de la pollution déposée sur les surfaces des isolateurs (surfaces supérieures).

#### II.3.5.2. Température



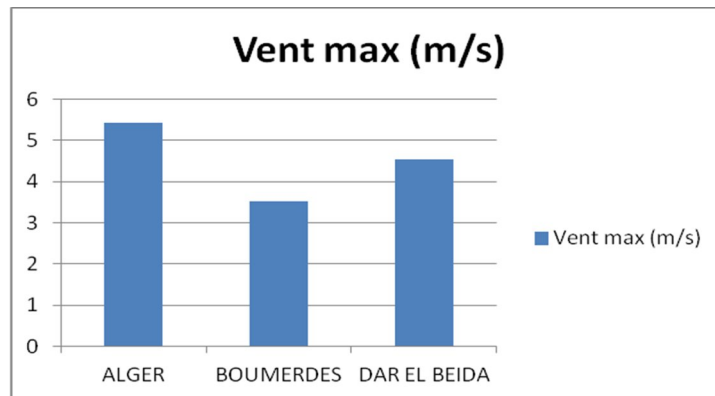
*Figure (II.9): Variation de température pendant 2007- 2010  
Dans la région Centre*

## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

- Les températures varient entre 18°C et 21°C pendant la période 2007 à 2010 ;
- Les années 2007 et 2009 ont été marquées par un climat chaud.

Les hautes températures ont une influence positive, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

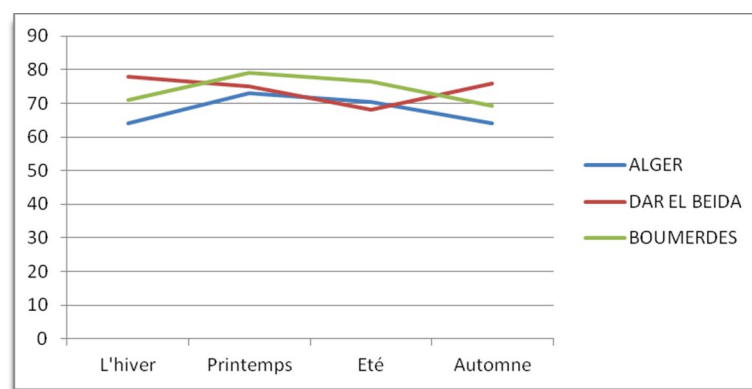
### II.3.5.3.Vent



*Figure (II.10): Variation de la vitesse du vent pendant 2007- 2010  
Dans la région Centre*

La vitesse moyenne du vent varie entre 3 et 6m/s pendant les 2008, 2009 et 2010, c'est une valeur favorable pour l'auto-nettoyage des isolateurs. Le vent est faible dans la région de Boumerdes par rapport à la région d'Alger.

### II.3.5.4.Humidité



*Figure (II.11): Taux d'humidité des quatre saisons pendant 2007-2010  
dans la région Centre*

- Les taux maximum d'humidité ont été marqués au printemps ;

## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

- L'humidité moyenne varie entre 65 et 80% pendant les années 2007 à 2010.

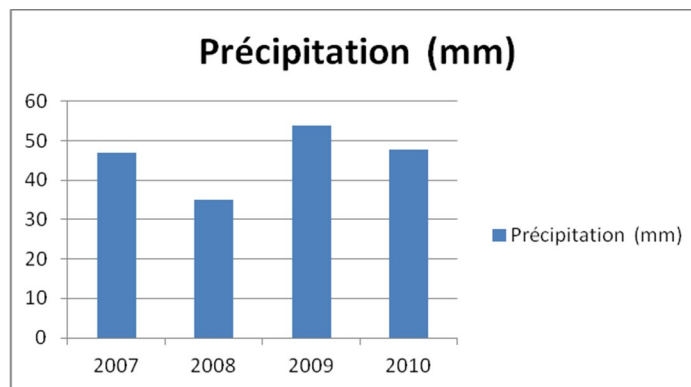
### Remarque

Les conditions météorologiques favorables aux contournements des isolateurs sont réunies dans cette région, à part la pluviométrie qui est assez importante.

### II.3.6. Données météorologiques de la Région Est

D'après les données météorologiques nous avons pris la moyenne des données des stations météorologiques existantes dans la région Est (régions côtières) des années 2007-2010 qui sont les suivantes : Jijel-Skikda-Annaba.

#### II.3.6.1. Précipitation

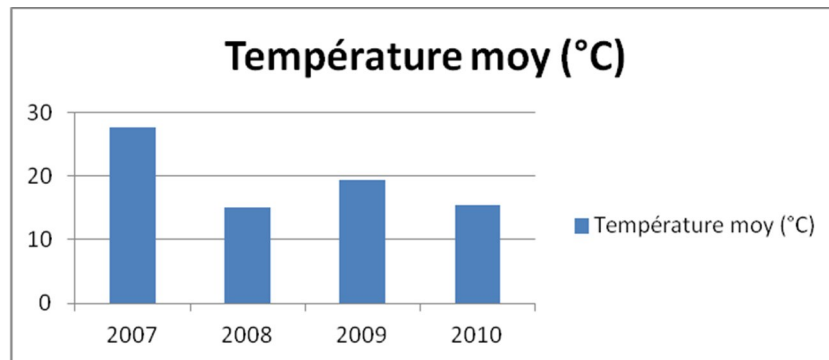


*Figure (II.12): Variation de précipitations pluviales pendant 2007- 2010*

*Dans la région Est*

L'année 2008 est la moins pluvieuse puisqu'elle a enregistré une valeur de 35mm. Les années 2007,2009et 2010 ont enregistré un taux relativement élevé de précipitation par rapport à l'année 2008.

### **II.3.6.2. Températures**

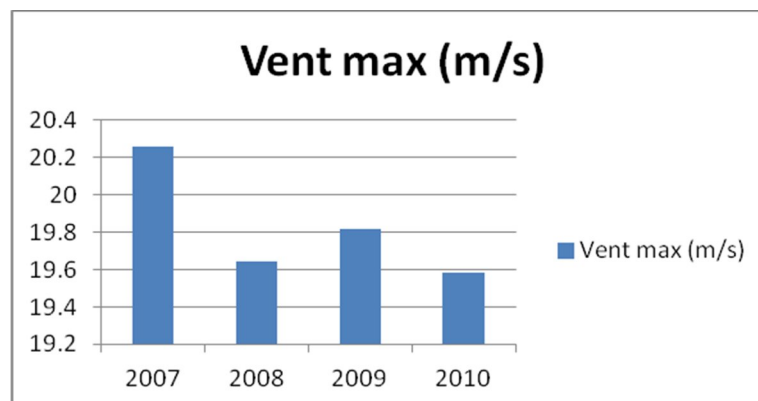


**Figure (II.13):** Variation de température pendant 2007- 2010  
Dans la région Est

L'année 2007 a enregistré des températures très élevées avec une moyenne annuelle de 28°C. Par contre, les autres années ont connu un climat modéré.

Les hautes températures ont une influence positive, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

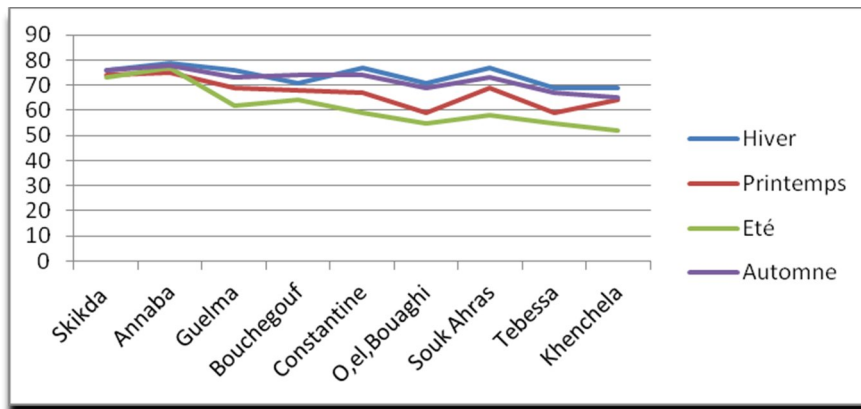
### **II.3.6.3. Vent**



**Figure (II.14):** Variation de la vitesse du vent pendant 2007- 2010  
Dans la région Est

Les vitesses moyennes du vent enregistrées pendant l'année 2007 sont fortes par rapport aux autres années 2008,2009 et 2010.

### **II.3.6.4.Humidité**



**Figure (II.15):** Taux d'humidité des quatre saisons pendant 2007- 2010 dans la région Est

Le taux d'humidité varie entre 50 % et 80% pendant les années 2007 à 2010. Au-delà des saisons hiver et automne le taux d'humidité peut être aussi élevé en été et au printemps (les régions côtières Skikda et Annaba).

Vu les données météorologiques fournies par l'ONM, nous constatons que le taux d'humidité est important (50% à 80 %), ce qui favorise l'humidification des couches polluantes.

La présence d'humidité matinale provoque des contournements. Elle agit négativement sur la surface contaminée des isolateurs car elle engendre l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, surtout pendant les premières heures du matin, notamment pendant les périodes sèches.

#### **Remarques**

- La région Est a connu un climat modéré avec une pluviométrie intéressante mais des vitesses de vent faible.
- Les régions les plus exposées au contournement sont les régions côtières, car le taux d'humidité est important (Oran, Alger, Annaba...etc.).
- D'après l'analyse des résultats des données météorologiques, nous constatons que la région Ouest est la plus exposée au risque de contournement suite à la combinaison des paramètres favorisant le phénomène.

#### **II.4. Sites d'installation des stations de mesure de pollution**

Lors de cette étape, on a défini les coordonnées géographiques des différents sites devant recevoir les 36 stations de mesures de la pollution. Ces stations sont du type 'passif', c'est à dire non alimentées en énergie électrique, il est à noter que ce type de station accumule moins de dépôts que la station active (environ 20%). En plus, elles ne permettent donc pas de donner les mesures des courants de fuite en fonction du temps.

Ces stations permettent de déterminer :

- L'ESDD, (Equivalent Salt Deposit Density)
- NSDD (No Solubl Densité Deposit)
- La Nature des polluants
- La Composition chimique des dépôts de pollution.

Ces paramètres sont à déterminer après analyses des prélèvements, devant se faire selon une périodicité de 3 mois décidé en commun accord entre CREDEG et GRTE.

Le dimensionnement de ces stations a été calculé en fonction de la taille et le poids, en fonction des accessoires et ouvrages transport, représentée sur le schéma. Cette station comporte plusieurs types d'isolateurs utilisés dans le réseau GRTE (figure II.16), à savoir : standard, antipollution, aérodynamique et le composite.



**Figure (II.16):** Schéma de la station de mesure de la pollution

Le choix des sites pour l'installation des stations de mesures a été fait par rapport aux facteurs favorisant les dépôts polluants sur les chaînes d'isolateurs.

**Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

**II.4.1. Proposition des Sites d'installation des stations de mesure**

Les sites installés au bord de la mer, et ceux installés à certaines distances de la mer sont les suivants :

**a. Région centre :**

Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>O.Sly</b>	☀	-	☀	-	☀	☀	-	D = 44 Km	-	-	-	☀
<b>Cherchell</b>	-	-	-	-	☀	☀	-	B = ☀	-	-	☀	☀
<b>Beni.Mered</b>	-	-	-	-	☀	☀	☀	D = 19 Km	-	-	-	☀
<b>O.Fayet</b>	-	☀	☀	☀	☀	☀	-	D = 7 Km	-	-	-	☀
<b>Arbaa</b>	☀	-	-	-	-	-	-	D = 16 Km	-	-	-	☀
<b>Alger Est</b>	-	-	-	-	-	☀	-	D = 4 Km	-	-	-	☀
<b>Cap.Djenet</b>	-	-	-	-	-	☀	☀	B = ☀	-	-	-	☀

- Facteur d'influence ; **D** : Distance/mer, **B** : au bord de mer ; (-) Sans influence directe
















**[Légende]**

1. Cimenteries	4. Décharges	7. Cent-électriques	10. Météo
2. Briqueteries	5. Terrains agricoles	8. Mer	11. Montagnes
3. Carrières	6. Routes – Autoroutes	9. Milieux salins	12. poste & lignes

*Figure (II.17): Sites des stations de mesures par rapport aux facteurs polluants*

**Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

**b. Région Annaba**

Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Skikda</b>								D=0				
<b>El Hadjar</b>								D=3Km				
<b>Jijel</b>								D=2Km				
<b>Azzaba</b>								D=10Km				

**II.4.2. Les Cinq premières stations de mesure**

Le GRTE a validé l'installation de 5 Cinq premières stations parmi les 36 proposées par CREDEG, qui sont réparties sur les quatre régions de transport à savoir : Région d'Alger, Annaba, Oran et Sétif.

**a. Région d'Alger**

Wilaya	Site
<b>Alger</b>	Ouled Fayet
<b>Alger –Est</b>	Boudouaou

**b. Région d'Oran**

Wilaya	Site
<b>Oran</b>	Zahana

**c. Région de Sétif**

<b>Wilaya</b>	<b>Site</b>
<b>Jijel</b>	Jijel

**d. Région d'Annaba**

<b>Wilaya</b>	<b>Site</b>
<b>Annaba</b>	El- Hadjar

**II.4.3. Mise en place des chaînes d'isolateurs au niveau de la station**

Trois chaînes d'isolateurs de chaque type ont été mises en place afin de les accrocher à la poutre horizontale et qui donne un total de douze :

- Trois chaînes d'isolateurs **Composites siliconés alternées** ;
- Trois chaînes d'isolateurs **Anti-pollution U 120** ;
- Trois chaînes d'isolateurs **Standard U 100** ;
- Trois chaînes d'isolateurs **Aérodynamiques U120**.

Les différents types d'isolateurs de la station ont été accrochés par une équipe de lignards après une vérification et un lavage sur site (comme il est connu l'isolateur composite n'a pas été lavé) comme il est illustré dans la figure (figure. II.17) :

## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien



*Figure (II.17) : Accrochage des chaînes d'isolateurs*

En collaboration avec le GRTE, Le CREDEG a effectué les opérations ci-après :

- Prélèvements de dépôt de pollution sur les stations au nombre de 6 (six) dont une active.
- Mesures de conductivité des dépôts de pollution.
- Analyse des échantillons prélevés sur site dans le laboratoire des analyses physicochimiques du **CREDEG**.
- Évaluations des ESDD et NSDD, cette dernière a été réalisée au niveau de laboratoire des analyses physicochimique du CREDEG.

CREDEG a procédé aux :

- Dédutions par abaques (selon la norme 60 - 815), des degrés de sévérité de pollution du site (par stations et type d'isolateurs).
- Reports des résultats (par station et types d'isolateurs) sur les fiches de station afférentes.

### **Remarque:**

Les dates des prélèvements sur sites sont programmées à partir du troisième mois après installation.

#### **II.4.4. Résultats des degrés de sévérité de pollution**

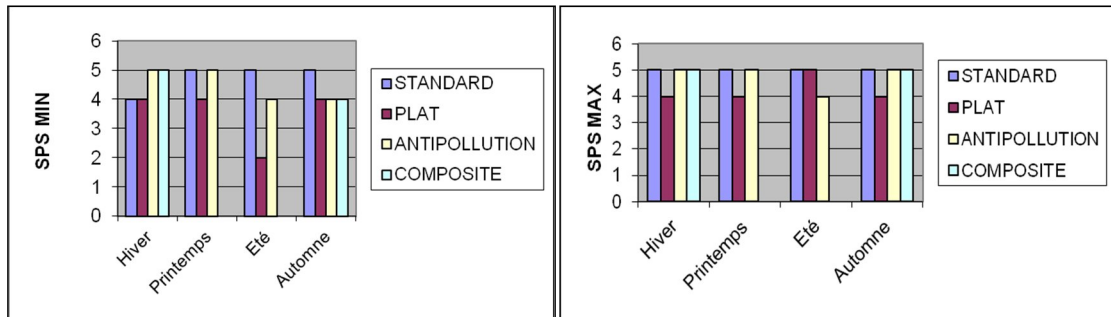
Après analyse des résultats des degrés de sévérité pour chaque type d'isolateur par site, la démarche est la suivante :

- Le minimum des degrés de sévérité de chaque saison représente le meilleur type d'isolateur.

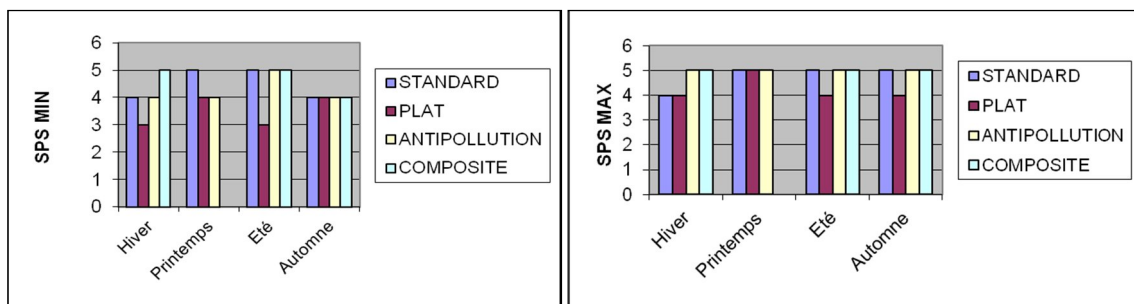
**Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

- Le degré de sévérité de chaque saison sur le standard représente le degré de pollution de la région.

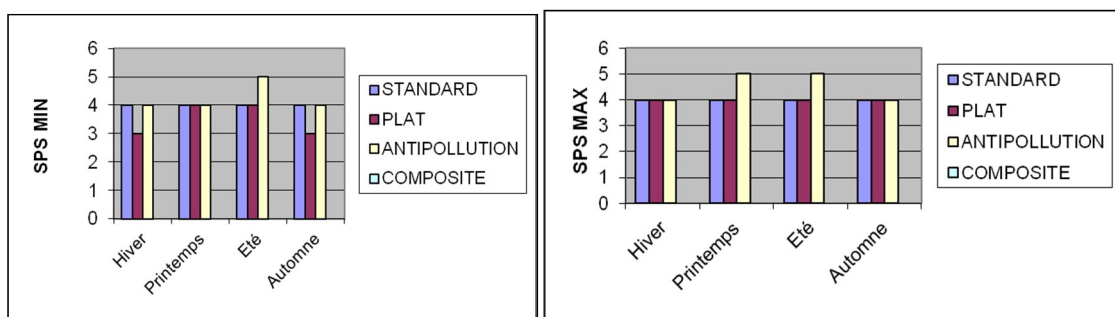
**a. Station d'Alger Est**



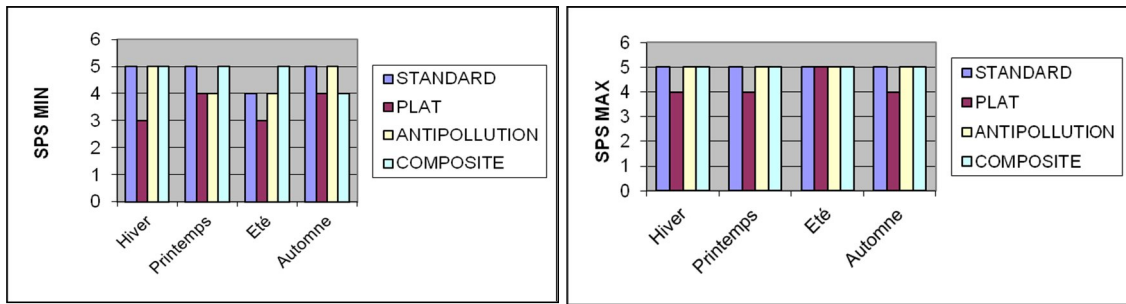
**b. Station d'O. Fayet**



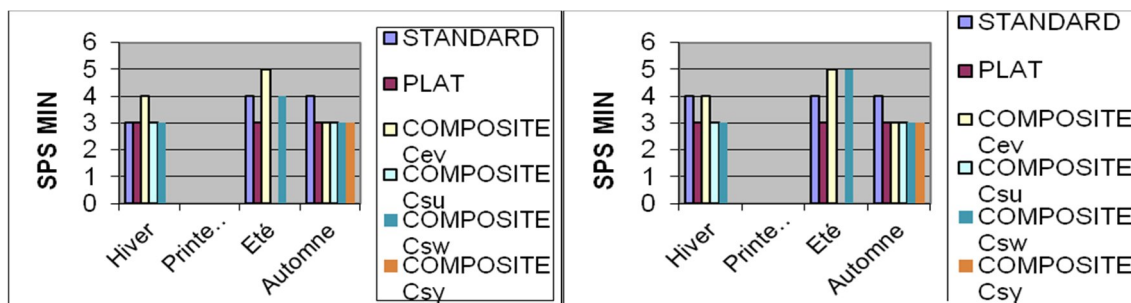
**c. Station Chekfa**



**d. Station d'El Hadjar**



**e. Station de Marsat El Hadjadj**



*SPS MIN : Minimum des degrés de sévérité de chaque saison*

*SPS MAX : Degré de sévérité de chaque saison sur le standard*

**Figure (II.18) : degré de sévérité minimum et maximum pour chaque type d'isolateur par saison**

**II.4.5. Interprétations**

- Le degré de sévérité de pollution est nettement inférieur sur l'isolateur PLAT par rapport aux autres types d'isolateurs ;
- L'isolateur composite présente des degrés de sévérité bas mais d'une façon aléatoire ;
- Nous avons constaté que l'ESDD des surfaces inférieures du STANDARD et ANTIPOLLUTION est toujours supérieur à l'ESDD des surface inférieures du PLAT & COMPOSITE, ceci s'explique par les différences des valeurs des coefficients d'auto – nettoyage ;
- Le degré de sévérité de pollution enregistré dans les saisons printemps et été est le plus élevé ;
- Le plat répond toujours mieux pour le climat côtier ;
- Les deux stations d'Alger (Alger Est et O Fayet) sont polluées de degré 5 ;

## **Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

- Le site de O Fayet a atteint le degré 5 en 2010 pratiquement dans toutes les saisons et surtout au printemps ;
- L'antipollution est l'isolateur qui récolte le maximum de polluants, il répond défavorablement par rapport au standard et au plat ;
- La station d'El Hadjar est considérée très polluée (degré 5), la sévérité est maximale car cette région est très connue par différentes sources de pollution;
- Les sites de stations de Bejaia, et Jijel sont du degré de sévérité 5 du fait que ce soit des villes côtières (embruns marins) et industrielles (usine Cevital) et agricoles [11].

### **II.5. Incidents enregistrés sur le réseau de distribution de la SDC [10]**

#### **II.5.1. Incidents majeurs**

Les mesures préventives peuvent ne pas suffire à protéger le réseau d'aléas à conséquences graves. Il peut alors se produire ce que l'on appelle des incidents majeurs. Ils affectent l'alimentation des clients à une échelle régionale ou nationale. Ils se caractérisent par leur étendue géographique, leur profondeur en termes de clientèle non alimentée et leur durée. Or, plus la panne est profonde et étendue, plus la reprise de service risque d'être longue. Pour cette raison, ces incidents sont particulièrement redoutés.

Les conséquences de tels incidents sont graves :

- D'une part, en raison de la dépendance croissante de notre société vis-à-vis de l'électricité et, par conséquent, de sa sensibilité aux grandes pannes (conséquences économiques, désorganisation de la vie, influence des médias)
- D'autre part, pour des raisons évidentes de sécurité d'alimentation de clients sensibles, comme les hôpitaux par exemple.

#### **II.5.2. Incidents indirects de la pollution**

##### **a. Dégradation du ciment**

Le ciment permettant la fixation du diélectrique aux parties métalliques, peut être aussi à l'origine d'une dégradation mécanique et électrique de l'isolateur, dans les zones fortement polluées à prédominance marine, le ciment est sujet à une augmentation du volume engendrant des contraintes sur les parties métalliques et sur le diélectrique. Les fissurations constatées sur l'isolateur sont dues en majorité à l'effet 'gonflement de ciment'.

## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

Les lignes électriques à proximité des cimenteries et des carrières nécessitent un programme de lavage très intense, et parfois on est obligé d'effectuer le changement de toutes les chaînes d'isolateurs de la ligne victime de ces types de polluants.

### **b. Attaque superficielle de la surface du diélectrique**

La surface de l'isolateur est le siège aussi d'une interaction continue entre les micros arcs (qui essaient de se frayer un chemin vers la masse), et les zones plus ou moins séchées de cette même surface polluée.

Ce phénomène apparaît surtout sur le diélectrique verre, qui finit par se dépolir Offrant ainsi aux dépôts un nid idéal pour s'y incruster.

### **c. les incidents causés par la pollution sur le réseau MT**

La pollution 'isolée' comme citée plus haut est peu active, alors qu'une fois humidifiée elle devient génératrice de contournement et d'incidents sur le réseau.

En réalité, tous les paramètres liés à la pollution (industrie, sol, mer, vent, pluie fine) sont des causes directes ou indirectes de ces incidents.

Un incident majeur résulte de la conjonction de facteurs aggravants d'un aléa initiateur.

Les facteurs aggravants, pris indépendamment les uns des autres, ont été pris en compte par l'exploitant et sont sans conséquences majeures. C'est leur combinaison, dont la probabilité est faible, qui est à l'origine de la profondeur élevée des incidents. On retiendra principalement les facteurs aggravants suivants :

- **Perturbations climatiques importantes** On peut citer les tempêtes entraînant la perte d'un certain nombre d'ouvrages de transport ou de production d'énergie, et la prévision du niveau de consommation erronée en raison de conditions climatiques imprévues...etc.
- **Défaillances de protections, d'automates, de régulations** Dans le cas d'éléments non autotestés, elles sont d'autant plus graves que l'on ne peut en général repérer les défaillances que lorsque ces systèmes sont sollicités, c'est-à-dire en régime d'incident.

## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

- **Circonstances particulières d'exploitation** Il s'agit du cas où il a fallu accepter une certaine fragilisation du système comme la consignation d'ouvrages de transport ou de production pour entretien, et le niveau de consommation élevé...etc.
- **Défaillances humaines** Ce sont celles qui causent la perte d'ouvrages de transport ou de production (par exemple à la suite de fausses manœuvres).

### **II.6.Traitements Statistiques des incidents sur le réseau national**

#### **II.6.1. Incidents durant les trois années (2009-2011)**

Afin de trouver une corrélation entre les incidents, les conditions météorologiques et les résultats des prélèvements [11], ce traitement a concerné uniquement la période 2009-2011 correspondant à la durée de fonctionnement des stations de mesures de pollution (disponibilité des résultats de prélèvements).

Seuls les incidents dus aux phénomènes de pollution ont été pris en considération dans cette analyse pour la détermination des taux annuels d'incidents, leur distribution journalière, saisonnière et annuelle.

<b>Années d'installation des stations de mesure</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
<b>Nombre d'incidents dus à la pollution des lignes 220/60 kV</b>	<b>633</b>	<b>300</b>	<b>168</b>

L'année 2009 a enregistré un nombre important (633) d'incidents dus à la pollution dont la plupart concernent la région Ouest.

#### **II.6.2. Analyse des incidents annuels par saison**

Nous présentons dans ce qui suit la répartition des incidents par saison pour chaque année ainsi que la répartition horaire pour chaque saison.

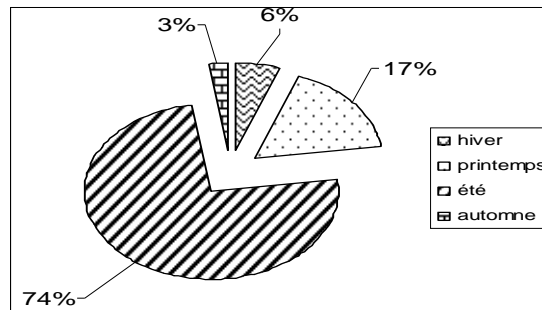
**Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

**II.6.2.1.Répartition des incidents annuels par saison (Année 2009)**

Saisons	Nombre d'incidents	Taux d'incidents
Hiver	38	6%
Printemps	108	17%
Été	468	74%
Automne	19	3%

Ce tableau montre bien que l'été de l'année 2009 a enregistré le taux d'incident le plus important. Durant l'été 2009, l'humidité était importante (taux entre 50% et 85%), les précipitations insuffisantes, les températures élevées et le vent était faible (figure.II.19).

Ces facteurs ont augmenté les risques de contournements des chaînes d'isolateurs, conduisant à un grand nombre d'incidents.



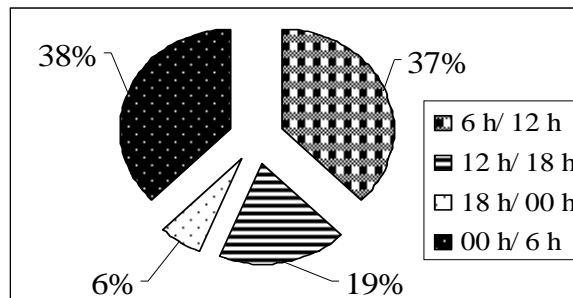
**Figure (II.19) : Répartition des incidents de l'année 2009 par saison**

**II.6.2.1.1.Répartition horaire des incidents pour chaque saison**

nombre d'incidents par heures	6h-12h	12h-18h	18h-00h	00h-6h
nombre d'incidents en automne par heures	7	4	1	7
nombre d'incidents en hiver par heures	5	4	16	13
nombre d'incidents au printemps par heures	15	4	35	54
nombre d'incidents en été par heures	47	5	70	346

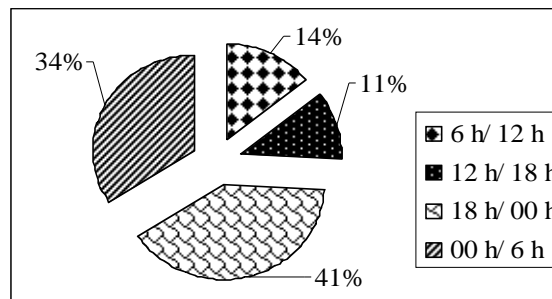
**Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

Les phénomènes de condensation ont eu lieu surtout le matin juste avant et après le lever du soleil (brouillard, rosée...etc.). 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 lever du soleil s'effectue entre 6 h et 7 h 50. On constate que le plus grand nombre d'incidents a eu lieu entre 00 h et 6 h mais aussi entre 6 h et 12 heures.

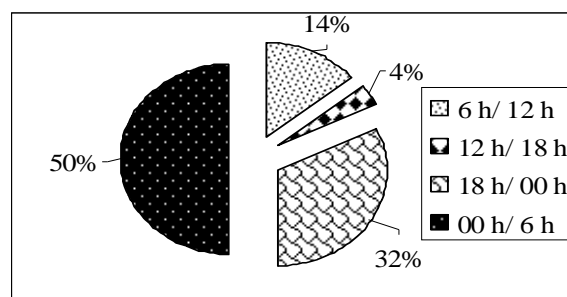


**Figure (II.20): Répartition horaire des incidents en automne**

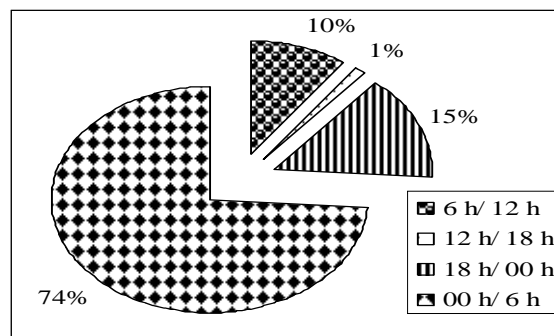
En hiver, un grand nombre d'incidents est observé entre 18 h et 24 heures (coucher du soleil au environ de 18 h) mais aussi entre 00 h et 6 heures.



**Figure (II.21): Répartition horaire des incidents en hiver**



**Figure (II.22) : Répartition horaire des incidents au printemps**

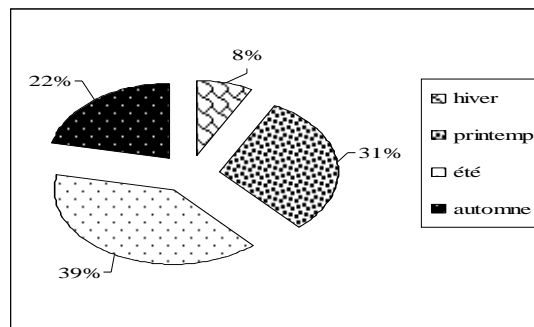


*Figure (II.23) : Répartition horaire des incidents en été*

**II.6.2.2. Répartition des incidents annuels par saison (Année 2010)**

Saisons	Nombre d'incidents	Taux d'incidents
Hiver	24	8%
Printemps	93	31%
Été	117	39%
Automne	66	22%

Le plus grand nombre d'incidents a eu lieu toujours en été.



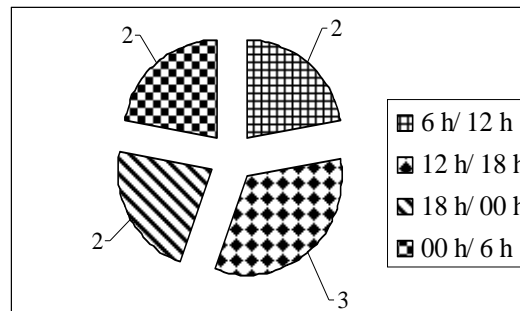
*Figure (II.24) : Répartition des incidents de l'année 2010 par saison*

**II.6.2.2.1. Répartition horaire des incidents pour chaque saison**

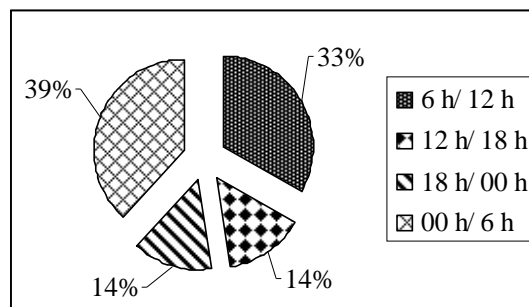
Nombre d'incidents par heure	6h-12h	12h-18h	18h-00h	00h-6h
Nombre d'incidents en automne par heure	17	19	13	17
Nombre d'incidents en hiver par heure	9	3	3	9
Nombre d'incidents au printemps par heure	10	17	39	27
Nombre d'incidents en été par heure	27	8	22	60

## Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien

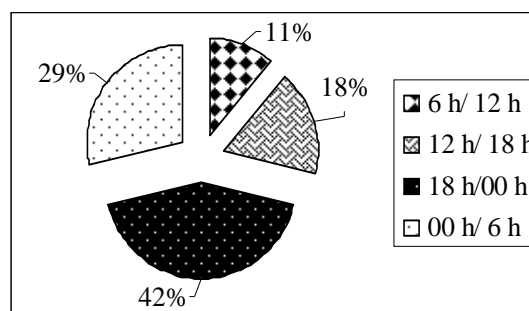
Concernant les trois saisons (hiver, printemps, et été), les interprétations sont les mêmes que celles de l'année 2009. Ce qui n'est pas le cas pour l'automne où il y a eu moins d'incidents en 2009.



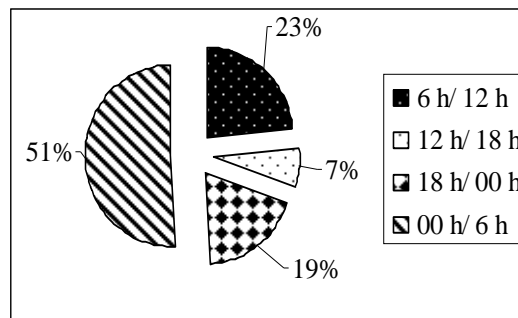
*Figure (II.25): Répartition horaire des incidents en automne*



*Figure (II.26) : Répartition horaire des incidents en hiver*



*Figure (II.27): Répartition horaire des incidents au printemps*



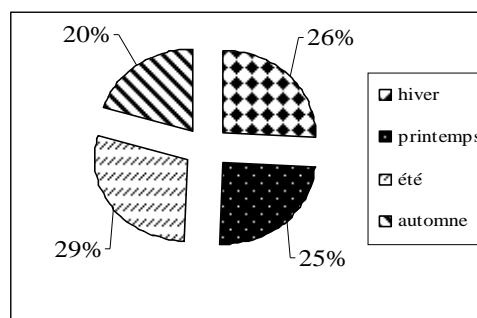
*Figure (II.28) : Répartition horaire des incidents en été*

**II.6.2.3. Répartition des incidents annuels par saison (Année 2011)**

Saisons	Nombre d'incidents	Taux d'incidents
Hiver	43	26%
Printemps	42	25%
Été	49	29%
Automne	34	20%

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 2007 a été exceptionnel en termes de précipitations pluviales.

En effet, des quantités très importantes de pluie ont eu lieu pendant ce mois, ces précipitations pluviales ont naturellement assuré le lavage (auto nettoyage) des isolateurs, ce qui s'est traduit par une réduction considérable des incidents pendant l'été.

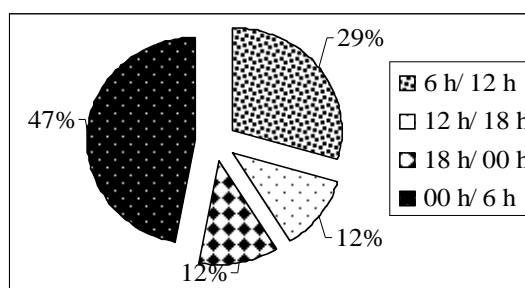


*Figure (II.29) : Répartition des incidents de l'année 2011 par saison*

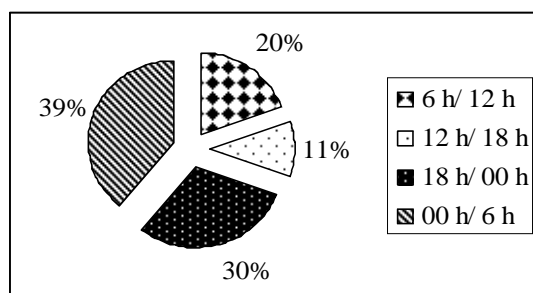
**II.6.2.3.1. Répartition horaire des incidents pour chaque saison**

Nombre d'incidents par heure	6h-12h	12h-18h	18h-00h	00h-6h
Nombre d'incidents en automne par heure	10	4	4	16
Nombre d'incidents en hiver par heure	9	5	13	17
Nombre d'incidents au printemps par heure	7	7	12	16
Nombre d'incidents en été par heure	11	7	6	25

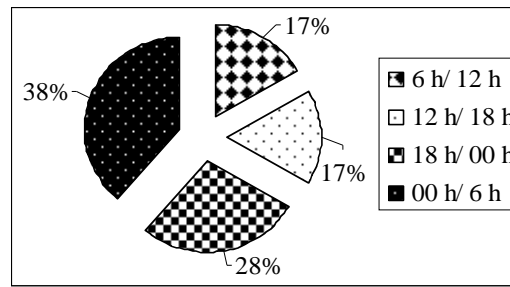
Les observations et interprétations faites pour l'année 2010 peuvent être appliquées aussi pour l'année 2011.



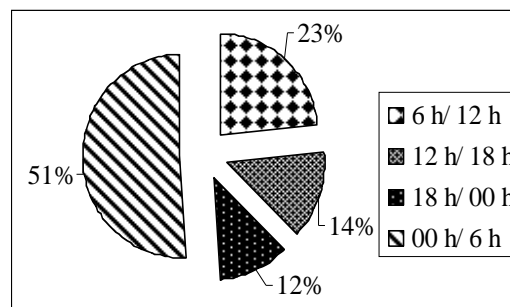
*Figure (II.30): Répartition horaire des incidents en automne*



*Figure (II.31) : Répartition horaire des incidents en hiver*



*Figure (II.32) : Répartition horaire des incidents au printemps*



*Figure (II.33) : Répartition horaire des incidents en été*

### **Remarque**

Tigzirt est une région côtière située à 40 km au nord de [Tizi Ouzou](#), à 120 km à l'est d'[Alger](#), et qui fait partie des stations de mesure de pollution installés sur le territoire national.

Cette station est appelé station de Tizi ouzou, qui fait partie de la région d'Alger selon la répartition des stations de mesure, qui fait que Tizi ouzou comme Blida, Alger-Est, Khemis Meliana, Oued Sly, Ouled fayet, Si Mustapha font toutes parties de la région d'Alger [12].

### **II.7.Conclusion**

Apparemment, les conditions climatiques sont de plus en plus défavorables pour les équipements de haute tension, notamment dans les villes côtières. En général le climat Algérien favorise les dépôts de pollution sur les isolateurs, car ce dernier est soit chaud et humide (rosée matinale), soit pluvieux mais non venté, et parfois pas très pluvieux ce qui provoque la sécheresse.

**Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

**Chapitre II Problèmes de contournement des isolateurs sous pollution marine dans le réseau électrique algérien**

### .III.1.Introduction

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués. Le but de ces travaux est d'élaborer un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels intervenant dans la génération et la propagation des arcs électriques sur les surfaces isolantes. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (homogènes ou non homogènes), de la résistivité des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement [14].

Dans ce qui va suivre, nous allons exposer une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développés dans ce domaine. Devant le nombre incalculable de paramètres pouvant intervenir dans le comportement des isolateurs, des modèles de laboratoires sont parfois adoptés par les chercheurs. Ces travaux présentent l'avantage de contourner la difficulté liée à la forme complexe de l'isolateur, par des modèles à géométrie simple.

Nous citons brièvement quelques-uns de ces modèles sous pollution.

### III.2.Principaux modèles statiques de contournement

#### III.2.1.Modèle d'Obenaus

Le premier chercheur qui était à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue est Obenaus [14, 15,16]. Partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  représentant la résistance de la pollution (Fig.III.1) où  $L$  représente la longueur de fuite totale, il en a déduit la tension d'arc :

$$V = \frac{I \cdot R_p \cdot x}{L} \quad (III.1)$$

Où  $I$  est le courant de fuite,  $n$  et  $N$  les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

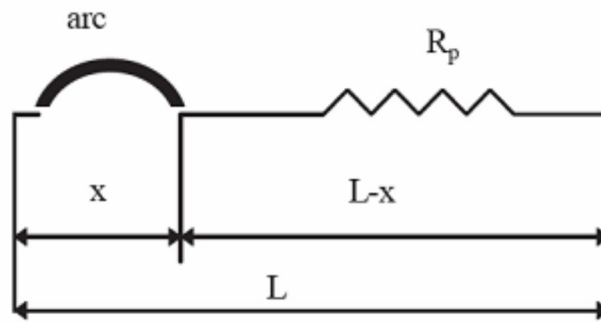


Figure.III.1: circuit électrique équivalent [16, 17]

En effet, en appliquant la loi d'Ohm à ce circuit, on peut écrire:

$$V = V_{arc} + V_{Rp} + R_p(X).I \quad (III.2)$$

Avec :

V : est la tension appliquée ;

$V_{arc}$  : la chute de tension totale aux bornes des électrodes, cette dernière dépend des conditions expérimentales ;

$R_p(X)$  : est la résistance de la couche polluée.

$V_{arc}$  : la tension d'arc telle que :

$$V_{arc} = R_{arc}(X).I \quad (III.3)$$

$R_{arc}$  : est la résistance d'arc par unité de longueur ;

I : le courant qui traverse la couche polluée.

La décharge est caractérisée par la présence d'un champ électrique longitudinal  $E_a$  :

$$E_a = \frac{V_{arc}}{x} = N.I \quad (III.4)$$

D'où l'équation:

$$V_{arc} = N.X.I \quad (III.5)$$

Ainsi, on obtient l'équation de la tension totale appliquée au système:

$$V = V_{arc} + N.x.I + R_p(x).I \quad (III.6)$$

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $N$  dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge  
 $0.40 \leq n \leq 1$  et  $3 \leq N \leq 500$ .

**III.2.2. Modèle de Neumarker**

En reprenant les travaux d’Obenaus, et en y ajoutant l’hypothèse d’une couche de pollution de résistance  $r_p$  uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker [17, 18, 19] a proposé l’expression suivante pour la résistance de pollution  $R_p$  :

$$R = r (L - x) \tag{III.7}$$

En introduisant cette expression dans le modèle d’Obenaus et en négligeant les chutes de tension cumulées aux électrodes, la tension  $V$  aux bornes de l’isolateur sera :

$$V = V + r (L - x) \tag{III.8}$$

Ou encore :

$$V = \dots + r (L - x) \tag{III.9}$$

Ainsi, Neumarker déduit le courant et la longueur d’arc critiques :

$$I = \dots \tag{III.10}$$

Et :

$$X = \dots \tag{III.11}$$

L’expression de la tension critique de contournement est par conséquent :

$$U = A \dots \tag{III.12}$$

Où  $A$  et  $n$ , sont les constantes empiriques qui caractérisent l’état statique de l’arc.

III.2.3.Modèle de Danis

Un autre modèle a été développé par Danis [20, 21] dans lequel le montage expérimental est constitué d'une plaque isolante, munie de deux électrodes identiques, rectangulaires et placées aux deux extrémités de la plaque (Fig.III.2). Des zones sèches sont préétablies sur le modèle, à différents endroits de la plaque, afin d'étudier le développement de l'arc électrique.

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire par rapport à la longueur, l'équation qui régit le modèle est :

$$V = K.I + r (L - x).I \tag{III.13}$$

Avec :  $n \leq 0.5$  et  $200 \leq K \leq 400$  ;

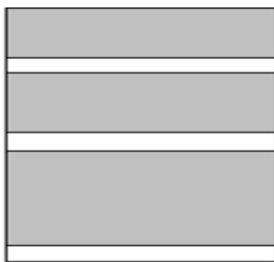
$r_p$  : est la résistance linéique.

Le courant et les tensions critiques déduites par l'auteur sont donnés par les expressions :

$$I = \frac{U}{L(Kr + 1)} \tag{III.14}$$

Et :

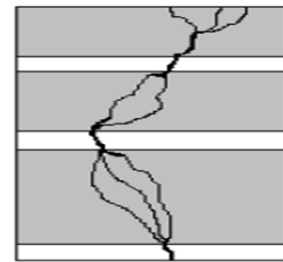
$$U = L(Kr + 1)I = K.I \tag{III.15}$$



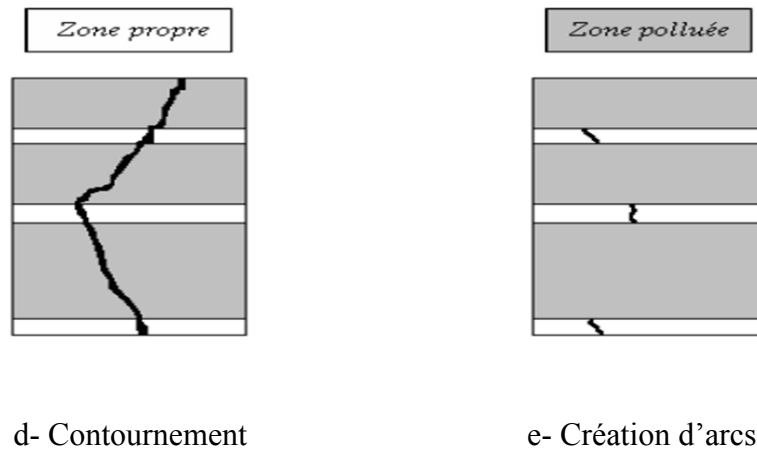
a- Absence d'arcs



b- Formation d'arcs



c- Connexion d'arcs



d- Contournement

e- Création d'arcs

*Figure.III.2 : Modèle de Danis [21]***III.2.4.Modèle de Rizk [22]**

À partir d'une analyse théorique, Rizk a décrit le phénomène d'entretien de l'arc par le mécanisme de la rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité diélectrique de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale  $U_c$  (tension de contournement minimale) nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique ( $r_p$ ) et la longueur de fuite  $L$  de la forme :

$$U_c = 23 \cdot r_p \cdot L \quad (\text{III.16})$$

**III.2.5.Modèle de Claverie et Porcheron**

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron. Ces auteurs ont montré que pour un modèle d'isolateur plan (Fig.III.3), la tension d'arc est de la forme:

$$V_{arc} = 100 \sqrt{L} \quad (\text{III.17})$$

Et la tension minimale d'entretien de l'arc :

$$V_{min} = 800 \sqrt{L} \quad (\text{III.18})$$

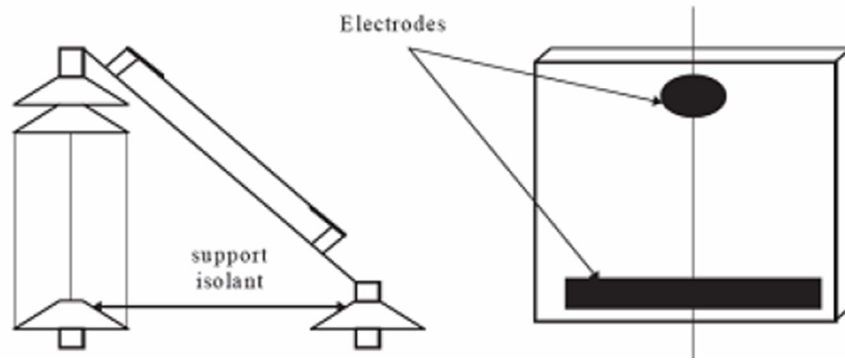


Figure.III.3: Montage expérimental pour le modèle de Claverie et Porcheron

**III.2.6.Modèle de Rao et Gopal**

D’après Rao et Gopal, la tension donnée par l’équation, n’est valable que pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l’arc, ce type d’équation peut être contesté lorsque la décharge se réamorce périodiquement. Ainsi, ces auteurs ont essayé d’expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement, en introduisant une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge :

$$U = \alpha + (\beta + x)V \ln - - 3 \tag{III.19}$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $V$  et  $\delta$  sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles s’amorce la décharge. Cette équation a été établie par Reider, elle exprime la caractéristique  $U(I, x)$  d’un arc de faible intensité brûlant dans l’atmosphère.

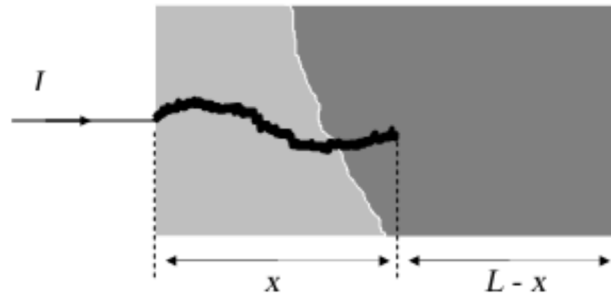
**III.2.7.Modèle d’Alston et Zoledziowski**

En tenant compte de l’hypothèse de Neumarker et pour une tension d’application dépassant quelques kilos volts, Alston et Zoledziowski ont déterminé la condition de maintien de l’arc électrique, dans le cas d’un isolateur cylindrique de longueur  $L$  (Fig.III.4) :

$$V = (n + 1)(Nx) \frac{(\quad)}{\quad} \tag{III.20}$$

Avec  $x$  : la longueur d’arc.

$N$  et  $n$  : les constante empiriques qui caractérisent l’état statique de l’arc.



**Figure.III.4:** Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledziowski [22]

### III.2.8.Modèles de Tegar

#### a. Cas de pollution continue

Tegar a élaboré un modèle statique sous tension alternative. Son modèle est basé sur celui de Claverie et Porcheron, et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée [13, 23].

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

$$R = \frac{K}{I} = \rho F \quad (\text{III.21})$$

Où  $\rho$  : représente la résistivité de la couche de pollution ;

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

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

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

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

#### b. Cas de pollution discontinue

Tegar a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques. Les composantes de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée.

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

La figure (Fig.III.5) représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande est constituée d'une résistance  $R_{0i}$  en parallèle avec une capacité  $C_{0i}$ . Pour chaque bande polluée, ces circuits sont shuntés par une résistance  $R_{pi}$  représentant la couche de pollution.

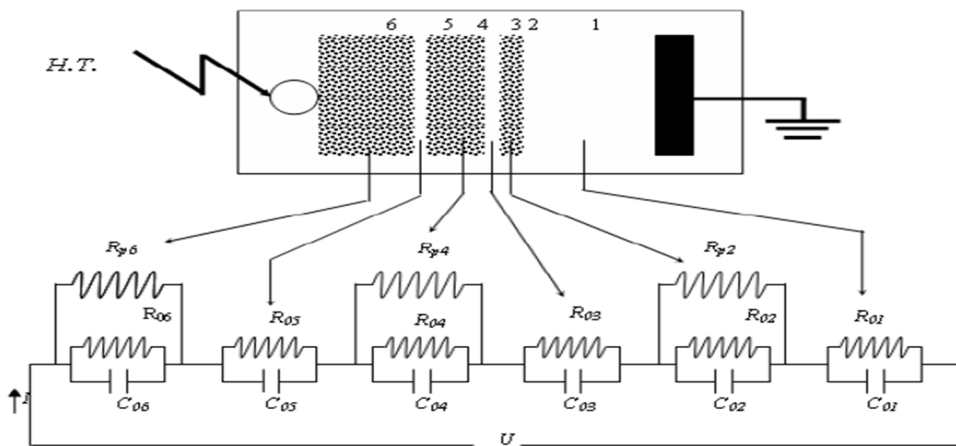


Figure.III.5 : Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Tegar

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaires et selon la recommandation de la CEI 60-1 [24], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par :

$$R = R \int - = R - = R f - \tag{III.22}$$

Avec :

$R_{pi}$ : la résistance de la couche de pollution;

$dl$ : élément de longueur;

$L_i$ : la longueur de la pollution;

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

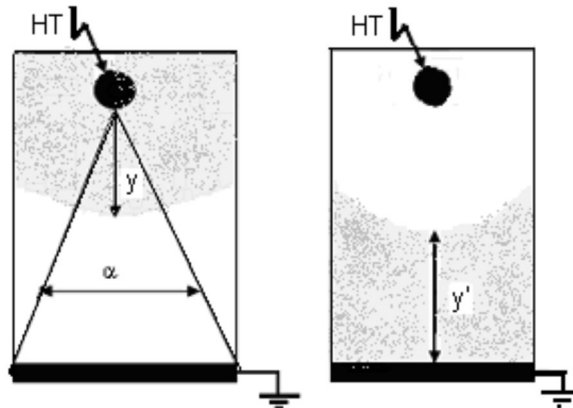
$f$ : le facteur de forme.

### III.2.9.Modèle de Namane, Mekhaldi et Bouazabia

Namane, Mekhaldi, et Bouazabia [13, 25] ont étudié l'influence de la répartition discontinue de la couche de pollution et ont développé un modèle qui tient compte de la position par rapport aux électrodes (Fig.III.6), de la largeur et de la conductivité de la couche



$$Z(y') = Z(Y' = 0) \text{ ——— } + - \text{Log ———} \quad (\text{III.29})$$



(a) pollution côté HT (b) pollution côté terre

Figure.III.6: Modèle expérimental de Namane, Mekhaldi et Bouazabia

### III.3.Principaux modèles dynamiques de contournement

Alors que plusieurs paramètres évoluent dans le temps, l'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité et parer à cet handicap, de nouveaux modèles, tenant compte de la variation dans le temps de certains paramètres, ont été proposés. Ainsi, des lois physiques sont utilisées pour établir des critères de propagation de la décharge (arc) et pour étudier la dynamique de cette décharge (vitesse en particulier) [22].

#### III.3.1.Mécanisme de propagation

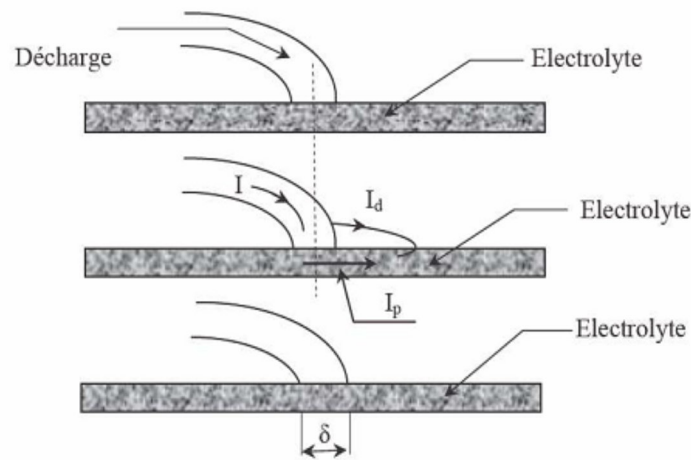
Dans le phénomène de propagation de l'arc électrique, il existe deux modes principaux:

##### a. Propagation par ionisation

Wilkins et Al - Baghdadi ont proposé un mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu du pied de la décharge. Selon Wilkins, la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant pied de la décharge est grande, étant donné que la température ainsi que le potentiel, sont élevés dans cette région.

Si l'ionisation est suffisante, alors il y a circulation d'un courant électrique. La conductivité du nouveau trajet du courant va augmenter avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent dans l'électrolyte reste constante (Fig.III.7). Par conséquent le courant total change progressivement de trajet, entraînant ainsi une élongation  $\delta$  de la décharge. Wilkins parle d'ionisation, de passage de courant et de l'existence d'un champ au pied de la décharge

sans évoquer le claquage de l'air. Sous le nom d'ionisation, il considère en réalité une rupture diélectrique progressive.

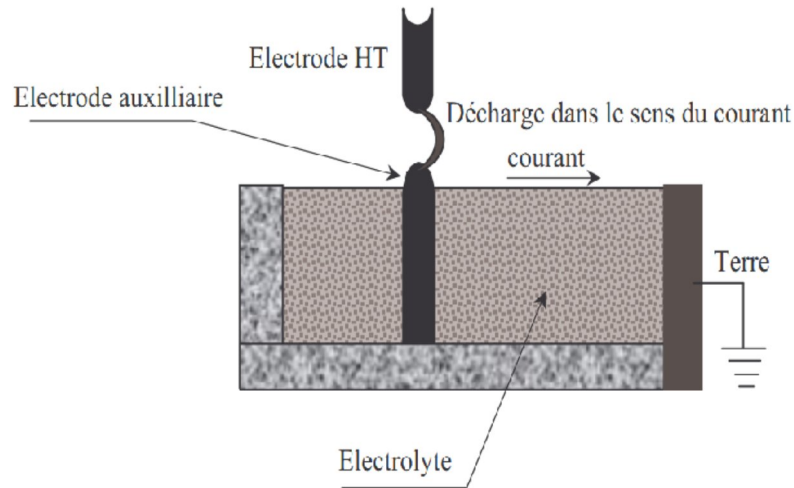


*Figure.III.7: Mécanisme de propagation par ionisation proposé par Wilkins*

#### **b. Propagation par force électrostatique**

À partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal a essayé de mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc. Il a démontré que du point de vue électrique macroscopique, cette force était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel, elle-même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante. Cette force va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (Fig.III.8). Une fois les conditions critiques satisfaites, la décharge se déplacera alors vers l'électrode de masse [22].

D'après l'auteur, l'existence de cette force implique en effet, que l'on considère la décharge comme un élément de circuit doué d'une certaine auto consistance macroscopique et susceptible de s'étirer de façon plus ou moins élastique.



**Figure.III.8:** courbure de la décharge dans la direction de l’écoulement du courant mettant en évidence l’existence d’une force

**III.3.2.Modèles dynamiques**

Les modèles statiques, permettant la prédiction des différents paramètres caractérisant l’évolution de la décharge électrique sur les surfaces isolantes, traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d’extension. Ils nous donnent une image à un temps fixe reflétant une situation donnée. Par ailleurs, les modèles dynamiques représentent le mécanisme de contournement, qui tient compte des changements instantanés des paramètres caractérisant l’arc électrique.

**a. Modèle de Rizk et Nguyen**

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr :

$$R_{arc} = \frac{A}{I^{n+1}} \left( \frac{I}{I_0} \right)^{\tau} \quad (III.30)$$

Avec :  $\tau = 100 \mu s$ , constante de temps de l’arc ;  
 $n = 0,8$  et  $A = 60$ , constantes de la caractéristique statique de l’arc.

**b. Modèle d’Anjana et Lakshminarasimha**

Anjana et Lakshminarasimha ont proposé un modèle dynamique basé sur l’équation de Mayr et sur le modèle statique d’Obenaus. Ils ont supposé que l’isolateur est divisé en un certain nombre de bandes formant des anneaux symétriques par rapport à l’axe de l’isolateur et que l’arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique dont l’énergie est donnée par :

$$w = -KTM \quad (\text{III.31})$$

Où  $T$  est la température de l'arc,  $M$  le nombre de particules neutres dans l'arc et  $K$  la constante de Boltzmann.

Pour la propagation de l'arc, les chercheurs proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale  $w$  est supérieure ou égale à l'énergie  $w_h$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température où  $w$  est donné par l'expression suivante:

$$W = (E_{\text{arc}} I_{\text{arc}} - P) \Delta t \quad (\text{III.32})$$

$E_{\text{arc}}$  étant le gradient dans l'arc,  $I_{\text{arc}}$  le courant de la décharge,  $P$  les pertes par unité de longueur considérées comme constantes,  $\Delta t$  l'incrément du temps.

Cette valeur sera calculée en fonction des pertes par conduction et des pertes par rayonnement. La température de l'arc et la température ambiante sont supposées constantes et égales respectivement à 3000°K et 300 °K.

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de  $\Delta V$  et le programme est repris depuis le début. Par contre, si la condition est satisfaite, la vitesse de propagation de l'arc est calculée par [22]:

$$V = \mu E \quad (\text{III.33})$$

Où  $\mu$  est la mobilité de l'arc.

On en déduira, grâce au pas de temps  $\Delta t$ , la variation de la longueur d'arc  $dx$  ( $dx = v\Delta t$ ).

### c. Modèle de Sundararajan et Gorur

En adoptant le critère de Hampton, Sundararajan et Gorur proposent un modèle dynamique en continu qui ressemble à celui d'Anjana et Lakhminarasimha en utilisant l'expression suivante :

$$E = A \cdot r \quad (\text{III.34})$$

Avec  $r$  : la résistance linéique de la tension ;

$A = 63$  et  $n = 0.5$  : les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

Notons que la valeur de  $E_p$  utilisée par Sundrarajan et Gorur est en fait la contrainte critique établie par Neumarker :

$$E = A \cdot r \quad (\text{III.35})$$

Dans le cas alternatif, Sundararajan et Gorur utilisent le même modèle en y remplaçant le critère de propagation de l'arc par la condition de ré allumage établie par Rizk [30]:

$$— = 23. r \cdot \quad (III.36)$$

**d. Modèle Dhahbi, Beroual et Krahenbul**

Ces chercheurs [17, 26] ont proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente  $Z_{eq}$  d'un circuit électrique (Fig.III.9), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

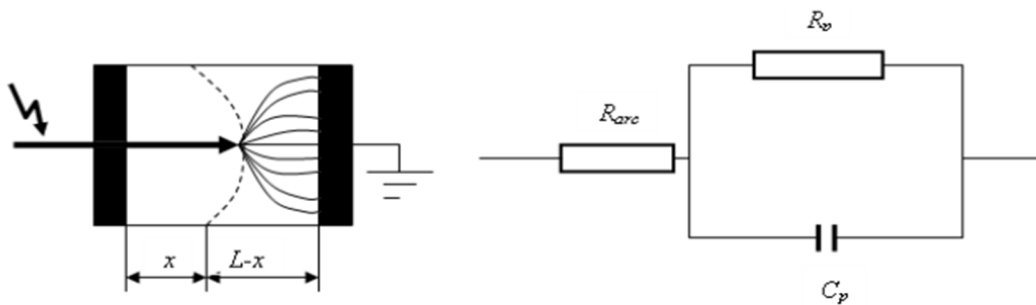


Figure III.9 : Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent [26]

En utilisant la condition nécessaire à la propagation de l'arc, donnée par :

$$— \leq 0 \quad (III.37)$$

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E \geq \sqrt{\quad} \quad (III.38)$$

Où :

$$a = 1 + \omega \rho \varepsilon \quad (III.39)$$

(Sous tension continue a=1) ;

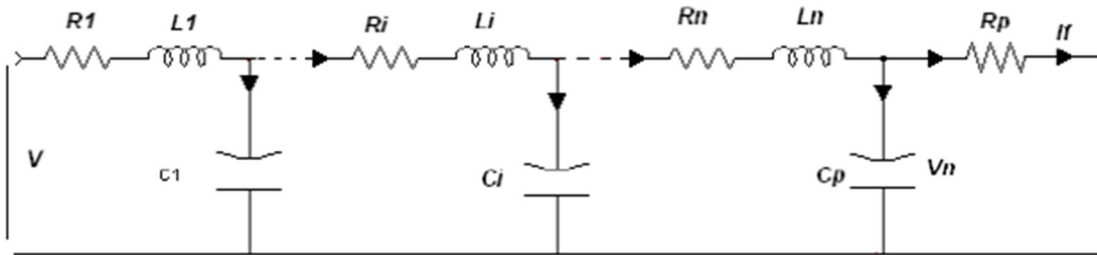
$\omega$  : la pulsation ;

$\rho$  : la résistivité de la pollution ;

$\varepsilon$  : La permittivité de la pollution.

### e. Modèle de Dhahbi et Beroual

Ces deux chercheurs [27, 28] considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (Fig.III.10). Sachant que pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants :  $R_i$ ,  $C_i$ ,  $L_i$  et  $U_i$ .



*Figure.III.10: Circuit électrique équivalent de la propagation de l'arc de Dhahbi et Beroual [28]*

Où

$R_p$  : la résistance de la pollution ;

$C_p$  : la capacité de la couche de pollution ;

$R_i$  : la résistance de l'arc ;

$C_i$  : la capacité de la décharge ;

$L_i$  : l'inductance de la décharge.

Ce modèle est basé sur le critère d'impédance pour déterminer les paramètres ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ), l'équation de Mayer pour calculer la variation de la résistance, et l'approximation sphérique pour déterminer la capacité. Et concernant l'inductance du canal de la décharge, les auteurs ont utilisé les simplifications proposées par I. Fofana et A. Beroual.

### f. Modèle de Tegar

Le modèle de Tegar en tension continue se base sur celui d'Obenaus et utilise le critère de propagation de Hampton. Par ailleurs, Tegar a représenté la résistance de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite. Concernant le rayon d'arcs, il a utilisé l'expression donnée par Wilkins qui met en évidence la relation entre le rayon au pied de l'arc et le courant  $I$  dans l'arc.

Le modèle qu'il a proposé permet d'évaluer la tension de courant et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte de la géométrie de l'isolateur ainsi que des variations instantanées de certains paramètres importants à savoir le courant de fuite, la vitesse de propagation, la puissance et l'énergie fournie par la source, le champ dans la pollution et au pied de l'arc, la résistance de la pollution, le rayon du canal

d'arc, la résistance de ce canal, sa longueur, sa résistance linéique, sa résistivité, sa tension ainsi que la puissance et l'énergie qui lui ont été transférées [22].

### III.3.3. Organigramme typique des modèles dynamiques

L'organigramme typique des modèles dynamiques est présenté dans la Figure (Fig.III.11) :

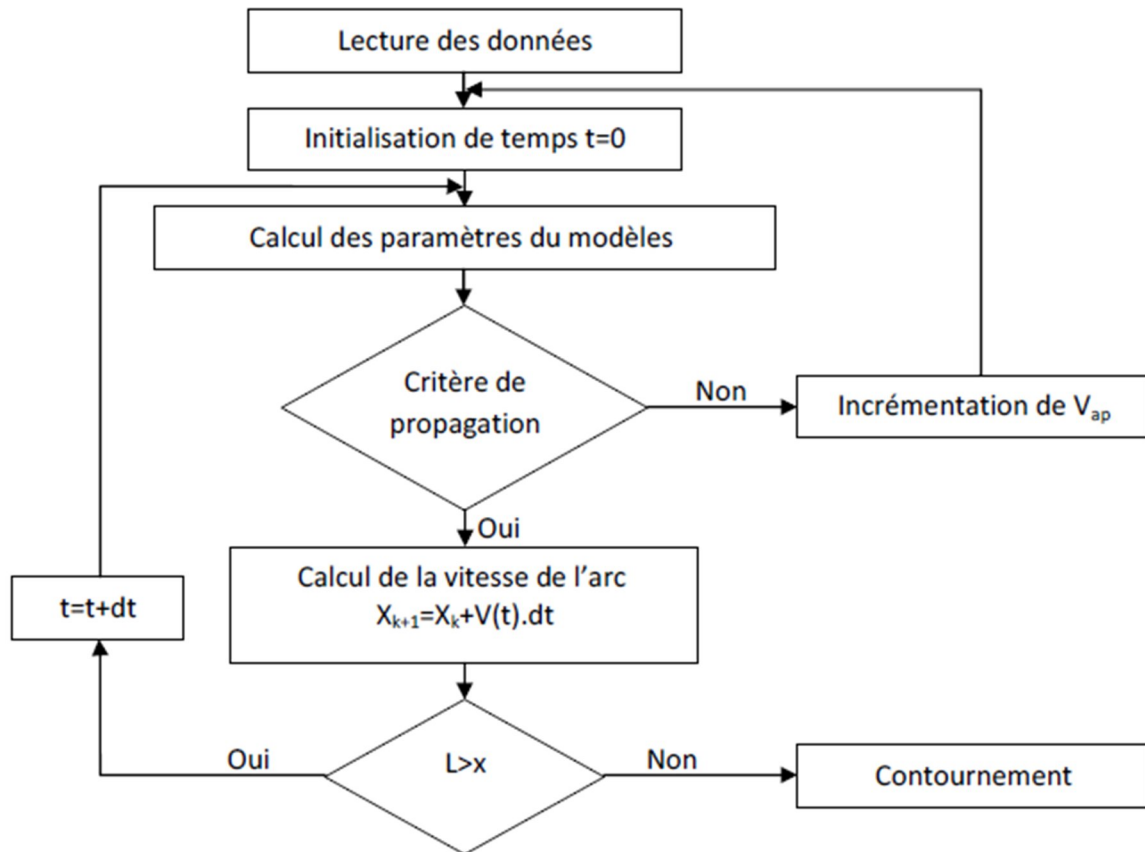


Figure.III.11 : organigramme général d'un modèle dynamique.

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les principaux modèles statiques et dynamiques, ainsi que de citer certains mécanismes et critères de propagation de la décharge sous tensions continue, alternative.

La plupart des modèles traitent le problème de manière statique et reposent sur le modèle proposé par Obenaus. Ils traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant des critères d'extension se basant soit sur le champ électrique, soit sur l'énergie ou encore la puissance dissipée. Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit l'impédance

vue des électrodes, soit le courant, soit le champ électrique, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source.

**IV.1.Introduction**

La plupart des modèles rapportés dans la littérature, sont des modèles statiques. Ces modèles permettent, pour une situation donnée, la prédiction de la tension de contournement critique sans prendre en compte l'évolution dans le temps des différents paramètres (électriques, thermiques, géométriques,...) impliqués dans le processus du contournement, d'où l'intérêt à développer un modèle dynamique. C'est l'objet de ce chapitre. Il s'agit de proposer un modèle dynamique qui permet de décrire les mécanismes d'extension d'une décharge électrique sur une surface polluée afin de modéliser le comportement de systèmes d'isolation pollués en vue de prédéterminer leur tenue au contournement et d'en optimiser la conception.

**IV.2. Hypothèse simplificatrices**

Les phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces polluées sont tellement complexes, qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices, pour rendre possible leur représentation à l'aide d'un modèle mathématique. Dans notre étude, nous avons adopté différentes hypothèses qui sont données comme suit :

- La conductivité de la pollution est la même en tout point de la couche polluante et ne change pas durant la propagation de la décharge ;
- La couche de pollution est représentée par une résistance ;
- Parmi tous les arcs multiples se développant sur la surface isolante, un seul arc dominant est pris en considération [33].

**IV.3.Base du modèle**

L'idée générale consiste à représenter l'isolateur pollué et l'arc qui s'y propage par un canal d'arc en série avec une couche de pollution. Considérons un isolateur pollué et partiellement contourné par une décharge électrique, cet isolateur peut être représenté par un circuit électrique équivalent constitué de deux résistances en série, la première résistance notée  $R_a$  représente la décharge et la seconde notée  $R_p$  représente la résistance de la couche de pollution non court-circuitée par cette décharge (Fig. IV.1).

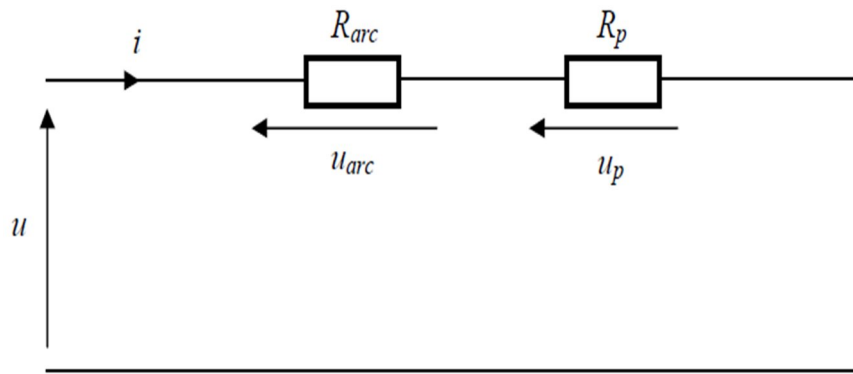


Figure. IV.1 : Circuit électrique équivalent de base

#### IV.4. Critères de propagation de la décharge

Le critère de propagation que nous avons adopté pour notre modèle, est celui proposé par Hampton. Selon cet auteur, la différence entre le champ dans la décharge et le champ dans la pollution est l'élément essentiel qui gouverne la propagation de la décharge, car cette dernière évolue, si le gradient de la tension ( $E_p$ ) dans la pollution est supérieur à celui ( $E_{arc}$ ) dans la décharge.

En effet, si  $E_p > E_{arc}$ , l'arc se propage. Dans ce cas, le gradient de la tension de la couche de pollution est supérieur à celui de l'arc, car l'incrustation du chemin en aval de l'arc par la croissance du courant à chaque instant permet à l'arc de se propager. Si, cette condition n'est pas satisfaite, nous incrémentons la tension appliquée de  $dv$  et les calculs sont repris depuis le début [32].

Selon la figure (Fig.IV.1), nous pouvons écrire :

$$= \text{---} \tag{IV.1}$$

Et

$$= \text{---} \tag{IV.2}$$

#### IV.5. Circuit de propagation

La propagation de l'arc électrique est possible, si le critère d'élongation est rempli. Dans ces conditions, le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc. Cette

propagation de la décharge peut être donc représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (Fig.IV.2).

Dans cette figure,  $R_i$ ,  $I_i$ , et  $U_i$  représentent respectivement la résistance, le courant et la tension, correspondant à chaque cellule nouvellement créé et  $R_p$  la résistance de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc [34].

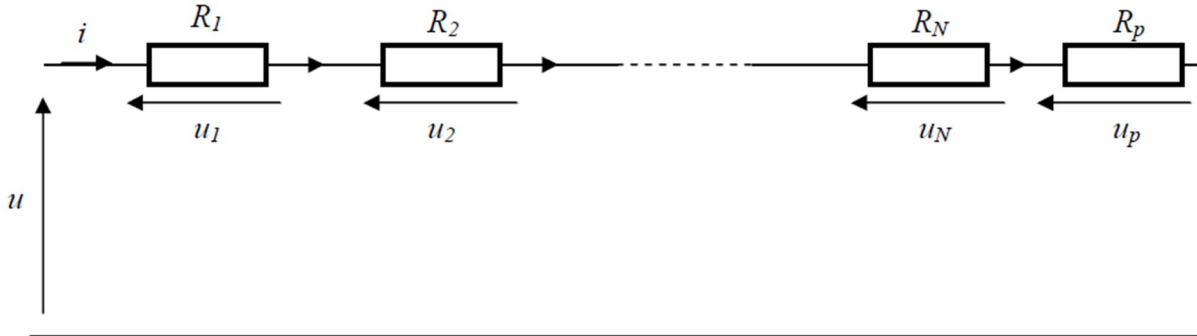


Figure.IV.2 : Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge

La vitesse de propagation de la décharge électrique est donnée par l'équation :

$$V = \mu e_{arc} \tag{IV.3}$$

$v$  : la vitesse de propagation ;  
 $\mu$ : la mobilité des électrons.

**IV.6. Paramètres du circuit électrique**

Les paramètres de ce circuit concernent la tension totale entre électrodes, la résistance de pollution et les caractéristiques du canal d'arc à savoir sa tension, sa résistance, sa résistivité, sa longueur. En négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes, de l'ordre de 840 V selon R.Wilkins, l'équation du circuit sera donnée par:

$$= + = + \tag{IV.4}$$

Avec,  $U$  la tension appliquée,  $U_{arc}$  la tension de la décharge,  $R_p$  la résistance de la couche polluante et  $I$  le courant de fuite [31].

**VI.6.1. Modèles plans équivalents de l'isolateur**

Dans notre étude, l'isolateur réel est remplacé par deux modèles plans équivalents. La longueur de fuite de ces derniers est égale à celle de l'isolateur réel. Cependant, la largeur du premier est fixe (Fig. IV.3.a) correspondant à la circonférence équivalente de l'isolateur réel. Tandis que la largeur du deuxième modèle est variable est égale à la circonférence de l'isolateur selon la position considérée le long de la ligne de fuite (Fig.IV.3.b). Le choix de

cette représentation bidimensionnelle est justifié par le fait que les phénomènes de conduction et de décharge électrique dépendent principalement des caractéristiques surfaciques de la couche de pollution se déposant sur les isolateurs.

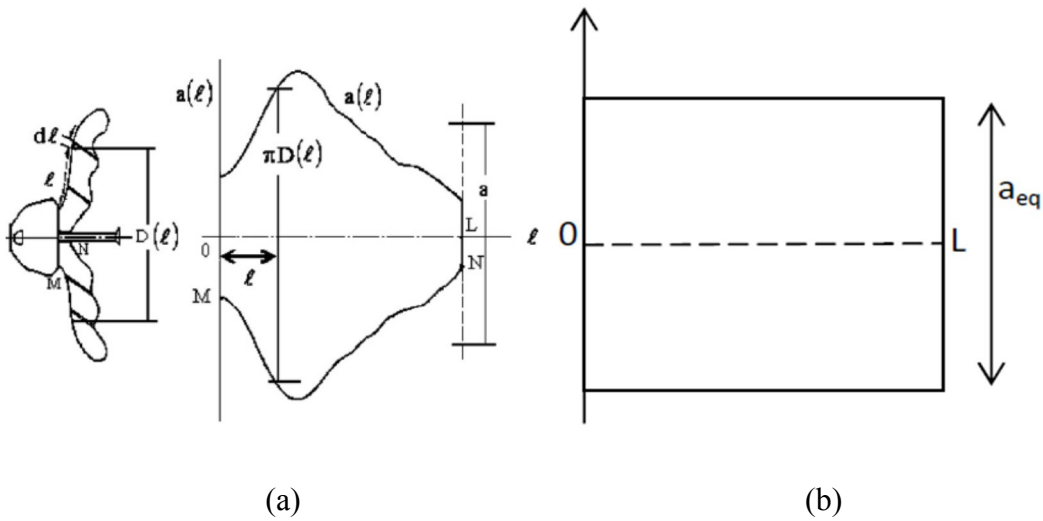


Figure.IV.3 : Modèles plans équivalents de l'isolateur

Donc pour représenter la pollution, nous avons adopté le modèle linéaire représenté par la (Fig.IV.3.a). Il considère une répartition uniforme de la pollution et permet d'exprimer, par conséquent, la résistance de la couche de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite :

$$r_p = \frac{R_p}{L} \ell \quad (IV.5)$$

Avec,  $r_p$  la résistance linéique,  $L$  la longueur de fuite totale et  $x$  la longueur de l'arc.

Tandis que la résistance du modèle de la (Fig.IV.3.b) ne peut être obtenue qu'à travers une fonction d'interpolation faite à partir de la fonction suivante :

$$r_p(\ell) = - \int_0^{\ell} \frac{dR_p}{dx} dx = - \sum \frac{\Delta R_p}{\Delta x} \quad (IV.6)$$

Où  $d\ell$  est l'élément de la ligne de fuite,  $L-x$  est la longueur de fuite non shunté par l'arc, et  $R(\ell)$  est le rayon de l'isolateur pour l'élément  $d\ell$  considéré.

La relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon F.Obenaus, par l'expression empirique suivante :

$$U = \dots \quad (IV.7)$$

A et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc, x sa longueur et I son courant.

En se basant sur l'expression de la tension aux bornes de l'arc électrique proposé par F.Obenaus, la résistance  $R_{arc}$  du canal de cet arc peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R_{arc} = \frac{A}{I^n} \quad (IV.8)$$

**IV.7. Courant critique et tension de contournement**

Le tableau des constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc électrique est représenté si dessous [28] :

<b>Auteurs</b>	<b>N</b>	<b>n</b>	
Obenaus	100	0,7	<b>air sec</b>
Calverie et Porcheron	100	0,5	
Woodson	200	0,8	
Wilkins	63	0,76	
Jolly	80	0,62	
Hampton	530	0,24	<b>vapeur d'eau</b>
Rahal et Huraux	530	0,24	

On calcule le courant critique (Fig.IV.4) et la tension de contournement en fonction de la résistance linéique (Fig.IV.5) pour le modèle d'Obenaus, Woodson, Wilkins et Rizk à partir des équations suivantes (ligne de fuite de 37.5Cm) :

$$I = \frac{A}{R_{arc}^n} \quad (IV.9)$$

$$= \frac{A}{\left(\frac{U}{I}\right)^n} \quad (IV.10)$$

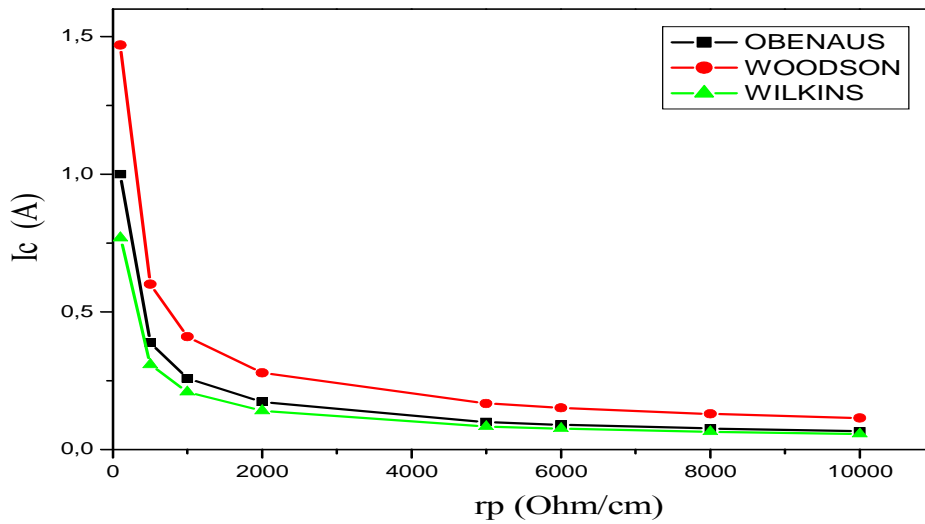


Figure.IV.4 : Courant critique en fonction de la résistance linéique

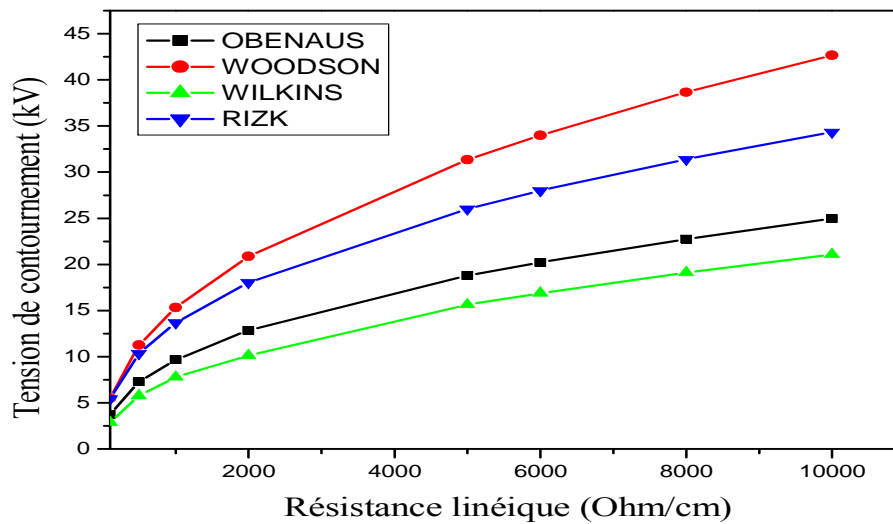
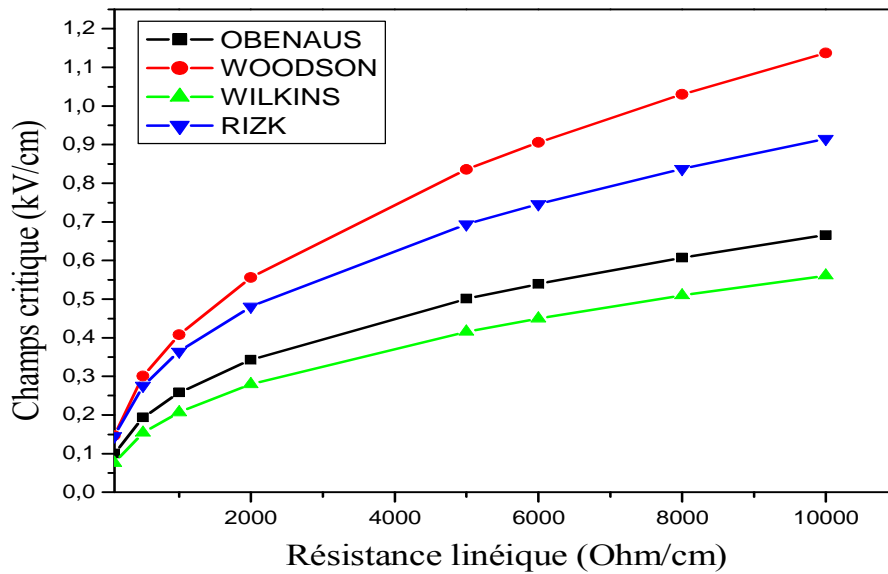


Figure.IV.5 : Tension de contournement en fonction de la résistance linéique

À partir du calcul de la tension de contournement on obtient le champ critique en fonction de la résistance linéique (Fig.IV.6) :



*Figure.IV.6 : Champ critique en fonction de la résistance linéique*

D'après la figure (Fig.IV.5) et (Fig.IV.6) on constate que la tension de contournement et le champ critique sont proportionnels à la résistance linéique, ce qui n'est pas le cas pour le courant critique (Fig.IV.4) qui diminue avec l'augmentation de cette dernière.

Les courbes ont la même allure pour les différents modèles malgré les valeurs différentes des constantes empiriques.

#### **IV.8.Simulation numérique**

Pour une conductivité superficielle donnée, les principales étapes de l'algorithme simulation élaboré sont les suivantes :

Étape 0 : Introduction des données : la conductivité de la pollution, la géométrie de l'isolateur (Sa longueur totale de fuite et son rayon effectif ou sa largeur), la mobilité des électrons, pas d'incrément de la tension, pas d'incrément de temps ;

Étape 1 : Initialisation de la tension, de la longueur d'arc et du temps ;

Étape 2 : Calcul de la résistance de l'arc, de la résistance de pollution, du courant de fuite ;

Étape 3 : Vérification du critère de propagation, puis accomplissement de l'étape 4 (pas de propagation) si le champ dans l'arc est inférieur à celui dans la pollution, et de l'étape 5 (propagation) ailleurs ;

Étape 4 : Incrément de la tension et reprise des étapes 2 et 3 ;

Étape 5 : Calcul de la longueur d'arc, de sa résistivité, de sa résistance, de sa chute de tension, du courant, de la vitesse d'élongation, des champs dans l'arc et dans la pollution ;

Étape 6 : Test de la nouvelle valeur de la longueur d'arc ; accomplissement de l'étape 7 (pas de contournement), et de l'étape 8 (contournement) ailleurs ;

Étape 7 : Incrémentation du temps et reprise des étapes 5 et 6 ;

Étape 8 : Prélèvement de la tension critique de contournement correspondante ;

Étape 9 : Exploitation des résultats.

Ces différentes étapes peuvent être représentées dans l'organigramme de la figure (Fig.IV.7) suivante :

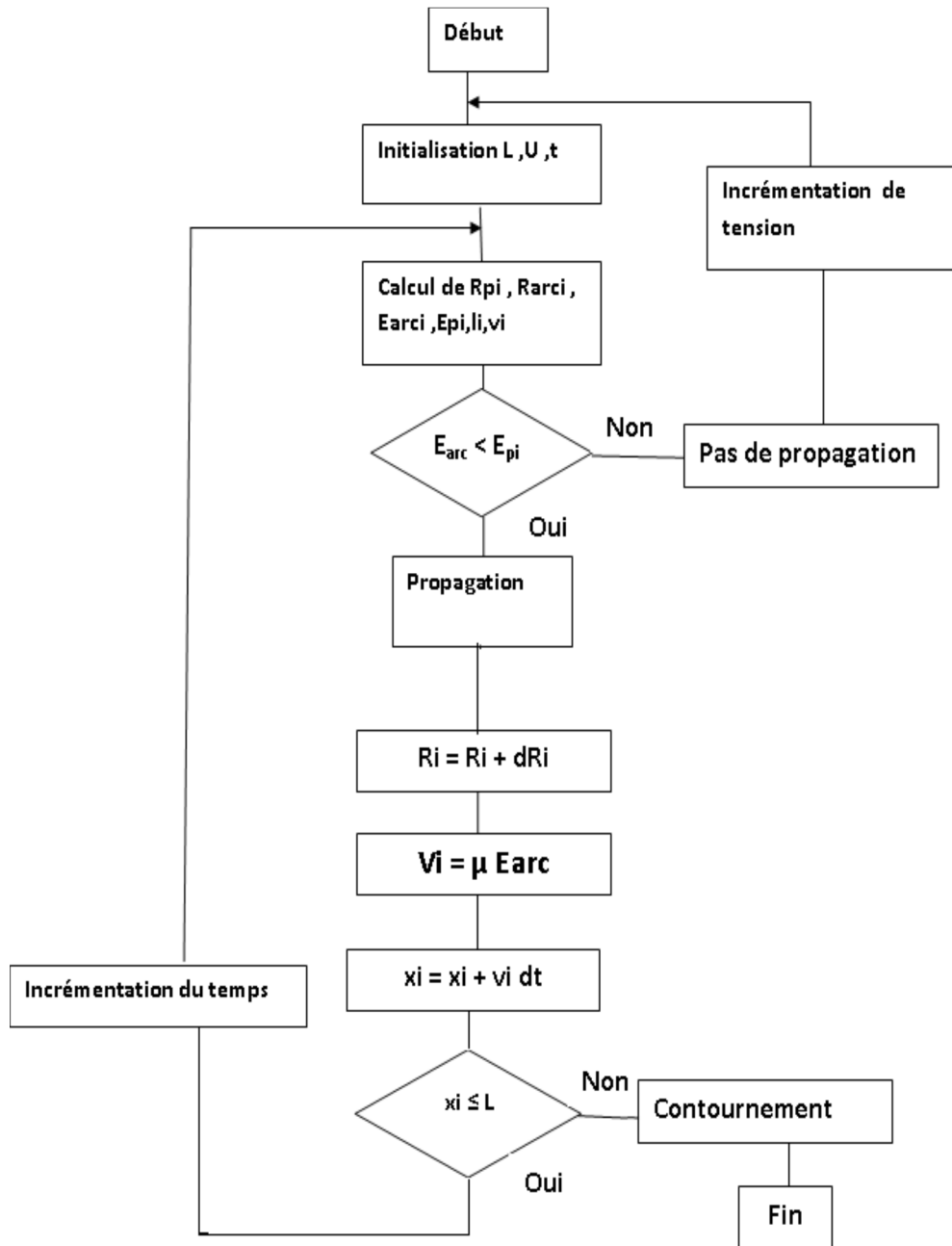
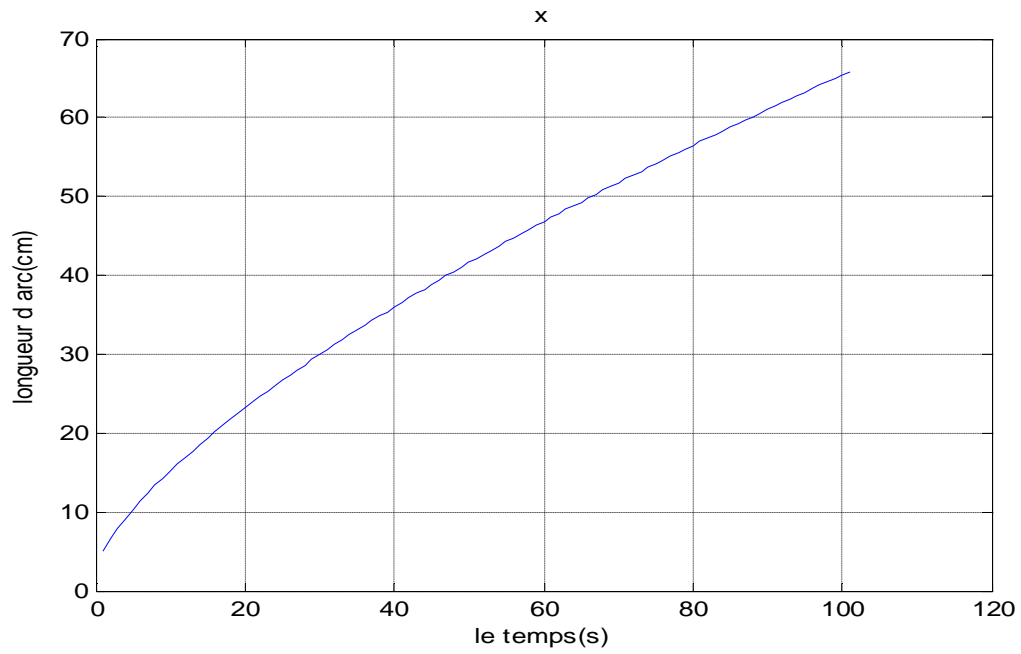


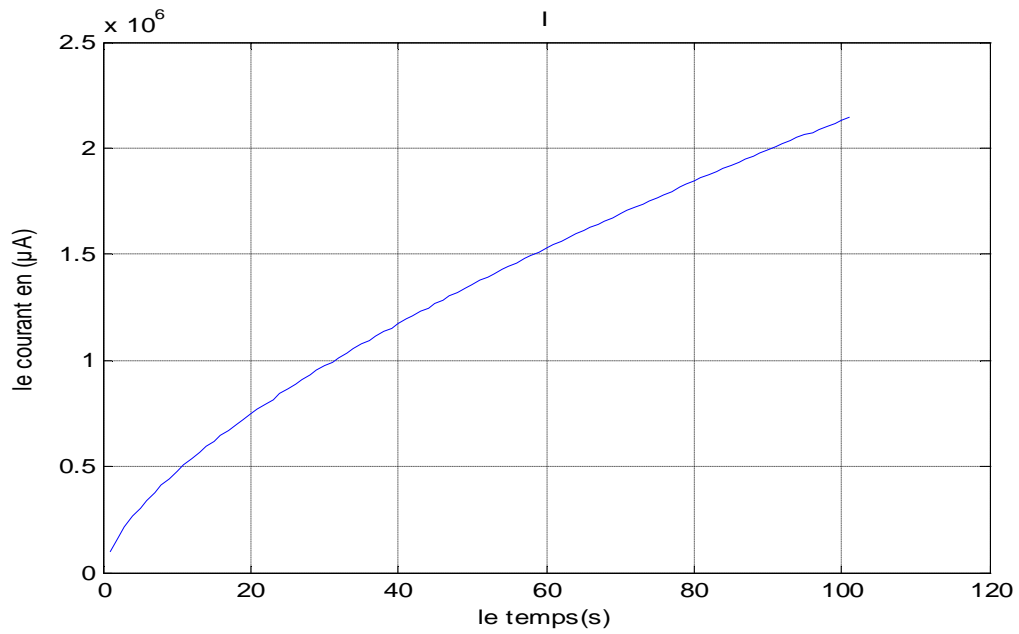
Figure.IV.7: Organigramme du modèle dynamique

IV.9. Résultats de la simulation numérique

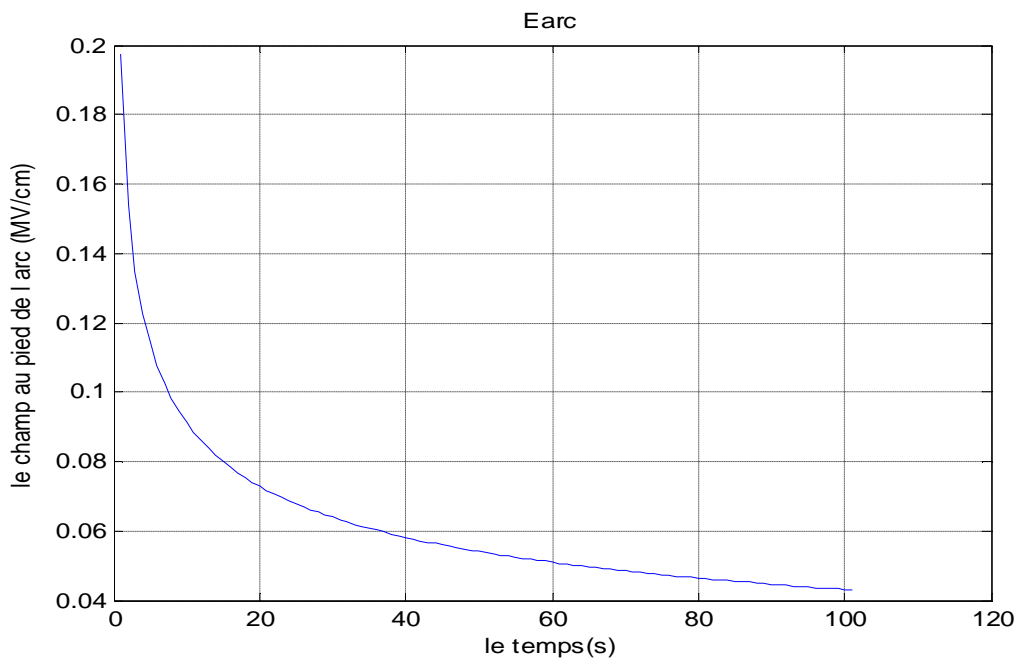
(a)



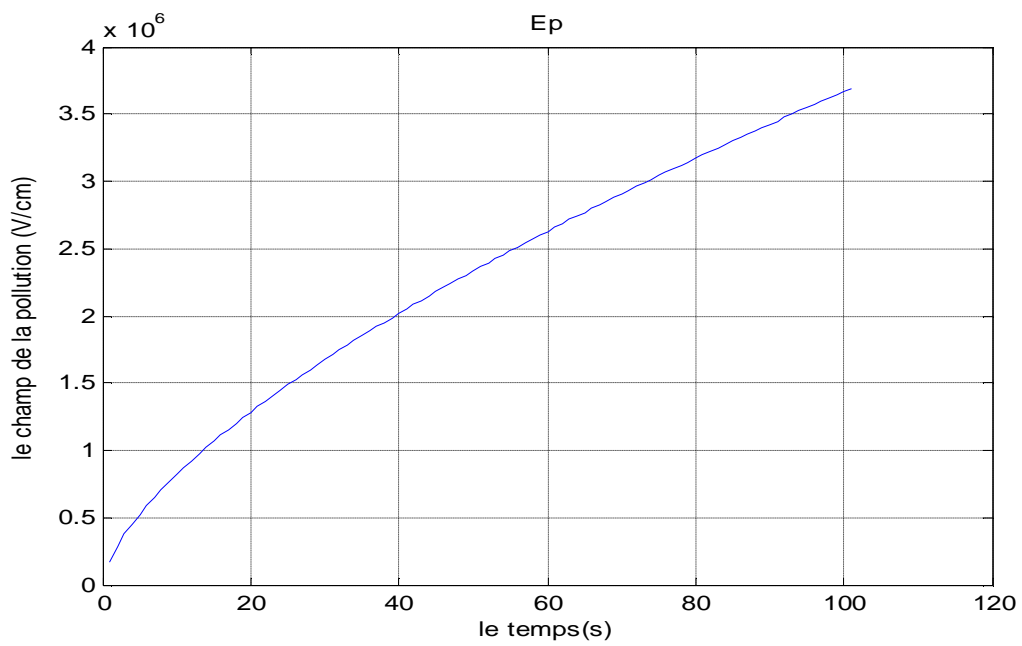
(b)

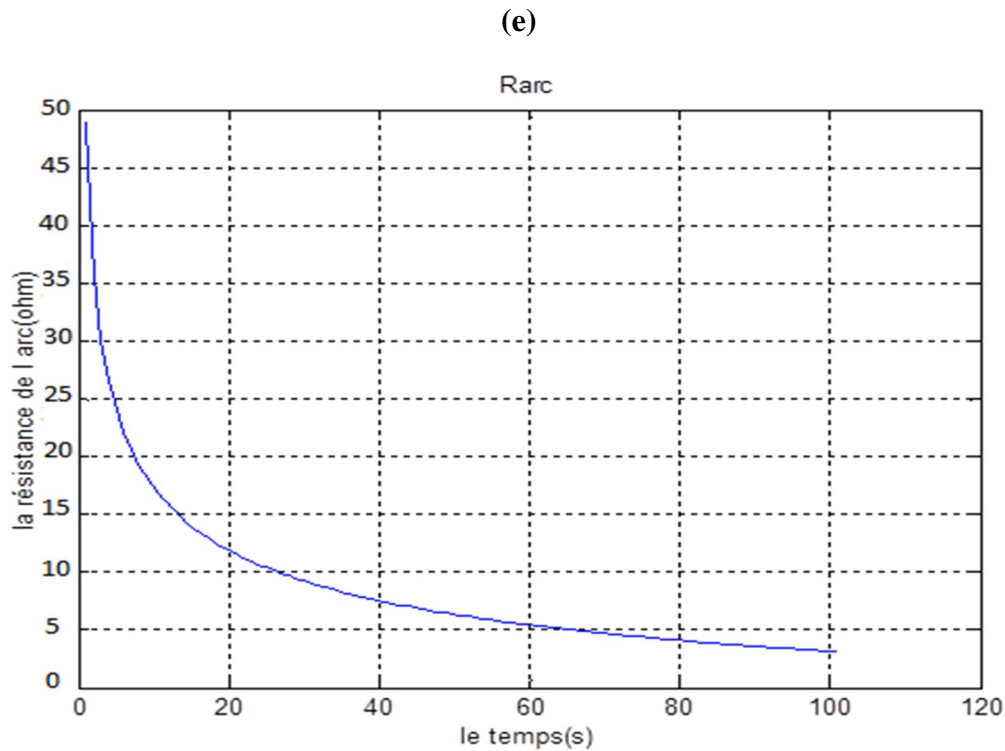


(c)



(d)





*Figure.IV.8 : Résultat de simulation de L'isolateur plan rectangulaire*

#### IV. 10. Interprétation

La courbe de la figure (Fig.IV.5.a) montre l'évolution de la longueur de la décharge en fonction du temps, notons que le déplacement de l'arc est plus rapide aux premières secondes et ralentit a une certaine distance.

La courbe présentée sur la figure (Fig.IV.5.b), donne l'évolution en fonction du temps du courant de fuite critique obtenue par la simulation de notre modèle. Nous remarquons que la courbe obtenue présente une première partie à croissance relativement lente correspondant à la phase de propagation, suivie d'une augmentation brutale qui correspond à l'étape finale c'est à dire au contournement.

La (Figures.IV.5.c) et (Figure.IV.5.d) présentent l'évolution du champ de l'arc et le champ dans la pollution en fonction du temps, a l'instant où le critère de propagation est vérifié, le champ dans la couche polluante devient supérieur à celui de l'arc. Ce dernier champ diminue au cours du temps. Notons que l'augmentation de la résistivité engendre l'augmentation de ces deux champs électriques.

La (Figures.IV.5.e) de l'évolution de la résistance de la décharge électrique dans le temps montrent que la résistance linéique de l'arc prend une valeur importante au premières secondes puis décroît de façon brutale suivant les deux phases (propagation et

contournement). Par ailleurs, l'augmentation de la résistivité de la pollution engendre la diminution de la résistance de l'arc électrique.

La résistance de la couche polluante non court-circuitée par l'arc est constante avant la propagation. Dès la vérification du critère de propagation, cette résistance diminue, ce qui est en parfait accord avec l'élongation de l'arc. D'autre part et comme cette résistance est proportionnelle à la résistivité, l'augmentation de cette dernière provoque une augmentation de la résistance de la couche polluante.

#### **IV.11.Conclusion**

L'étude du phénomène de contournement sous tension continue à l'aide d'un modèle dynamique par simulation numérique permet d'avoir des résultats qui sont en bon accord avec ceux trouvés par d'autres chercheurs.

Par ailleurs, les caractéristiques temporelles que nous avons obtenues présentent deux évolutions distinctes correspondant à la phase de propagation et la phase de contournement. En premier lieu la phase de propagation, puis augmente rapidement dans la phase de contournement. D'autre part, la longueur de la décharge augmente régulièrement dans la phase de propagation et celle de contournement.

La résistance de la décharge augmente rapidement dans la phase de propagation jusqu'à une valeur critique, puis diminue dans la phase de contournement. D'autre part, Selon le modèle proposé, il est évident que lorsque la longueur de la décharge augmente, la résistance de la pollution de la partie non court-circuitée par cette décharge diminue. Le champ dans l'arc diminue lentement pendant la phase de propagation et rapidement pendant la phase de contournement.

## **Conclusion générale**

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 plus part des régions électriques du nord Algérien sont des régions très actives avec une population trop importante. Donc leur réseau de transport d'énergie électrique doit être aussi important. Les conditions climatologiques ont une influence fondamentale sur l'état des dépôts polluants accumulés sur les surfaces des isolateurs, en particulier dans les régions côtières, donc sur la tension de tenue de ces isolateurs.

Après traitements des incidents qui ont eu lieu sur le réseau électrique Algérien 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 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. À 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 de mesure du degré de sévérité de pollution obtenus au laboratoire de CREDEG montrent que :

- 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 ;
- 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.

À l'issue de l'étude et la validation d'un modèle dynamique de contournement par simulation numérique, les caractéristiques que nous avons obtenues présentent deux évolutions distinctes correspondant à la phase de propagation (qui s'effectue sur la moitié de la longueur de fuite totale de l'isolateur) et à la phase de contournement. Le courant de fuite, augmentent lentement durant la phase de propagation et rapidement durant la phase de contournement. D'autre part, la longueur augmente régulièrement avec le temps. Selon le modèle proposé, il est évident que lorsque la longueur de la décharge augmente, la résistance de la partie non court-circuitée par cette décharge diminue. Le champ de l'arc, diminuent lentement pendant la phase de propagation et rapidement pendant la phase de contournement, finalement la résistance de la décharge et la tension à ses bornes augmentent en premier lieu pour atteindre un maximum et diminuer à la fin de la phase de propagation.

Par ailleurs, notre modèle peut être développé en y intégrant d'autres paramètres tels que la présence d'arcs multiples, la discontinuité de la résistance de la couche polluante, l'application d'une tension alternative ou impulsionnelle, etc.

## *Références Bibliographique*

- [1] **N.Feddag, S.Houcine**, « Modélisation des différents paramètres de dimensionnement des isolateurs sous pollution », Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou, Ingénieur 2008.
- [2] **M<sup>ed</sup>.A. Boudjamma, R.Sebti**, « Modélisation des phénomènes de pollution des isolateurs de haute tension », Université Kasdi Merbah-Ouargla, Master 2011-2012.
- [3] **A.Chakou, M.Djemmaa**, « Élaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous une tension impulsionnelle », Université Kasdi Merbah-Ouargla, Master 2011-2012.
- [4] **Documentations Internet**, « <http://www.hydroquebec.com/fr/index.html> ».
- [5] **X.Ducouret**, « Lignes aériennes : Matériels techniques de l'ingénieur », D4423.
- [6] **F.Aouabed**, « Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP », Université Ferhat Abbas-Sétif, Magister en électrotechnique.
- [7] **B.Hammoum, A.Kerbouche**, « étude du phénomène de pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique du centre algérien », École Nationale polytechnique, Ingénieur 2007.
- [8] **Documentation Internet**, Afoolter Jean-François, Haute Tension, « [http://www.teslacoil-france.net/documents/cours\\_HT\\_eivd\\_02.pdf](http://www.teslacoil-france.net/documents/cours_HT_eivd_02.pdf) ».
- [9] **A.Djouadi, H.Melouk**, « problème de la pollution marine des isolateurs de haute tension en Algérie », École Nationale polytechnique, projet de fin d'étude promotion 1975.
- [10] **CREDEG, SDC**, « Élaboration de la carte de pollution pour la région de la SDC ».
- [11] **CREDEG, GRTE**, « Étude du phénomène de la pollution du réseau national de transport électrique », Rapport final mai 2013.
- [12] **Documentation internet**, « <http://fr.wikipedia.org/wiki/Tigzirt> ».

[13] **M. Ben Alia**, « Modélisation d'un isolateur naturellement pollué sous tension impulsionnelle utilisant des circuits électriques équivalent », École Nationale polytechnique, Magister 2007/2008.

[14] **Y. Guehrrar**, « Elaboration d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tensions Alternative et Impulsionnelle », Mémoire de Magister laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2007/2008.

[15] **F. Obenaus**, « Fremdschichtüberschlag *und* Kriechweglänge<sup>2</sup>, Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, pp. 135 - 136, 1958 ».

[16] **R. Sundararajan, R.S. Gorur**, « Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators", IEEE Trans. On Dielect. & Elec. Insul, Vol.3, No2 April 1997 ».

[17] **N. Dhahbi**, « Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions: Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.

[18] **G. Neumärker**, « Verschmutzungszustand und Kriechweg<sup>2</sup>, Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss., Berlin, Vol. 1, pp.352 - 359, 1959».

[19] **X. Chen**, « Modeling of Electrical Arc on Polluted Ice Surfaces », Thèse Ph. D, Ecole Polytechnique de Montréal, février 2000.

[20] **H. Matsuo, T. Fujishima and K. Hatase**, « Relation between leakage impedance and equivalent salt deposit density on an insulator under a saltwater spray" IEEE Trqns. On Elect., Vol. 6, nr. 1, pp 117-121, February 1999».

[21] **J. Danis**, « *A Stochastic Pollution Flashover Model* », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, 1983, Athènes, Grèce.

[22] **TLIDJANE Aissa, MEKHALFIA Riadh et KEBAILI Hamza** « Etude Du Phénomène De Contournement Des Isolateurs Pollués Sous Tension Continue » La these D'ingenieur EUR D'état En Génie Electrique Université De M'sila 2009/2010.

[23] **M.Teguar**, « *Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres électro géométriques* », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Avril 2003.

[24] **CEI 60-1**, « *Techniques des Essais à Haute Tension. 1- Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais* », Deuxième Edition, 1989.

[25] **A.Mekhaldi, D.Namane, S.Bouazabia, A.Beroual**, «*Flashover of Discontinuous Pollution Layer on High Voltage Insulators*», IEEE, Trans, on Dielectrics and electric insul. vol. 6, N° 6. pp. 900-906, December 1999.

[26] **N. Dhahbi - Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl**, «*A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover* », Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, pp. 889 - 894, March 1997.

[27] **B. F. Hampton**, «Flashover Mechanism of Polluted Insulation», Proc. IEE, Vol. 111, nr .5,pp. 985-990, May 1964.

[28] **N. Dhahbi - Megriche, Beroual**, «Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage», IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul. Vol. 7, N° 2, pp. 283 - 289, April 2000.

[29] **M.Soufi, M.Zemirline**, «Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50Hz », École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, mémoire d'ingénieur 2004.

[30] **R.Sundararajan, R.S.Gorur**, «*Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions*», IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 1, pp. 121 - 127, February 1995.

[31] **MOURAD CHAFIQ**, « *COMPORTEMENT ELECTRIQUE DES ISOLATEURS STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE GLACE* » Mémoire de Maîtrise en Sciences Appliquées, Novembre 1995.

[32] **HOAN TIEN**, « *CONTRIBUTION À L'ETUDE DU MECANISME DE DEVELOPPEMENT DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE EN ARC DE*

CONTOURNEMENT SUR LA SURFACE DE LA GLACE CONDUCTRICE » Mémoire de  
Maîtrise en Sciences Appliquées Juin 1984.

[33] **Muhsin Tunay Genc, oçglu., Mehmet Cebeci,** « The Pollution Flashover On High  
Voltage Insulators » Science Direct, Electric Power Systems Research 78, pages 1914–1921,  
Mars 2008.

[34] **P. S. Ghosh, S. Chlakovorti, N. Chatterjee** « Estimation of Time-to-flashover  
Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces using a Neural Network » IEEE  
Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 2 No. 6, December 1995.