

9/99

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

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

# **MEMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en électrotechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Thème

**Algorithme de Contrôle du  
Comportement d'une Surface  
Isolante Polluée**

**Encadrée par :**

Mr. M.TEGUAR  
Mr. A.MEKHALDI

**Présenté par :**

Mr. Ali BOUHAFS  
Mr. Laïche OUADA

Année Universitaire 1998/ 1999

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

- \* *A mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour faire mon éducation ;*
- \* *A mes chers frères ;*
- \* *A toute ma famille;*
- \* *A tous mes amis ;*
- \* *A vous ;*
- \* *et en fin à mon binôme ALI.*

*Laiche*



## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

- ✿ *A mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour faire mon éducation à :*
- ✿ *mes chers frères et sœurs ;*
- ✿ *toute ma famille;*
- ✿ *tous mes amis;*
- ✿ *mon premier maître du Coran. Baba Naili ;*
- ✿ *mon binôme Laiche. ;*
- ✿ *à vous.*

*Ali.*



## Remerciements

*Au terme de ce modeste projet de fin d'études, nous tenons à remercier nos deux promoteurs Mr. M. Tegar et Mr. A. Mekhaldi, qui nous ont dirigé au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

*Sans oublier, Mr. A. Boubakeur et Mme. Namane pour leur aide et conseils. Ainsi que tous nos enseignants qui ont participé à notre formation.*

*En dernier, nos vifs remerciements vont à Fathi et Saleh pour leur soutien et encouragements.*



العمل المعروض يتعلق بدراسة ظواهر النقل والشحن الكهربائية فوق المساحات العازلة الملوثة تحت التوتر المتناوب 50 هرتز يعرض لنا هيكل حسابي للهيكل التجريبي يسمح لنا بالحصول على عدة خصائص تصف حالة العازل الملوث (عناصر الدارة الكهربائية المكافئة) الممانعة، المقاومة، المكثفة. إضافة إلى ذلك، الهيكل الحسابي يقترح علينا وسيلة لمراقبة درجة التلوث بقياس التيار المتسرب.

**الكلمات المفتاحية:** جاف، حرج، شرارة، إحاطة، عازل، توتر، تيار، تلوث، ممانعة، مقاومة، مكثفة.

### Résumé :

Ce travail porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces polluées sous tension alternative 50 Hz. Il présente un modèle mathématique simulant le modèle de laboratoire qui nous permet d'avoir les différentes caractéristiques décrivant le comportement de l'isolateur pollué (paramètres de circuit équivalent), l'impédance, la résistance et la capacité. En outre, ce modèle propose un moyen de surveillance de degré de pollution en mesurant le courant de fuite.

**Mots clés :** Sèche, critique, arc, contournement, isolateur, tension, courant, pollution, impédance, résistance, capacité.

### Abstract :

This work carries on the survey of the phenomenons of conduction and of electric discharge on some insulating tainted surfaces under alternative voltage 50 Hz. He presents a mathematical pattern feigning a pattern of laboratory who allows us to have the different characteristic describ the behavior of the tainted insulator (parameters of equivalent circuit), the impedance, the resistor and the capacity. Besides, this pattern suggests a means of surveillance of degree of pollution in measuring the current of flight.

**keywords :** Dry, critical, arc, flashover, insulator, voltage, current, pollution, impedance, resistor, capacity.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# Introduction Générale

Les isolateurs des lignes aériennes et des postes de haute tension, installés dans les régions où règne une pollution atmosphérique sont sujets à de graves incidents, notamment le contournement des isolateurs qui provoquent des court-circuits sur les lignes de haute tension en exploitation, vis à vis de la dégradation de leur niveau d'isolement par la pollution. On procède aux essais de celle-ci dans des conditions naturelles les plus sévères, en créant des dépôts de pollution artificielle équivalents.

En effet, selon l'ampleur de la pollution, on constate des courants de fuite de différentes intensités, qui peuvent atteindre un seuil critique et engendrer un contournement final de structure de l'installation. Pour éviter ce problème, on doit effectuer des contrôles réguliers sur le degré de pollution.

Lorsque la pollution se fixe sur la surface des isolateurs des courants de fuite circulent sur cette surface, ce qui provoque un assèchement des zones humides. Ces dernières forment une barrière isolante, que les courants franchissent en créant des arcs électriques. Ces arcs se prolongent au fur et à mesure que la tension augmente jusqu'à une valeur critique qui ne peut pas être dépassée, sans que le contournement ne se produise.

Le contournement s'établit inévitablement lorsque, la longueur d'arc atteint la longueur critique, cette longueur dépend de la répartition de la couche polluante sur la surface isolante la connaissance de cette répartition nous permet d'éviter des dégâts, qui peuvent être préjudiciables au niveau économique.

A fin d'étudier l'impact de la pollution sur des surfaces isolantes, nous proposons une étude mathématique représentant un contournement engendré par la pollution. Etant donné que sa nature est forcément idéalisée, ce modèle ne peut en aucun cas se substituer aux essais, qui demeurent indispensables pour l'obtention des données réelles.

Trois chapitres principaux font l'objet de cette étude.

Dans le premier chapitre, nous présentons en première partie, les phénomènes de pollution, leurs conséquences sur le transport d'énergie électrique et les moyens utilisés de les éviter. Certaines méthodes de mesure de la sévérité de pollution des sites, ainsi que les méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle sont discutées. Une deuxième partie présente, les principaux modèles mathématiques élaborés pour décrire les phénomènes de contournement des isolateurs sous atmosphère polluée. Il passe en revue les modèles s'appliquant en régime de courant continu qui s'entretient sur des surfaces polluées, les critères de propagation des arcs en régime de courant continu, ainsi que les modèles de

---

réalimage des arcs dans le cas d'isolateurs pollués soumis à des contraintes électriques alternatives.

Le deuxième chapitre porte sur une étude mathématique simulant le comportement des isolateurs pollués sous haute tension. Différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc à la surface des isolateurs seront présentées, et ce pour les deux régimes stable et critique. La validation de notre modèle est vérifiée en comparant nos résultats à ceux obtenus par d'autres chercheurs[1,2]. Une assez bonne similitude a été obtenue.

Le troisième chapitre est consacré pour une étude expérimentale concernant les phénomènes de conduction sur un modèle de laboratoire. D'autre part et en vue d'apporter des compléments valables à cette étude expérimentale, nous mentionnerons que notre modèle mathématique est capable de nous fournir d'autres caractéristiques décrivant les phénomènes d'arc se produisant sur les surface isolantes contaminées.

En dernier lieu, nous précomptons une conclusion générale contenu des perspectives concernant notre travail.

---

# chapitre I

## Synthèse bibliographique

## 1. Introduction :

Le phénomène de pollution des isolateurs peut être considéré comme un déversement continu ou intermittent d'impuretés d'origines diverses [3]. Ces impuretés peuvent provenir des flots de fumée qui s'échappent des appareils d'évacuation (pollution industrielle ou urbaine [4]), où alors de fines particules salines dans les régions situées au bord de mer (pollution marine [5,6]), et même de particules de sable plus ou moins fines dans les régions désertiques (pollution désertique [7,8]).

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu, une synthèse bibliographique non approfondie des divers aspects de la pollution des isolateurs. En deuxième lieu, nous aborderons les principaux modèles élaborés pour décrire les phénomènes de contournement des isolateurs en atmosphère polluée.

## Partie 1

### 1.1. Phénomène de pollution

Cette partie est constituée, tout d'abord, d'un très bref rappel des processus de conduction des isolateurs, en présence d'une couche de pollution, puis, d'une synthèse des connaissances actuelles en matière de surveillance, de maintenance et de lutte contre les perturbations causées par les phénomènes de pollution.

#### 1.1.1. Formation de couche polluante :

La couche de pollution se forme, suite à l'écoulement, en présence d'humidité, d'un air transportant des poussières diverses, et à l'obstacle formé par les isolateurs, une couche polluante se développe à la surface de ceux-ci. La répartition de cette couche polluante non homogène dépend [2] :

- du Profil des isolateurs utilisés,
- de la hauteur des isolateurs par rapport au sol et
- de la disposition verticale, horizontale ou inclinée des chaînes d'isolateurs.

En général, la couche polluante se concentre dans les parties les mieux protégées contre les facteurs "d'auto-nettoyage" qui peuvent être les forts vents et pluies.

---

### 1.1.2. Différents types de pollution :

Les principales sources de pollution atmosphérique qui peuvent être rencontrées, séparément ou simultanément, sont naturelles, industrielles ou combinées (mixtes) [2].

#### 1.1.2.1. Pollution naturelle :

peut être d'origine marine, désertique ou autre.

- La pollution marine concerne les ouvrages installés en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel humidifiée par les embruns eux-mêmes, par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice.
- La pollution désertique concerne les régions désertiques; un vent de poussière fréquent, engendrant occasionnellement des tempêtes de sable, dépose progressivement sur les isolateurs une couche de pollution contenant des sels solubles. Cette couche devient beaucoup plus conductrice lorsqu'elle est humidifiée.
- En outre, la pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage, favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs est contrarié par le phénomène de ruissellement. Sous certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne ou de la colonne isolante, ce phénomène peut entraîner le contournement de l'isolation ; c'est le contournement sous pluie.

Il est généralement admis que la pollution est plus contraignante que la pluie dans la mesure où la résistivité des couches polluantes est bien inférieure à celle de la pluie. Ceci explique qu'au cours des dernières années, les efforts de compréhension avaient davantage porté sur le contournement sous pollution.

#### 1.1.2.2. Pollution industrielle :

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité de raffineries (torchères pétrolières), de cimenteries, de complexes sidérurgiques, chimiques ou même aux abords des centrales thermiques. En outre, cette pollution consiste, pour les régions exemptes

de fumées, en la pollution domestique (appareils de chauffage polluants des habitations, véhicules automobiles, ...) et la pollution agricole (engrais, ...).

Notons que cette poussière est faiblement conductrice, mais très hygroscopique, car elle a tendance à absorber l'humidité de l'air. Dans des conditions de forte humidité (brouillard, pluie, condensation matinale, ...), la dissolution des sels contenus dans cette poussière provoque la formation d'une couche électrolytique.

### **1.1.2.3. Pollution mixtes :**

Les pollutions mixtes résultent de la combinaison d'une ou de plusieurs pollutions précitées. C'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques [8,9].

### **1.1.3. Conséquence 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 (pluies fines, brouillard, ...) la tension de rupture diélectrique 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 [8-12] :

#### **1.1.3.1. Arc non localisé :**

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçait 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.

#### **1.1.3.2. Arc fixe :**

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

### 1.1.3.3. Contournement des isolateurs pollués :

En atmosphère humide, pour une tension de quelques kilovolts appliquée entre les électrodes, les principales étapes conduisant au contournement sont les suivantes :

- L'humidification (pluie, brouillard ou rosée) associée à un dépôt polluant crée une couche conductrice à la surface de l'isolateur.
- L'échauffement par effet Joule créé par le courant de fuite provoque, l'apparition d'une zone sèche.
- Une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée sur cette bande sèche engendrant, si le champ qui en résulte est suffisant, le claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique.
- Selon les conditions électriques qui se trouvent alors réunies, cette décharge va se développer jusqu'au contournement final ou s'éteindre au bout d'un certain temps.

Sous tension continue, le processus est simple à décomposer, si la décharge est amorcée, elle va se développer jusqu'au contournement. Dans le cas contraire, la zone sèche va tendre à s'élargir jusqu'à ce que la tension appliquée ne puisse plus maintenir la décharge, qui va alors s'éteindre.

Sous tension alternative, le problème est plus complexe, car les passages à zéro de l'onde courant, peuvent intervenir avant que le contournement ne soit fini. Il faut alors que la tension appliquée soit capable de réamorcer la décharge à l'alternance suivante.

A chaque alternance la décharge, si elle est amorcée, provoque une vaporisation très rapide du liquide.

- Si la pulvérisation est arrêtée peu après l'application de la tension, lorsque la zone balayée par l'arc sera complètement sèche, le phénomène s'arrêtera ; aucun courant ne circule alors dans le circuit.
  - Par contre, pour une pulvérisation continue, un régime permanent s'établit, caractérisé par des arcs radiaux entourant l'électrode active, en balayant une surface bien délimitée. Si à partir de ce régime, la tension est augmentée, les arcs s'allongent et la zone balayée s'étend puis se stabilise. En élevant ainsi progressivement la tension par paliers, on atteint un état critique au-delà duquel toute nouvelle augmentation de tension provoque immédiatement le contournement total par développement d'un arc radial.
-

**Remarque :**

Il est important de remarquer que par suite du lavage périodique des dépôts par la pluie, on atteint après une période d'exposition plus ou moins longue, une «pollution limite » propre à chaque site, qui dépend, entre autres, de l'intensité de la pollution atmosphérique, de l'adhérence des poussières, de la fréquence de la pluie, [8].

Comme on le voit, la nature et les caractéristiques des agents contaminants sont très variés. Généralement, ils ne provoquent pas de dégradations de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement à la surface des isolateurs, quelle que soit sa nature, provoque la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle, des arcs électriques peuvent prendre naissance sous certaines conditions, et se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [8,9].

**1.1.4. Degrés de pollution :**

Devant la gravité de certaines situations causées par la pollution des isolateurs, des dispositifs de surveillance du degré de pollution sont devenus nécessaires. Ceux-ci ont pour objectif de contrôler, de la meilleure façon qui soit, l'état de propreté des isolateurs. Plusieurs méthodes de surveillance de cet état sont utilisées [13] :

**1.1.4.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) :**

Cette méthode, très utilisée, consiste à déterminer la quantité de dépôt équivalent, exprimée en milligrammes de NaCl/cm<sup>2</sup> de la surface d'un isolateur, dont la conductivité est égale à celle du dépôt réel, dissous dans le même volume d'eau. Il suffit donc de prélever des échantillons, on peut ainsi connaître la DDSE en fonction de la solution obtenue, de la surface de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température.

**1.1.4.2. Conductance superficielle :**

La conductance des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir d'une mesure du courant de fuite en calculant le rapport  $G=I/V$ .

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur.

---

En cas de couches polluantes non homogènes, la conductivité superficielle locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface à l'aide d'électrodes auxiliaires.

Cette méthode peut être représentative d'un type de pollution du site étudié, mais en général, elle présente des résultats dispersés [9].

#### **1.1.4.3. Courant de fuite :**

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension sur la couche polluante.

A l'aide d'un dispositif dit comptage d'impulsions on enregistre pendant une période donnée, sur un isolateur soumis à sa tension de service, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une amplitude donnée. L'existence d'impulsions précède généralement la phase de contournement. Cette méthode exigeant une aptitude au contrôle continue, permet de déterminer la longueur des isolateurs lors d'une extension de réseau, à faible coût. Elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs.

On mesure la plus forte valeur de crête du courant de fuite sur un isolateur témoin soumis à sa tension de service. Ces mesures doivent être effectuées pendant une période relativement élevée.

#### **1.1.4.4. Densité de dépôt non soluble :**

La densité de dépôt non soluble (DDSN) correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Les mesures de DDSN s'accompagnent souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [13].

#### **1.1.4.5. Mesure de la pollution de l'air :**

Les mesures de pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et la caractéristique de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesure adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne les phénomènes de contournement, une **corrélacion** peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air sur un site et la sévérité de la pollution sur ce même site [13].

---

#### 1.1.4.6. Mesures optiques :

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet, à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase etc.), de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [13].

#### 1.1.5. Méthodes d'essais sous pollution :

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème dont il faut tenir compte, lors de dimensionnement des isolateurs. De nombreux travaux expérimentaux sont effectués in situ (pollution naturelle) et au laboratoire (pollution artificielle). Ces essais ont pour objectif d'étudier ce phénomène et donc de prévenir, autant que possible, les incidents électriques, résultat d'un dépôt plus ou moins admissible de pollution. Il est évident qu'il y aurait avantage à effectuer les essais sur isolateurs sous conditions naturelles locales, plutôt que d'avoir recours à des essais artificiels. Cependant, les essais de pollution naturelle tendent à être de longue durée et donnent des résultats capricieux. D'où la nécessité de développer des techniques d'essais sous pollution artificielle.

Parallèlement, et devant un grand nombre de paramètres pouvant intervenir dans le comportement des isolateurs, des modèles de laboratoires, se prêtant mieux aux essais in situ par leur simplicité géométrique, sont parfois adoptés par les chercheurs.

D'innombrables essais in situ ont été effectués de par le monde. Ceux-ci ont concerné un nombre impressionnant de paramètres influant sur le contournement. Parallèlement, des essais sous pollution artificielle ont été élaborés sur de nombreux types d'isolateurs. Le but de ces essais est de reproduire au mieux un dépôt de pollution comparable à celui résultant de la pollution naturelle. C'est ainsi que les résultats de diverses méthodes de pollution artificielle sont parfois comparées aux résultats de pollution naturelle [14 -16].

Notons que les essais de pollution artificielle doivent répondre à certaines normes bien définies [17], afin de pouvoir reproduire les mêmes conditions de travail permettre une exploitation valable des résultats.

Les méthodes d'essais artificielle qui sont actuellement normalisées sont : la méthode du brouillard salin et la méthode de la couche solide [17].

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [8,9,18].

Les méthodes des couches solides simulent mieux les dépôts de pollution industrielle tels que cendres de fuel et ciment. Ces types de couches pouvant contenir des quantités d'eau relativement importantes [8-10,19,14]. Dans ces méthodes, l'isolateur est recouvert par pulvérisation ou application d'une couche de pollution solide constituée d'un mélange d'eau et d'un agent liant complètement ou presque inerte (émulsion de craie, silice pulvérisée ou cab-o-sil, kieselguhr, méthylcellulose). La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. La tension est appliquée après stabilisation de la couche polluante.

A l'exception de la méthode du brouillard vapeur, qui correspond aux isolateurs sous tension car l'humidification se fait après application de la tension, les méthodes de la couche solide correspondent au cas où une partie du réseau serait remise sous tension. Cependant, les isolateurs n'ayant pas été alimentés depuis quelque temps peuvent être froids et humides.

#### **1.1.6. Mesures Actuelles sur le choix des isolateurs :**

A l'heure actuelle, on peut diviser les sites suivant leur degré de pollution en quatre classes, dépendant de la valeur de la conductivité superficielle.

##### **Classe 1 : Légère pollution :**

La répartition de la pollution n'est pas uniforme sur la surface supérieure des jupes. Il n'y en a pas en dessous. Dans ce cas, l'isolement normal convient.

##### **Classe 2 : Pollution moyenne :**

La couche polluante est uniforme sur la surface supérieure des jupes. Des traces de pollution sont observées au-dessous des jupes. Dans ce cas, il est nécessaire de renforcer l'isolement par allongement de ligne de fuite.

---

**Classe 3 : Pollution forte :**

C'est le cas des équipements de H.T. situés à proximité immédiate de la mer ou dans une zone industrielle avec usines métallurgiques et chimiques. On observe une couche mince et uniforme de pollution sur le dessus des jupes des isolateurs. La pollution est non uniforme au-dessous des jupes. Dans ce cas, le renforcement de l'isolement doit être important (par utilisation d'isolateurs antipollution, par exemple).

**Classe 4 : Pollution très forte :**

L'isolateur est recouvert entièrement par la pollution, c'est le cas des équipements de H.T., situés à la fois à proximité de la mer et d'une zone industrielle. Il faut surisoler les isolateurs et les laver ou les graisser périodiquement.

**1.1.7. Technique de lutte contre la pollution :**

Nous présentons les principaux moyens de lutte utilisés contre la pollution, afin de prévenir autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service [20]. Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propres au site considéré et du changement possible de la sévérité de la pollution due à de nouveaux facteurs tels que la construction d'une nouvelle usine, de travaux routiers ou simplement des conditions météorologiques exceptionnelles. Tout ceci pour noter que même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant sous certaines conditions, qu'elles soient permanentes ou seulement exceptionnelles.

**1.1.7.1. Allongement de la ligne de fuite :**

Elle permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées :

- Le changement de types d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste [20].
- L'utilisation de prolongateur de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [21].

### **1.1.7.2. Isolateurs plats :**

Tandis que les deux précédentes méthodes conduisent à allonger la ligne de fuite des isolateurs, l'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminuer.

En effet, ces isolateurs, sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient bien sous l'effet du vent [22,8]. Il faut noter que le vent est parfois le seul facteur d'auto-nettoyage dans certaines régions comme les régions désertiques où la pluie se fait plutôt rare et où la principale source d'humidification est la condensation.

### **1.1.7.3. Graissage périodique :**

Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [20,22]. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement et de la qualité du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans [22]. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération est pénible, longue et coûteuse. De plus, elle nécessite une interruption de service.

### **1.1.7.4. Revêtements siliconés :**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation au pinceau, un caoutchouc silicone [18] qui vulcanise à température ambiante la surface des isolateurs. Ce revêtement, possédant également des propriétés hydrophobes, protège les isolateurs et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle des graisses.

### **1.1.7.5. Isolateurs composites :**

Il est constitué d'un noyau de fibre de verre imprégné d'une résine et de revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté allié à une haute résistance mécanique que lui confère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévère [23]. Cependant ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique) [20].

---

#### **1.1.7.6. Nettoyage des isolateurs :**

Le nettoyage manuel et le lavage hors et sous tension peuvent être utilisés :

Le lavage hors tension entraîne nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Il faut donc limiter autant que possible son utilisation.

Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Il 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 de lavage, le processus de lavage, la distance de sécurité à respecter, afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [20].

Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certains pays. Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple), et peut être utilisé pour dégraisser les isolateurs [20].

#### **1.1.8. Domaines de recherche :**

Nous présentons très brièvement les principaux paramètres considérés par l'ensemble des chercheurs :

##### **a)- Conductivité du dépôt polluant :**

Elle constitue la première étape du processus de conduction de l'isolateur ; exprimée souvent en DDSE, elle concerne l'ensemble de toutes les recherches dans ce domaine. La DDSE peut être très élevée, même dans les zones les plus arides comme les régions désertiques où l'humidité, loin d'être négligeable peut conduire, avec la concomitance des grains de sable à un courant superficiel relativement important.

Il arrive que dans les régions du Sahara algérien, la variation diurne de l'humidité devienne très importante [8] : elle peut être de 30 à 40% au milieu de la journée pour atteindre 80 à 100% au lever du jour.

##### **b)-Conditions météorologiques :**

Celles-ci dépendent de la situation géographique du site considéré. Une identification météorologique de la région est alors envisagée pour prévenir les possibles incidents à une

époque de l'année, par exemple [8,18,25,24]. Les conditions météorologiques (humidité, vent, brouillard, insolation, température, précipitations, etc.) ont un lien très étroit avec le comportement de l'isolateur, elles peuvent soit favoriser l'auto-nettoyage de ce dernier (forts pluie et vent), soit conduire parfois à des situations de pollution très critiques dans un temps relativement court (cas de tempêtes de sable, par exemple [22]). C'est pourquoi le climat constitue le facteur le plus décisif (et le plus aléatoire) dans le contournement de l'isolateur.

### c)- Nature de la pollution :

Nous distinguons plusieurs aspects de la pollution que nous énumérerons comme suit :

- Pollution marine est constituée de particules salines dans les régions situées au bord de mer [8,9].
- La pollution industrielle concerne toutes les impuretés provenant des flots de fumée qui s'échappent des appareils d'évacuation [8].
- Pollution rurale est constituée d'engrais ou de pollen dans les régions rurales.
- Pollution désertique très contraignante dans les pays qui possèdent des lignes dans des régions désertiques (Algérie, Egypte, Arabie Saoudite, etc.) et est constituée de fines particules de sable s'incrustant sur la surface de l'isolateur [8,10].
- Pollution par dépôts de glaces concerne les pays très froids comme le Russie par exemple où le gel forme une "carapace" sur les chaînes d'isolateurs et compromet alors la tenue électrique.

## Partie 2

### 1.2. Modèles du contournement des isolateurs sous pollution

Cette partie constitue une analyse critique des principaux modèles mathématiques élaborés au cours des dernières années pour décrire le phénomène de contournement des isolateurs sous atmosphère polluée. En vue de formuler un critère d'établissement d'un arc sous tension continue, plusieurs modèles ont été développés. Ils sont très souvent employés pour interpréter des résultats obtenus pour des tensions alternatives.

#### 1.2.1. Modèles en courant continu :

C'est à Obenaus [26] que l'on doit l'une des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces contaminées. Etant donné un circuit formé

d'un arc de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  représentant la couche de pollution humide, alimenté par une tension constante  $U$ . La tension d'entretien de l'arc  $V_{arc}$  a pour expression :

$$V_{arc} = \frac{xN}{i^n} \quad (1.1)$$

où  $n$  et  $N$  sont des constantes de caractéristique statique de l'arc.

L'équation du circuit s'écrit alors :

$$x = \frac{i^n}{N} (U - IR_p) \quad (1.2)$$

La longueur maximale  $x_c$  de l'arc qui, placé en série avec une résistance fixe  $R_p$  dans un circuit alimenté par une tension continue  $U$  peut s'entretenir, a été obtenue en dérivant (1.2) par rapport à  $i$  et en cherchant pour quelle valeur de  $i$  la dérivée s'annule. l'expression du courant critique  $I_{cx}$  a la forme suivante :

$$i_{cx} = \frac{n}{n+1} I_{sc}^* \quad (1.3)$$

où  $I_{sc}^* = U/R_p$  représente le courant qui s'écoulerait si l'arc était remplacé par un court-circuit sous tension nulle. Il s'ensuit que la longueur d'arc critique  $x_c$  a pour expression :

$$x_c = \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}} U \cdot \frac{I_{sc}^{*n}}{N} \quad (1.4)$$

Bien que Obenaus n'ait pas développé davantage les équations ci-dessus, il est facile de voir que (1.4) peut être utilisée pour établir une expression générale donnant la tension continue minimale  $U_{cx}$  nécessaire pour entretenir un arc de longueur  $x$ , placé en série avec une résistance  $R_p$ . En remplaçant  $I_{sc}^*$  dans (1.4) par sa valeur en fonction de  $U$ , et en résolvant la nouvelle équation par rapport à  $U$ , on obtient pour  $U_{cx}$  :

$$U_{cx} = \frac{n+1}{n} \cdot N \cdot \frac{1}{n+1} \cdot x \cdot \frac{1}{n+1} \cdot R_p \cdot \frac{n}{n+1} \quad (1.5)$$

### 1.2.2. Modèles à résistance de pollution Uniforme :

Reprenant l'approche d'Obenaus, Neumarker [23] a introduit l'hypothèse supplémentaire d'une résistance de pollution uniforme par unité de longueur de fuite et a donc posé :

$$R_p = \overline{r_p}(L - x) \quad (1.6)$$

Cette hypothèse étant faite, il a établi que la tension continue minimale  $U_{cx}$  nécessaire pour entretenir l'arc sur fraction  $x/L$  de la distance de fuite  $L$  étant liés aux paramètres fondamentaux par la relation :

$$\frac{nN}{r_p} \left[ \frac{U_{cx}}{(1+n)NL} \right]^{\frac{n+1}{n}} = \left( \frac{x}{L} \right)^{\frac{1}{n}} - \left( \frac{x}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (1.7)$$

La tension critique peut s'écrire :

$$V_c = L(kn^n)^{\frac{1}{n+1}} \quad (1.8)$$

Dont l'apparition, comme on pourrait le montrer facilement, a lieu pour une distance d'arc critique donnée par :

$$\frac{x_c}{L} = \frac{1}{n+1} \quad (1.9)$$

### 1.2.3. Critères de propagation de l'arc :

A partir l'expérience de contournement effectuée sur une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique pratiquement constante, Hampton [19] a établi que la condition nécessaire pour que se produise le contournement est que le gradient de tension  $E_p$  dans la colonne d'eau dépasse le gradient à l'intérieur de l'arc  $E_a$ . En d'autres termes, un arc partant d'une section d'un cylindre ayant une résistivité constante se propagera à la surface de ce dernier si le gradient de tension dans l'arc  $E_a$  est inférieur au gradient de tension le long du cylindre. Le critère de propagation de l'arc s'écrit donc :

$$E_a < E_p \quad (1.10)$$

Ce critère a été, en quelque sorte, généralisé par Hesketh [27], qui fait l'hypothèse que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie automatiquement de façon à rendre maximale le courant qu'il tire de la source d'alimentation ; on peut donc réécrire le critère de contournement sous la forme :

$$\frac{di}{dx} > 0 \quad (1.11)$$

#### 1.2.4. Critères Multiples :

Nacke [28] a considéré à la fois le critère d'entretien d'un arc en régime continu, que l'on peut qualifier de critère de stabilité électrique, et le critère de stabilité du mouvement ou critère de stabilité mécanique. Pour le premier, il s'est servi de la condition bien connue de Kaufmann [29]:

$$R_P \geq \frac{\partial V_{arc}}{\partial i} \quad (1.12)$$

#### 1.2.5. Raffinements des modèles en courant continu :

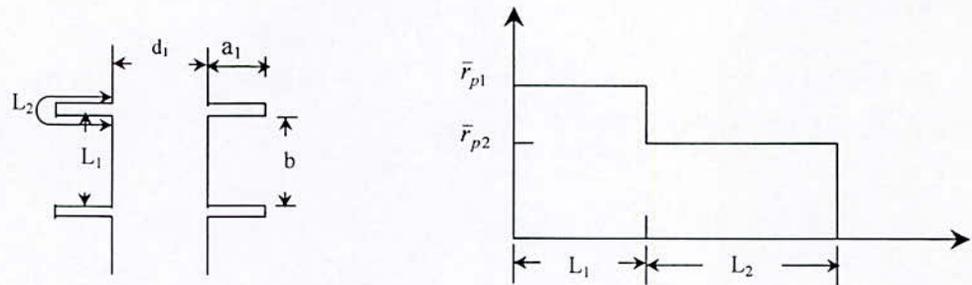
Plusieurs tentatives ont été faites en vue d'améliorer certaines hypothèses simplificatrices sur lesquelles se basent les modèles précédents. Dans beaucoup de cas, elles visaient à permettre d'utiliser les modèles continus pour expliquer les résultats d'essais de contournement en courant alternatif.

##### a)- Modèles de la couche mixte :

De façon à mieux représenter la résistance superficielle de pollution d'un isolateur à long fut, Obenaus et Boehme [26] ont considéré que celle-ci était équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique  $\bar{r}_{p1}$  et  $\bar{r}_{p2}$  et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes, et ils ont décomposé la distance totale de fuite en deux distances partielles,  $L_1$  et  $L_2$  respectivement (Fig1.1). L'application du critère de Hampton leur a permis de déduire la relation (1.10) donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et choisissant l'exposant  $n=1$ ) :

$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{N}\sqrt{\bar{r}_{p1}} \quad (1.13)$$

$N=80\text{VA/cm}$ , le modèle concorde bien avec les résultats d'essais obtenus en régime alternatif pour les couches polluantes de faible résistivité.



*Fig.1.1- Modèle d'un isolateur à long fut et distribution de la résistance de pollution selon Bbochme et obenaus*

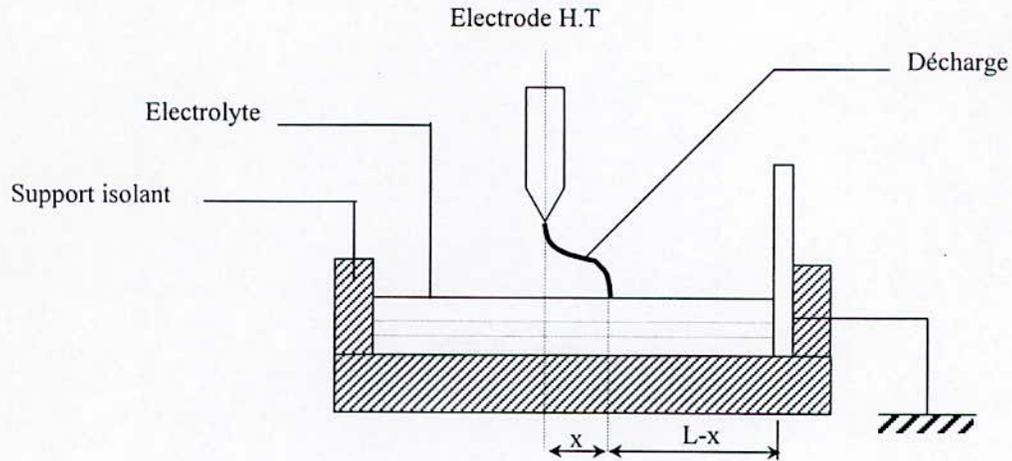
En appliquant le critère de Hesketh, l'expression précédente devient

$$\frac{V_c}{L} = 0.8(Lri) \quad (1.14)$$

où  $r$  étant la résistance linéaire sur une longueur partielle de fuite  $L_1$  ou  $L_2$ .

Notons que les études précédentes décrivent électriquement la décharge en phase stable ou en propagation, pour un modèle unidimensionnel.

Cependant Rahal et Huraux [12] ont proposé quant à eux un modèle (fig.1.2) permettant d'en prévoir la stabilité ou l'instabilité à une seule condition que l'on introduit quelques critères supplémentaires d'origine expérimentale et de faire une approche en bi-dimensionnel en réalisant toutes les corrections possibles des équations décrivant le modèle unidimensionnel. Cette approche a été déjà étudiée par Cheng et Jolly [30]



*Fig .1.2- modèle de laboratoire d'après Rahal et Huraux*

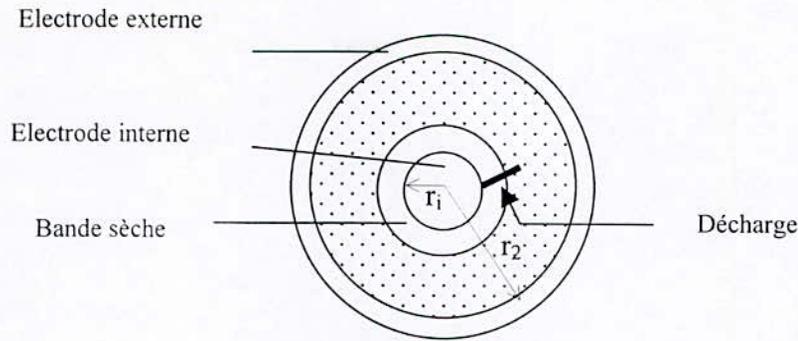
#### b)- Modèle du disque circulaire :

Woodson et McElroy [31] ont imaginé une configuration géométrique (illustrée à la figure 1.3) qui représenterait de façon idéale la surface d'un isolateur à disque. Ils partaient de l'hypothèse que, de façon générale, la résistance superficielle de la couche de pollution humide, pour n'importe quelle position  $r_a$  du point de départ de l'arc de rayon  $r_d$ , peut s'exprimer par une fonction de la forme :

$$R_p = \frac{1}{K_s} f(r_d, r_a, r_o) \quad (1.15)$$

ou  $r_o$  est le rayon de l'électrode externe et  $K_s$  la résistivité superficielle du polluant. Si l'on néglige la dépendance de la fonction  $f$  vis-à-vis du rayon de l'arc  $r_d$ , on obtient une expression encore plus simple ayant la forme :

$$R_p = \frac{const}{k_s} (r_o - r_a)^m \quad (1.16)$$



**Fig.1.3 Model d'isolateur en forme disque tel quel étudié par McElroy et Woodson**

La constante a été ensuite déterminée expérimentalement pour  $R_p = 1.6 \times 10^{-2}$  et la valeur obtenue était 1,4. McElroy et Woodson ont utilisé, avec assez peu de succès, le modèle continu, avec  $n=0.8$  et  $N=200$  comme valeur pour le paramètre de la caractéristique statique d'arc, afin de donner une interprétation aux résultats d'essai de contournement en régime alternatif. Ils ont imputé l'absence de concordance entre la théorie et l'expérience à la non-uniformité de résistivité superficielle sur l'isolateur.

Quand Nacke [28], a proposé l'hypothèse que les points formant la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (fig.1.4). Il a divisé la résistance de pollution en deux termes ; Une résistance interne  $R_{pi}(x)$  propre aux deux demi-cercles, et une résistance externe  $R_{pe}(x)$  pour le reste. Dans le cas de la résistance interne, le résultat de Nacke pourrait s'écrire sous la forme :

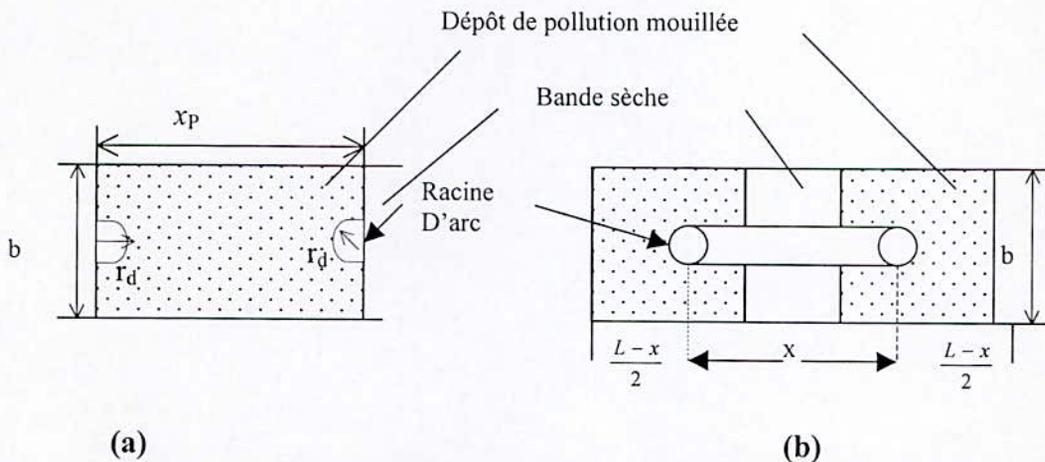
$$R_{pi} = \frac{1}{\pi k_s} \quad (1.17)$$

La forme de l'expression traduisant la résistance  $R_e(x)$  dépend de la largeur de la bande [28]. S'il s'agit d'une bande de largeur étroite, c'est-à-dire pour  $\frac{x_p}{b} \geq \frac{2}{\pi}$ , le résultat de Nacke peut s'écrire sous la forme :

$$R_e(x) = r x_p + \frac{2}{\pi \gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (1.18)$$

où  $r = x_p/b$  est la résistance linéaire de la pollution.  
 $x_p$  est la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques.

Nacke et Wilkins ont introduit des facteurs de températures importants pour faire baisser la résistivité de la couche de pollution et obtenir à partir du modèle continu, une tension de contournement qui concorde de façon acceptable avec les résultats des essais alternatifs [32].



(a) (b)  
**Fig.1.4- Schémas pour le calcul de résistance de pollution selon :**  
 (a)Nacke , (b) Wilkins

#### c)- Chute de tension aux électrodes de l'arc :

Grâce à des mesures, Nacke [28] a établi que la somme des chutes des potentiels à la cathode et à l'anode, pour les arcs établis entre des électrodes électrolytiques était de 830 V ; Wilkins de son côté a obtenu 840V. Il est très simple d'intégrer la chute de potentiel aux électrodes dans le modèle, car ce paramètre n'a pas d'effet sur la longueur d'arc critique. Néanmoins, en dehors des conditions où le niveau de pollution est extrêmement élevé et où des arcs multiples brûlent en série, on peut, en principe, négliger les chutes de potentiel aux électrodes.

#### d)- Isolateurs de grand diamètre :

Pour l'évaluation de  $r_p$  apparaissant dans les équations (1.24), on considère généralement qu'il n'y a pas d'arc parallèle, de sorte que l'on a :

$$r_p = \frac{1}{\pi D k_s} = \frac{1}{b k_s} \quad (1.24)$$

où  $D$  représente le diamètre moyen de l'isolateur et  $b$  la circonférence moyenne de ce dernier ( $\pi D$ ).

Cependant, dans le cas des isolateurs de grand diamètre, on constate souvent que plusieurs arcs peuvent s'amorcer simultanément en parallèle au-dessus d'une bande sèche. Si cette situation se présente pour les conditions d'arc critique, il convient de substituer à la largeur réelle  $b$  une largeur effective  $b_{\text{eff}}$  correspondant à un arc unique.

## **F)- Effets de la température**

Dans le modèle précédent,  $k_s$  désigne normalement la conductivité de la couche saturée à la température ambiante. On suppose donc implicitement que la température de la couche mouillée ne dépend pas de façon marquée de cette couche. La mesure dans laquelle cette hypothèse se justifie peut varier selon le type d'isolateur, la nature de l'agent de pollution et la technique d'essai utilisée.

### **1.2.6. Modèles en courant alternatif :**

Les modèles à courant alternatif développés, afin d'étudier un contournement engendré par la pollution des isolateurs, peuvent être classés en deux catégories : modèles théoriques et modèles expérimentaux. Chacune de ces deux catégories a ses propres caractéristiques.

#### **1.2.6.1. Modèles théoriques :**

Un arc alternatif s'éteint deux fois par période, c'est-à-dire chaque fois que le courant s'annule. De façon grossière, on peut considérer que le réalumage de l'arc à la suite de l'annulation du courant se fait par rupture de l'équilibre énergétique et rupture diélectrique. Il y a rupture énergétique lorsque l'espace où se maintient l'arc résiduel ne parvient plus à dissiper l'énergie injectée dans le plasma. Ce type de rupture se produit normalement immédiatement après l'annulation du courant et s'accompagne d'une croissance très rapide de la tension de rétablissement.

### a)- Modèles de réalumage par rupture énergétique :

Pour l'étude de la rupture énergétique, on peut utiliser les équations dynamiques décrivant l'interaction du circuit d'essai avec l'arc résiduel. Pour la rupture diélectrique, il faut s'intéresser à la décroissance de la température du gaz chaud résiduel.

Maikopar [33] s'est servi de l'équation de Mayr [34] pour décrire, dans l'intéressante plage de courant comprise entre 0,1 et 1 A, l'arc dynamique en fonction d'une perte de puissance de temps  $\theta$ . A la suite de Mayr [34] et Browne [36], Maikopar a résolu l'équation de Mayr pour un courant sinusoïdal et il a obtenu à la relation ci-dessous entre la résistance d'arc résiduel à courant nul  $R_0$  et la valeur de cette résistance,  $R_m$ , au passage du courant par son maximum :

$$\frac{R_m}{R_0} = \frac{1 + 2\omega^2\theta_1^2}{1 + 2\omega^2\theta_2^2} \quad (1.25)$$

où  $\theta$  est la constante de temps de l'arc de l'équation de Mayr et  $\omega$  la fréquence angulaire de l'alimentation. Pour la constante de temps  $\theta$  et la puissance constante  $N_0$  de la caractéristique statique de Mayr, Maikopar a choisi deux ensemble de valeurs :  $\theta_1$  et  $N_{01}$  pour la période précédant l'annulation du courant et  $\theta_2$  et  $N_{02}$  pour la période lui faisant suite.

Quant à Browne [35], il a obtenu pour la rupture énergétique la condition critique suivante :

$$U_{cx}^2 = kN_{02}R_mx \quad (1.26)$$

ou  $x$  représente la longueur de l'arc.

Il est possible de développer l'expression (1.26) de façon à en tirer une relation entre la tension critique nécessaire pour l'entretien d'un arc alternatif de courant crête  $I_m$  et la longueur  $x$ . En remplaçant  $R_m$  et  $k$  (non donné dans la publication de Maikopar) par leurs expression en fonction des paramètres connus, on obtient :

$$U_{cx} = \frac{xN_{02}}{I_m} \sqrt{\frac{(1 + 4\omega^2\theta_1^2)(1 + \omega^2\theta_2^2)}{2\omega^2\theta_1^2 \cdot 2\omega^2\theta_2^2}} \quad (1.27)$$

Si l'on garde  $N_{02}=25 \text{ V.A/cm}$ , mais que l'on prenne une valeur plus réaliste pour  $\theta_1$ , celle que donne Maikopar à  $250 \mu\text{s}$  pour  $\theta_2$ , et avec  $\omega=314 \text{ rads/s}$ , l'équation devient :

$$U_{cx} = \frac{2080}{I_m} \quad (1.28)$$

#### b)- Modèle de réalumage par rupture diélectrique :

Ce modèle, proposé par RIZK [35], se fonde sur l'hypothèse que, dans l'intéressante plage des courants d'arc compris entre 50 mA et 1 A, la conductance électrique de l'arc résiduel devient pour ainsi dire négligeable au moment de l'annulation du courant. L'espace résiduel est considéré comme un gaz chaud de géométrie cylindrique, dont la température, initialement de l'ordre de  $3000^\circ\text{K}$ , s'abaisse par suite de phénomènes de conduction thermique généralisés. Le rôle de la connexion naturelle est censé se limiter à conditionner le rayon limite de l'arc  $r_p$ , qui lui-même peut être déterminé au moment où le courant passe par sa valeur crête à partir de la solution stationnaire de Maecker [37], en prenant comme condition aux limites la caractéristique V.A stationnaire.

#### 1.2.6.2. Modèles expérimentaux :

On dit que ces modèles sont «établis expérimentalement» du fait qu'ils ne sont pas liés à un mécanisme physique particulier d'entretien de l'arc alternatif (rupture énergétique ou diélectrique), et qu'ils sont établis exclusivement à partir de résultats expérimentaux.

Hurley et Limbourn [38] ont fondé leur modèle sur une relation empirique donnant la tension minimale nécessaire pour l'entretien d'un arc alternatif dans un espace entre deux tiges de longueur  $x$ , en série avec une résistance  $R_p$ . Cette relation est la suivante :

$$U_{cx} = \text{const} \cdot x^{\frac{2}{3}} \cdot R_p^{\frac{1}{3}} \quad (1.29)$$

Ce qui est intéressant dans ce modèle, c'est que l'on a constaté que la tension de contournement critique (minimale) dépend à la fois de la distance de fuite  $L$  et de la longueur d'arc minimale  $L_a$  de l'isolateur et que par suite on a : une telle formule qui a des chances de se révéler utile pour la comparaison entre deux d'isolateurs se caractérisant par des rapports  $L/L_a$  différents.

Le modèle alternatif de Claverie [39], que Claverie et porcheron [1] ont modifié légèrement plus tard se fonde sur la relation empirique ci-dessous donnant la tension de réalumage minimale en fonction du courant d'arc.

$$U_{cx} = \frac{940 \cdot x}{\sqrt{i}} \quad (1.30)$$

Une expression approchée de la tension d'arc à l'instant où le courant alternatif passe par sa valeur de crête qui a la forme suivante :

$$V_{arc} = \frac{100 \cdot x}{\sqrt{i}} \quad (1.31)$$

Après modification, l'expression (1.30) est devenue :

$$U_{cx} = \frac{800 \cdot x}{\sqrt{i}} \quad (1.32)$$

On pense même que la constante apparaissant dans (1.30) devrait encore être réduite et ramenée approximativement à 700, surtout si l'on cherche à rendre minimale la tension critique plutôt qu'à obtenir les valeurs moyennes.

Il ressort de l'analyse précédente que rien ne justifier physiquement que les exposants associés au courant dans les expressions de la tension de réallumage et de la tension d'entretien de l'arc doivent avoir la même valeur. Seule une raison pratique peut justifier le choix de simplification des calculs analytiques.

Pour l'équation du circuit,  $R_p$  a été mesurée au moyen de sondes disposées à la surface de l'isolateur.

### 1.2.7. Conclusion :

La détermination de la sévérité de pollution d'un site ainsi que le choix approprié des isolateurs doivent être basés en premier lieu sur les résultats des mesures de pollution effectuées dans des conditions naturelles et sur ceux des essais d'isolateurs dans des stations d'essais sur le site.

Les adaptations des mesures de pollution utilisant la méthode indirecte (consistant dans l'analyse de la quantité des dépôts et dans la mesure de la conductivité des composants solubles ) et utilisant la méthode directe (consistant dans la mesure de la conductivité superficielle des isolateurs) sont analogues pour la détermination du niveau de pollution d'une région et de la contrainte de l'isolement. Les deux méthodes conduisent aux mêmes conclusions étant donné que les répartitions statistiques de la quantité des dépôts  $G$ , de la conductivité des composants solubles  $\gamma$  et de la conductivité superficielle de l'isolateur  $K$  sont similaires.

Afin de concevoir d'une manière rationnelle l'isolement des ouvrages, et pour posséder une connaissance suffisante du comportement des isolateurs, des modèles mathématiques et expérimentaux ont été proposés.

La nature des modèles mathématiques représentant un contournement engendré par une pollution est forcément idéalisée principalement à cause des hypothèses simplificatrices. Il est entendu donc que de tels modèles ne doivent pas être envisagés que dans la mesure où ils apportent un complément valable à l'expérimentation en milieu naturel,

# chapitre II

## Modèle mathématique

## 2. 1. Introduction :

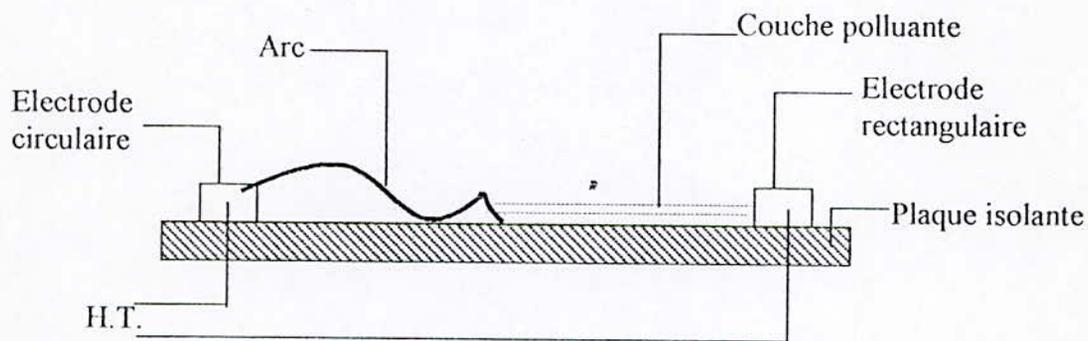
Notre étude, basée sur le modèle de Mekhaldi et Tegar [2], consiste à étudier par simulation numérique le développement de l'arc électrique sur une surface isolante recouverte d'une couche de pollution continue ou discontinue. Elle propose également un moyen de surveillance du degré de pollution des isolateurs, afin d'éviter les incidents provoqués par le contournement et ce en mesurant simplement le niveau des pointes du courant de fuite.

En outre, nous allons simuler le comportement réel de l'isolateur pollué en représentant la couche polluante par une capacité en parallèle avec une résistance.

## 2.2. Mise en équation

### 2.2.1. Etablissement des équations fondamentales :

Le modèle expérimental utilisé pour la discrétion des mécanismes de développement de l'arc électrique est constitué d'une plaque isolante sur laquelle sont fixées deux électrodes, une circulaire et l'autre rectangulaire (Fig.2.1).



*Fig. 2.1- Le Modèle considéré dans l'étude du développement de l'arc électrique*

Les phénomènes d'arc, se produisant sur une surface polluée, sont tellement complexes qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices pour rendre possible leur représentation au moyen d'un modèle mathématique [2].

La complexité de ces phénomènes a pour origine de nombreux facteurs, à savoir la variabilité de résistivité superficielle découlant essentiellement de l'existence d'échange thermique, la formation d'arcs multiples, . . .

La modèle expérimental de la figure 2.1 est équivalent à une décharge électrique de longueur  $x$  en série avec une impédance  $Z_p(x)$  représentant la couche de pollution. Cette impédance est équivalente à une résistance  $R_p(x)$  et une capacité  $C_p(x)$  en parallèles (fig.2-2).

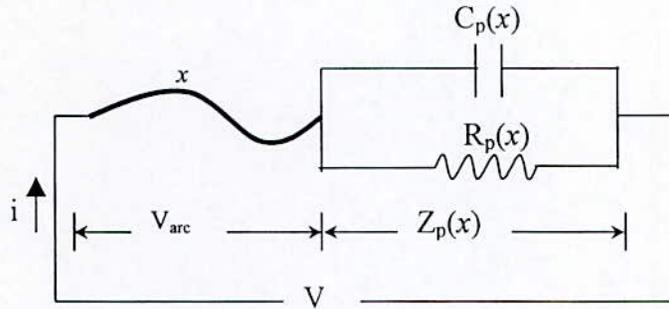


Fig. 2.2- Circuit électrique équivalent

La nature expérimentale (présentée en chapitre 3) montre qu'il existe un déphasage capacitif entre le courant de fuite et la tension appliquée sur l'isolateur, d'où la proposition en plus au modèle de Mekhaldi et Teguar [2], une capacité en parallèle avec la résistance.

La tension  $V$  est la somme de la tension d'arc et celle aux bornes de l'impédance  $Z_p(x)$  qui représente la couche de pollution. L'équation du circuit s'écrit alors :

$$V = V_{arc} + Z_p(x)i \quad (2.1)$$

L'impédance de circuit équivalent  $Z_p(x)$  a pour expression :

$$Z_p(x) = \frac{R_p(x)}{1 + jR_p(x)C_p(x)\omega} \quad (2.2)$$

où  $R_p(x)$  et  $C_p(x)$  sont respectivement la résistance et la capacité de la couche polluante.

Le module de  $Z_p(x)$  est donc :

$$|Z_p(x)| = \frac{R_p(x)}{\sqrt{1 + R_p^2(x)C_p^2(x)\omega^2}} \quad (2.3)$$

Des mesures effectuées en courant alternatif [19], ont permis d'établir la relation approchée donnant la tension d'arc en fonction du courant de fuite et de la longueur d'arc :

$$V_{arc} = \frac{Ax}{i^n} \quad (2.4)$$

Pour simplifier les calculs analytiques, nous avons pris les mêmes valeurs pour les exposant associés au courant de fuite dans les expressions de la tension d'entretien de l'arc et celle de réallumage en courant alternatif. D'une part, étant donné que  $V_{arc}$  est trait petit  $Z_p(x)i$ , la tension appliquée entre les deux électrodes peut s'écrire sous la forme :

$$V = \frac{Ax}{i^n} + |Z_p(x)| \cdot i \quad (2.5)$$

### 2. 2. 2. Condition limite de maintien de l'arc électrique en courant alternatif

A la fin de chaque alternance le courant est interrompu puis réapparaît quelques instants plus tard lorsque la tension est suffisante pour provoquer le réamorçage de l'arc.

Ce réamorçage correspond, en fait, à une brusque augmentation de la conductivité du canal ionisé qui demeurait après extinction de l'arc précédent.

Suivant certaines considérations [1], la condition de réamorçage de l'arc électrique est la suivante:

$$V \geq \frac{Kx}{i^n} \quad (2.6)$$

où  $V$  est la tension appliquée aux bornes des électrodes,  $i$  le courant de fuite le long de la surface de l'isolateur et  $k$  et  $n$  les constantes caractéristiques.

A partir de la relation précédente, la longueur maximale  $X$  de l'arc en série avec une impédance  $Z_p(X)$  dans un circuit alimenté par une tension alternative  $V$  et parcouru par le courant maximal  $I$  est :

$$X = \frac{VI^n}{K} \quad (2.7)$$

Cette relation est valable quelle que soit la conductivité et la répartition de la couche polluante.

### 2. 2. 3. Tension appliquée en fonction de la pollution :

En éliminant le courant entre les deux équations (2.5) et (2.7), nous obtenons la relation de la tension d'alimentation  $V$ . en fonction de module de l'impédance de la couche polluante  $|Z_p(x)|$  et de la longueur d'arc maximale  $X$  :

$$V = \frac{k}{(k - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left[ x^n |Z_p(x)| \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.8)$$

A partir de l'équation (2.2) et en reportant l'impédance  $Z_p(X)$  dans l'expression précédente, nous obtenons :

$$V = \frac{k}{(k - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left[ x^n \frac{R_p(X)}{\sqrt{1 + R_p^2(X)C_p^2(X)\omega^2}} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.9)$$

D'autre par, l'impédance de la couche de pollution peut s'écrire sous expression :

$$Z_p(X) = |Z_p(X)|(\cos(\varphi(X)) + j \sin(\varphi(X))) \quad (2.10)$$

où  $|Z_p(X)|$  et  $\varphi(X)$  sont respectivement le module de l'impédance de circuit équivalent et le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée sur la plaque isolante.

A partir des équations (2.2) et (2.10) nous déduisons les relations de la résistance et de la capacité en fonction de déphasage et de module de l'impédance de circuit équivalent.

La résistance de circuit équivalent est telle que:

$$R_p(X) = \frac{|Z_p(X)|}{\cos(\varphi(X))} \quad (2.11)$$

De même pour la capacité , nous trouvons :

$$C_p(X) = \frac{-\sin(\varphi(X))}{|Z_p(X)|\omega} \quad (2.12)$$

$\omega$  étant la fréquence de la tension de l'alimentation en rd/s.

### 2.2.4. Etat critique et Contournement:

Les expressions (2.8) et (2.9) sont considérées comme fonctions de  $X$  uniquement. Elles présentent un même maximum  $V_c$  pour la valeur de la longueur d'arc  $X = X_c$ . Pour les valeurs de tension appliquées inférieures à  $V_c$ , nous avons établissement d'un régime stable.

Les valeurs de tensions, courants et longueurs d'arc sont reliées par les relations (2.5) et (2.6). Dès que la tension dépasse  $V_c$ , l'arc se développera et atteindra l'autre électrode en provoquant le contournement du dispositif ; c'est le régime instable. La limite entre le régime stable et le régime instable est dite "état critique".

L'état critique correspond donc à une tension critique,  $V_c$ , qui apparaît comme la tension qui ne serait être dépassée sans que le contournement du dispositif isolant ne se produise.

La tension critique  $V_c$  est définie suivant l'expression :

$$V_c = \frac{k}{(k - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left[ X_c^{\frac{1}{n}} |Z(X_c)| \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.13)$$

la tension critique, le courant critique et la longueur maximale de l'arc  $X_c$  sont liés selon la relation suivante :

$$V_c I_c^n = k X_c \quad (2.14)$$

où  $X_c$  peut se déduire de la solution numérique de l'équation :

$$\frac{d[X_c^{\frac{1}{n}} Z_p(X)]}{dx} = 0 \quad (2.15)$$

La tension critique peut aussi s'écrire sous la forme :

$$V_c = \frac{k}{(k - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left[ X_c^{\frac{1}{n}} \frac{R_p(X_c)}{\sqrt{1 + R_p^2(X_c) C_p^2(X_c) \omega^2}} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.16)$$

A partir des équations (2.10), (2.11) et (2.12) et en se basant sur le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée sur la plaque isolante, trois cas se présentent:

**Premier Cas : déphasage  $\varphi(X)$  nul.**

dans ce cas , nous pouvons considérer, l'impédance de circuit équivalent comme étant une résistance  $Z_p(X) = R_p(X)$ , ce cas a été adopté par certains chercheurs [39].

Ainsi nous trouvons :

$$\frac{d[X^{-n}|Z_p(X)]}{dX} = \frac{d[X^{-n}R_p(X)]}{dX} \quad (2.17)$$

La longueur critique d'arc  $X_c$  est obtenue donc en résolvant l'équation suivante:

$$\frac{d[X^{-n}R_p(X)]}{dX} = 0 \quad (2.18)$$

**Deuxième Cas : déphasage  $\varphi(X)$  constant.**

Dans ces conditions et à partir des équations (2.11) et (2.12), la résistance et la capacité du circuit équivalent sont reliées par l'expression suivante:

$$R_p(X)C_p(X) = -\frac{\tan g(\varphi(X))}{\omega} = \text{const} \quad (2.19)$$

Dans ce cas, la résistance et la capacité en fonction de la longueur d'arc maximale  $X$ , sont inversement proportionnelles.

À partir des équations (2.12) et (2.15), nous déduisons l'expression suivante :

$$\frac{d[X^{-n}|Z_p(X)]}{dX} = \cos(\varphi) \frac{d[X^{-n}R_p(X)]}{dX} \quad (2.20)$$

Pour trouver la longueur critique d'arc, il suffit donc de résoudre l'équation :

$$\frac{d[X^{-n}R_p(X)]}{dX} = 0 \quad (2.21)$$

**Troisième cas : déphasage  $\varphi(X)$  variable.**

En maximisant l'équation (2.15) par rapport à  $X$ , nous trouvons les deux équations suivantes :

$$\frac{d[X^n R_p(X)]}{dX} = 0 \quad (2.22)$$

et

$$\frac{d[R_p(X)C_p(X)]}{dX} = 0 \quad (2.23)$$

$X_c$  représente donc la solution commune des deux expressions précédentes.

**2.2.5. Corrélation entre la tension appliqué et le courant de fuite:**

définissons le coefficient de sécurité par le rapport entre la tension appliquée  $V$  correspondant au degré de pollution actuel de l'isolement considéré et la tension critique  $V_c$ . Cet écart caractérise, en fait, la marge de sécurité du dispositif isolant.

En effet, d'après les relations (2.8) et (2.13), nous pouvons écrire :

$$C_s = \frac{V}{V_c} = \left[ \frac{X^n |Z_p(X)|}{X_c^n |Z_p(X_c)|} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.24)$$

Nous définissons ensuite  $P$  comme étant le produit de la tension  $V$  par le courant  $I$  élevé à la puissance  $n$ , soit par le produit de la constante  $k$  par la longueur d'arc  $X$  :

$$P = VI^n = kX \quad (2.25)$$

Par suite, le produit critique  $P_c$  est tel que :

$$P_c = V_c I_c^n = kX_c \quad (2.26)$$

A partir des relations (2.25) et (2.26), il est clair que  $X$  peut s'exprimer en fonction du rapport  $P/P_c$  puisque :

$$X = \frac{P}{P_c} X_c \quad (2.27)$$

En définitive, le coefficient de sécurité pourra donc être considéré comme étant une fonction du rapport  $P/P_c$  :

$$C_s = \frac{V}{V_c} = \left[ \frac{\left(\frac{P}{P_c}\right)^{\frac{1}{n}} |Z_p\left(\frac{P}{P_c} X_c\right)|}{|Z_p(X_c)|} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.28)$$

### 2.2.6. Détermination de l'impédance de la couche polluante :

pour déterminer l'impédance de circuit équivalent  $Z_p(X)$ , pour un isolateur pollué, deux méthodes peuvent être utilisées. La première consiste à une méthode de mesure directe dans laquelle est simulé au moyen d'une électrode auxiliaire que l'on déplace sur la surface de l'isolateur [8]. La seconde est une méthode indirecte basée sur l'interprétation des mesures de courant de fuite.

Dans ce qui suit, du moment que nous présentons une étude mathématique, nous nous intéressons à la méthode indirecte.

Les valeurs de module de l'impédance  $Z_p(X)$  peuvent être déterminées à partir de mesures de courants de fuites. Le système formée par les équations (2.5) et (2.7) permet de calculer  $|Z_p(X)|$  à partir des valeurs de  $V$  et  $I$ .

$$|Z_p(X)| = \frac{(k - A) V}{k I} \quad (2.31)$$

Connaissant les valeurs de module de l'impédance  $Z_p(X)$  et le déphasage  $\varphi(X)$ , la résistance et la capacité de circuit équivalent de la couche de pollution sont données respectivement par les équations:

$$R_p(X) = \frac{|Z_p(X)|}{\cos(\varphi(X))} \quad (2.32)$$

$$C_p(X) = \frac{-\sin(\varphi(X))}{|Z_p(X)|\omega} \quad (2.33)$$

Ainsi pour déterminer les paramètres caractérisant la couche de pollution d'un isolateur, il suffira de mesurer le courant de fuite maximale  $I$  et le déphasage  $\varphi(X)$  en augmentant la tension par paliers. Cette méthode de mesure, plus facilement utilisable que la méthode directe, peut être utilisée sur un site aussi bien qu'en laboratoire [8].

### 2.3. Simulation numérique :

Afin d'intervenir à temps pour éviter les incidents provoqués par le contournement, notre étude a pour intérêt de disposer d'un moyen de surveillance du degré de pollution des isolateurs pollués. La détermination du coefficient de sécurité de l'isolateur pollué apporte une solution à ce problème.

Le modèle mathématique élaboré dans notre étude, concernant le développement de la décharge électrique sur une surface d'un isolateur pollué, est basée surtout sur la connaissance de la caractéristique d'impédance  $Z_p(X)$ , donc de l'effet résistif et l'effet capacitif simultanément. celles-ci représentent la clé de notre travail.

Les essais au laboratoire permettent de mesurer les courants de fuite et les longueurs d'arc sur les surfaces polluées, pour différents niveaux de tensions d'application et éventuellement pour différentes résistivités.

A partir de ces valeurs expérimentales pour une résistivité et une distribution de couche de pollution données, nous avons la possibilité de déterminer les valeurs des constantes caractéristiques statiques de l'arc, en utilisant les méthodes approximatives. Dans notre étude, nous avons utilisé le logiciel EUREKA permettant de déterminer ces constantes, à partir des valeurs expérimentales de la tension d'essais, du courant de fuite et de la longueur d'arc, avec une précision de  $10^{-5}$ .

En effet, nous pouvons déterminer les valeurs des paramètres caractéristique de circuit équivalent de la couche pollution  $Z_p(X)$ ,  $R_p(X)$  et  $C_p(X)$  à partir des expressions (2.31), (2.32) et (2.33).

Connaissant les valeurs de  $X$ ,  $R_p(X)$ , et  $C_p(X)$ , nous pouvons ainsi déterminer, à l'aide d'une méthode approximative (Householder ou moindre carrées,...), les coefficients des fonctions  $R_p(X)$  et  $C_p(X)$  permettant la formulation des polynômes simples et linéaires.

Ces deux polynômes de degré ( $T=M-1$ ) définis sur  $X \in [0,L]$  ( $L$  étant la longueur de fuite totale de l'isolateur), peuvent être représentés par les relations suivantes :

$$R_p(X) = R_1 + R_2X + R_3X^2 + \dots + R_MX^{M-1} \quad (2.34)$$

$$C_p(X) = C_1 + C_2X + C_3X^2 + \dots + C_MX^{M-1} \quad (2.35)$$

où  $R_j$  et  $C_j$ ,  $j$  variant de 1 à  $M$ , sont respectivement les coefficients des polynômes simples  $R_p(X)$  et  $C_p(X)$ .

Le degré  $T=M-1$  des polynômes considérés varie progressivement de 1 à  $T_{\max}$  jusqu'à avoir la plus faible erreur possible. Cette erreur consiste en la valeur absolue de la différence entre les fonctions réelles et celles approchées (de l'ordre de  $10^{-4}$ ).

Une fois les polynômes  $R_P(X)$  et  $C_P(X)$  sont déterminés, il est facile d'estimer la valeur de la longueur critique de l'arc qui représente pour les trois cas de déphasage respectivement les racines des équations (2.17), (2.21) et (2.22), par une méthode itérative de type  $P(X)=0$ . Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode de dichotomie approximant la racine  $X_C$  à une erreur de  $10^{-6}$  près.

Nous évaluons en suite la tension critique  $V_C$ , le courant critique  $I_C$ , le produit  $P$ , le produit critique  $P_C$  ainsi que le coefficient de sécurité de l'isolement pollué  $C_S$  pour chaque longueur d'arc  $X$  d'après les relations (2.15), (2.13), (2.25), (2.26) et (2.24) respectivement.

Enfin, nous sommes en mesure de tracer toutes les caractéristiques décrivant les phénomènes de contournement sur des surface polluées.

### 2.3.1. Algorithme de simulation :

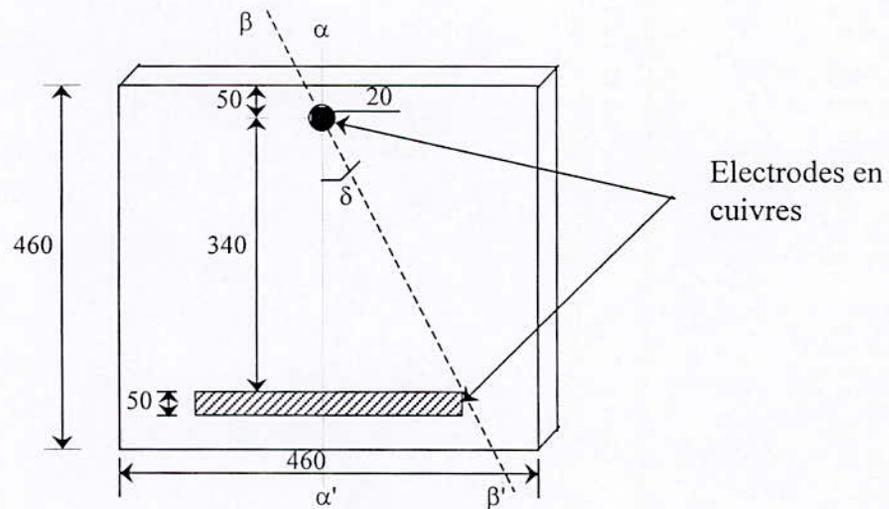
les principales étapes déterminant l'algorithme de simulation sont:

- Etape 1 :** détermination des constantes caractéristiques  $k$  et  $n$  à partir des valeurs expérimentales de la tension d'essai  $V$ , du courant de fuite  $I$  et de la longueur d'arc  $X$ , en utilisant la relation (2.7). ( $A$  : a été choisi égal à 100 [29] )
- Etape 2 :** calcul des éléments caractérisant le circuit équivalent de la couche polluante  $Z_P(X)$ ,  $R_P(X)$  et  $C_P(X)$ , pour chaque valeur de  $X$  à l'aide des expressions (2.31), (2.32) et (2.33) respectivement.
- Etape 3 :** détermination de coefficients  $R_j$  et  $C_j$  ( $j$  variant de 1 à  $M$ ) de la résistance et de la capacité de circuit équivalent à partir des valeurs respectivement de  $X$ ,  $R_P(X)$  et  $C_P(X)$  à l'aide d'une méthode approximative. Le choix de  $M$  correspond à erreur minimale de modélisation commise sur le calcul de ces coefficients.
- Etape 4 :** formulation des polynômes  $R_P(X)$  et  $C_P(X)$ , qui sont simples et linéaires de degré  $(M-1)$  d'après les relations (2.34) et (2.35).
- Etape 5 :** détermination de la fonction du module de l'impédance  $|Z_P(X)|$  à partir des polynômes  $R_P(X)$  et  $C_P(X)$  en utilisant la relation (2.2).
- Etape 6 :** détermination de la valeur de la longueur critique de l'arc représentant la racine des relations (2.17) ou (2.21) ou (2.22) suivant le déphasage envisagé.
- Etape 7 :** Evaluation de la tension critique  $V_C$ , du courant de fuite critique  $I_C$ , du produit  $P$ , du produit critique  $P_C$ , et du coefficient de sécurité  $C_S$ , d'après les relations (2.12), (2.13), (2.24), (2.25) et (2.26) respectivement.
- Etape 8 :** Exploitation des résultats.

## 2.4. Validation :

Claverie et Porcheron [1] ont effectués des essais expérimentaux pour l'étude des processus d'apparition et de développement des arcs électriques sur la surface d'une plaque isolante polluée de préférence à un isolateur réel. C'est ainsi, qu'ils ont fait pour analyser les phénomènes apparaissant sur l'isolateur pollué.

Le dispositif expérimental considéré par Claverie et Porcheron est constitué d'une plaque de porcelaine vernie munie de deux électrodes en cuivre l'une circulaire mise à la haute tension et l'autre rectangulaire mise à la terre.



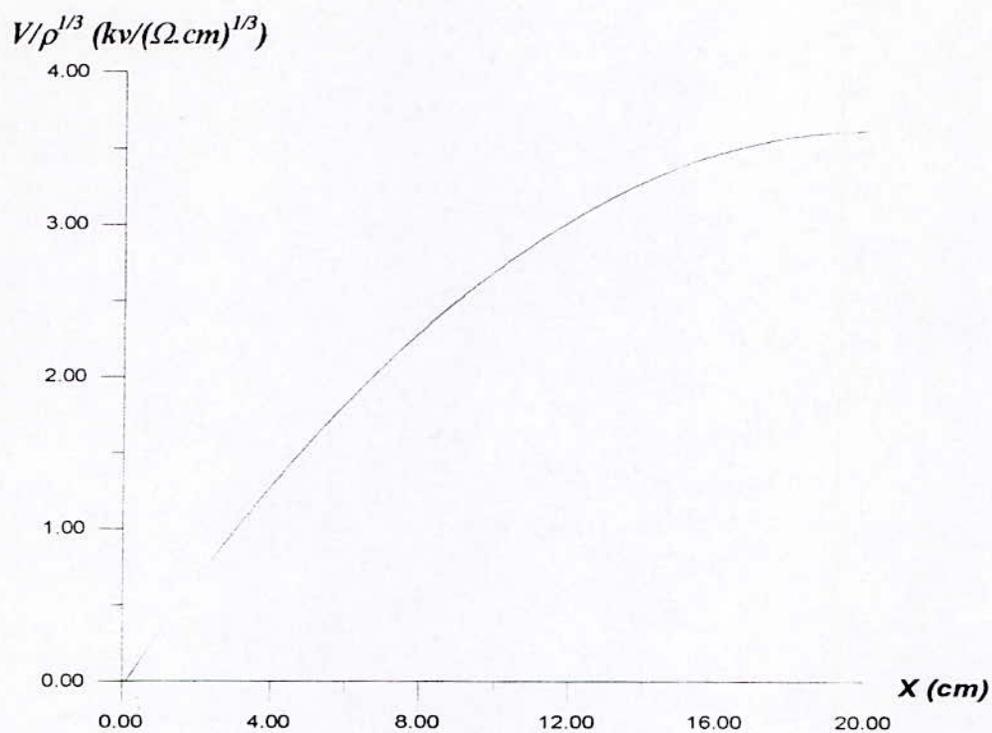
*Fig. 2. 5 - Dispositif expérimental utilisé par Claverier et Porcheron*

### 2.4.1. Résultats obtenus par simulation:

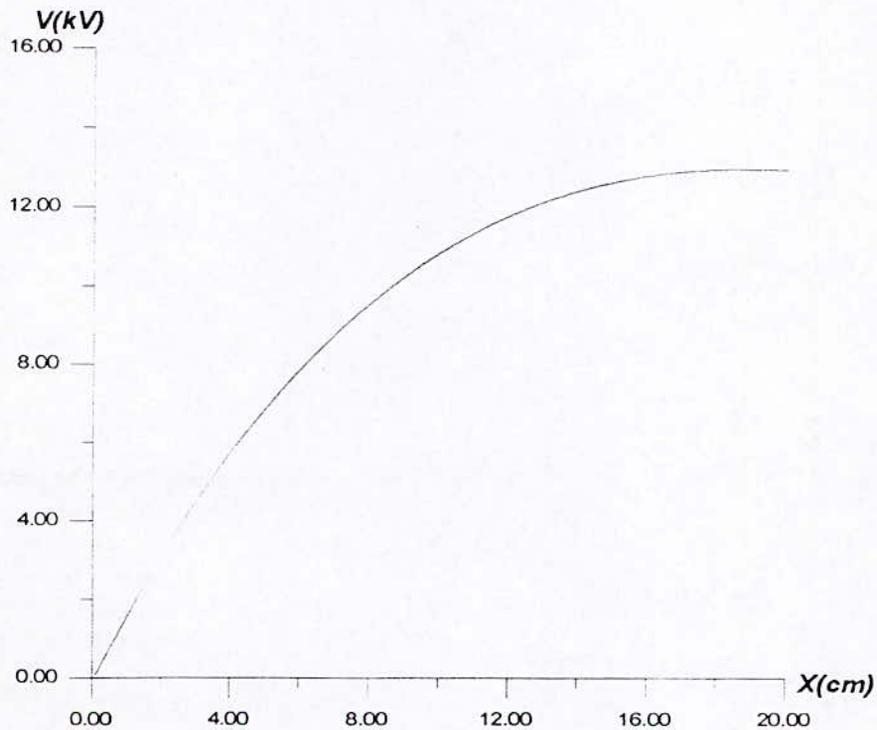
Claverie et porcheron ont effectué des essais basés sur les mesures des courants de fuite et les longueurs de décharges électriques sur les surfaces polluées pour différentes résistivités (25,50,100,200 et 400  $\Omega/\text{Cm}$ ).

Les constantes caractéristiques  $k$  et  $n$  pour le modèle de Claverie et Porcheron sont calculés approximativement en utilisant le logiciel (EUREKA). Nous avons donc injecté les données des courants de fuites des longueurs d'arc en fonction des différents niveaux de tension. Ainsi, nous avons trouvé les valeurs de  $k$  et  $n$  respectivement égales à 800 et 0,5.

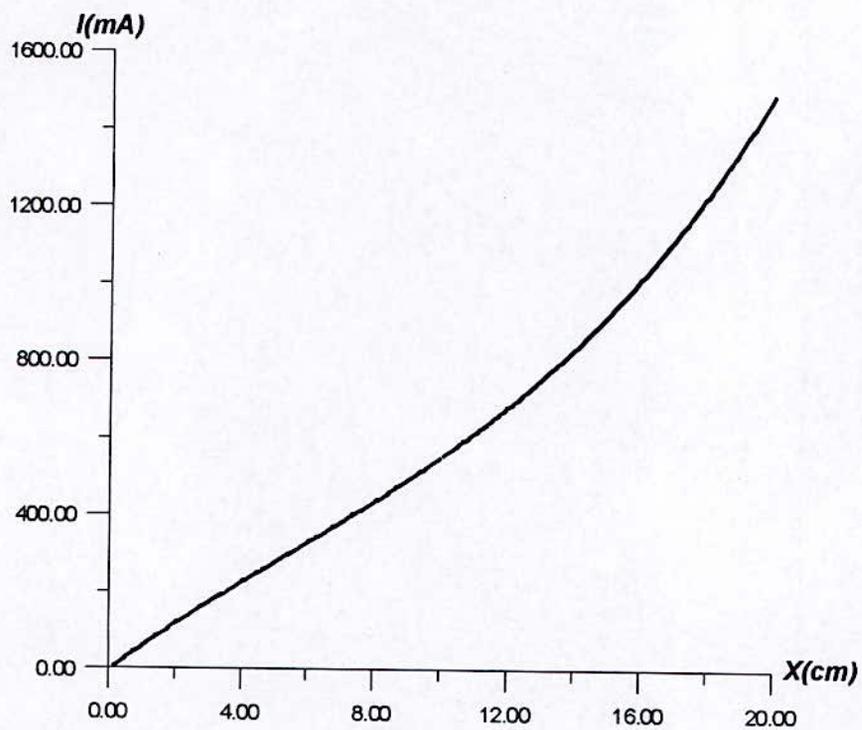
En injectant, pour une résistivité donnée ( 100  $\Omega/\text{Cm}$  ), les valeurs des constantes caractéristiques calculés dans le programme élaborés, nous avons pu tracer les caractéristiques simulées des figures (2. 7) à (2. 10).



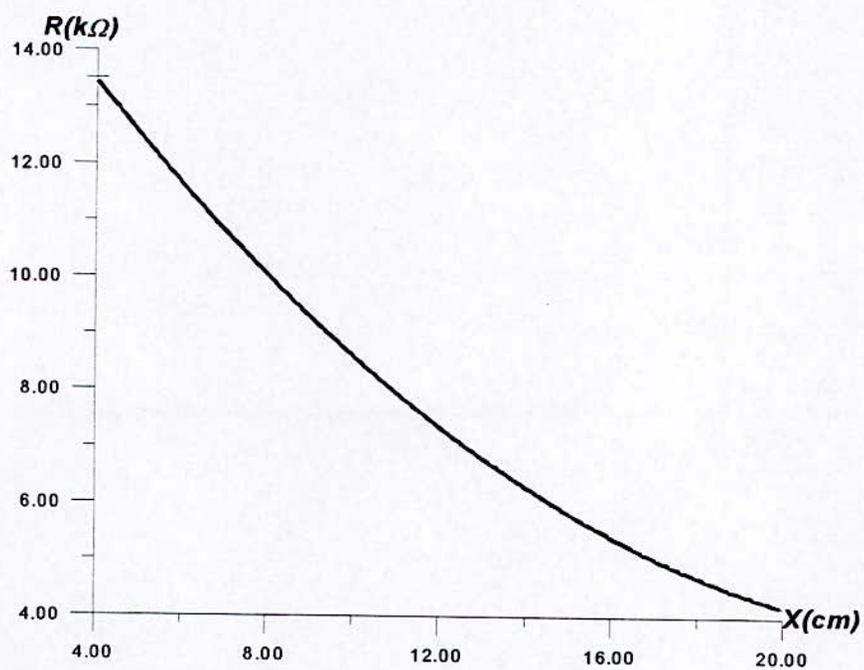
*Fig. 2.4- tension d'essais sur la résistivité élevée a la puissance 1/3 en fonction de la longueur d'arc.*



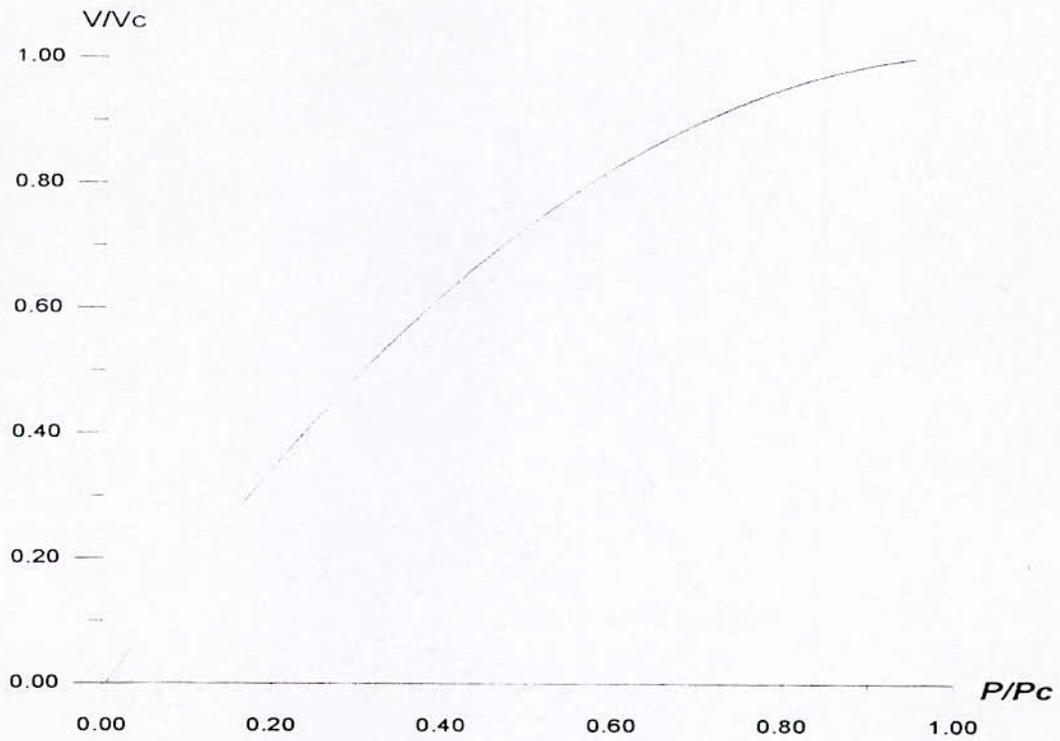
*Fig. 2.5 - Tension d'essai en fonction de la longueur d'arc.*



*Fig.2. 8 - Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc.*



*Fig.2. 9 - Caractéristiques de la résistance de la couche de pollution en fonction de la longueur d'arc.*



*Fig.2.8 - coefficient de sécurité en fonction du produit relatif.*

Les caractéristiques obtenues par simulation concordent avec celles expérimentales trouvées par Claverie et Porcheron ce qui justifie la validité du programme élaboré.

## 2.5. Conclusion:

Nous avons proposés dans ce chapitre un modèle mathématique qui décrit les mécanismes de développement d'un arc électrique le long d'une surface isolante polluée en ajoutant une capacité au modèle de Mekhaldi et Tegar [2].

Il est important de noter, que notre modèle prend en considération la résistivité et la répartition de la couche de pollution, en présentant la caractéristique de l'état de l'isolateur pollué par l'impédance  $Z_p(X)$ . Comme nous l'avons vu, cette caractéristique définit parfaitement le comportement de l'isolateur quelle que soit la distribution et la conductivité de sa couche de pollution. En effet, notre modèle permet de déterminer l'état critique, en calculant la tension de contournement, la longueur d'arc critique et le courant de fuite critique.

A partir de notre étude, nous constatons que :

- le coefficient de sécurité s'obtient en se basant sur l'interprétation de courant de fuite.
- notre modèle permet de simuler les différentes configurations de pollution et les différents cas de résistivités.
- en outre, il permet de déduire des informations concernant les paramètres électriques critiques de cet isolateur (la tension  $V_c$ , le courant  $I_c$  et la longueur d'arc maximale  $X_c$ .)

### 3. 1. Introduction:

Dans le but d'apprécier les mécanismes de contournement sous pollution nous avons effectué des essais sur un modèle plan de laboratoire. Ce modèle est similaire à celui de Clavier et Porcheron [1]. Un tel modèle a l'avantage de nous faciliter les observations et les mesures nécessaires pour l'analyse de ces mécanismes.

Les grandeurs considérées lors des essais sont, la tension appliquée, le courant de fuite, le déphasage entre eux et la longueur de l'arc électrique.

A partir des grandeurs expérimentales, notre modèle mathématique évalue les différents paramètres décrivant le comportement des surfaces isolantes polluées.

### 3. 2. Caractéristiques des couches polluantes naturelles:

Nous pourrions, à première vue, penser que le degré de pollution d'un isolateur peut être caractérisé par la résistivité (ou conductivité) superficielle de la couche polluante qui le recouvre.

Cependant, cette façon de faire supposerait implicitement que la couche polluante est uniformément répartie, ce qui n'est pas exactement évident pour la plupart des isolateurs pollués naturellement.

Pour tenir compte de la répartition et de résistivité de la couche de pollution, il est donc bien préférable de caractériser l'état de l'isolateur pollué par l'impédance caractéristique  $Z_p(X)$ . comme nous l'avons vu, cette fonction définit parfaitement le comportement de l'isolateur. En effet, elle permet de déterminer l'état critique, en calculant la tension de contournement, la longueur d'arc critique et le courant critique.

### 3. 3. Reproduction du modèle réel au laboratoire:

Pour établir la représentativité d'un essai artificiel, il sera bien préférable de comparer deux facteurs, la résistivité et la répartition de la couche de pollution correspondant au pollution artificielle et naturelle au lieu de se borner à des comparaisons de tensions de contournement qui ne peuvent, qu'à elles seules, garantir cette représentativité avec certitude.

Afin d'être en mesure de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est indispensable de savoir caractériser quantitativement la sévérité de la pollution de ce site.

En se référant, à titre d'exemple, à l'essai sous pollution saline artificielle, il est possible, en fait, de caractériser plus simplement et avec une meilleure précision la sévérité de la pollution du site considéré.

# chapitre III

## **Essais de laboratoire et exploitation du modèle mathématique**

En effet, à chaque site, nous pourrions donc faire correspondre une concentration de la solution saline que l'on exprimera, par exemple, en grammes de chlorure de sodium par litre de solution. La sévérité de la pollution sera ainsi caractérisée par la "salinité équivalente".

Cependant, la détermination de la sévérité d'un site telle qu'elle vient d'être définie consiste, en fait, à rechercher la concentration de la solution saline de l'essai artificiel qui donne, pour tous les différents types d'isolateurs, des impédances caractéristiques  $Z_p(X)$  qui soient identiques à celles que l'on obtient dans le site considéré.

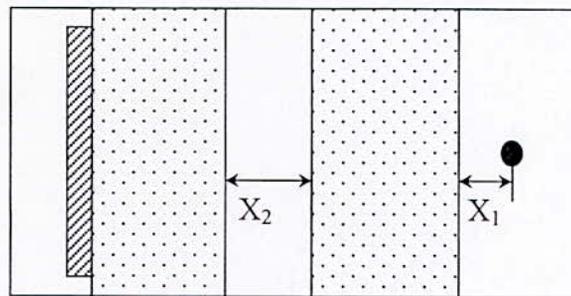
Compte tenu des propriétés des couches polluantes naturelles et artificielles d'une part, et de la représentativité de l'essai de laboratoire d'autre part, on peut assurer que l'identité des impédances  $Z_p(X)$  (propre à chaque type d'isolateur) est obtenue si l'on vérifie l'égalité des valeurs de  $Z_p(X)$  pour une seule valeur de  $X$ . Or, l'égalité des valeurs de  $Z_p(X)$  entraîne pour deux isolateurs identiques, alimentés sous la même tension, l'égalité des courants de fuite [39].

En pratique, la salinité équivalente d'un site sera déterminée de la manière suivante:

- Dans le site pollué, les courants de fuite maximaux sont mesurés sur deux ou trois types d'isolateurs, alimentés sous une tension voisine de leur tension normale d'utilisation.
- Des essais sont effectués au laboratoire sur des isolateurs de même type, toujours alimentés sous leur tension d'utilisation. Le courant de fuite est mesuré pour plusieurs concentrations de la solution pulvérisée.
- La salinité équivalente du site correspond à la concentration pour laquelle les courants de fuite sont voisins de ceux mesurés in situ.

### 3. 4. Modèle expérimental:

Afin de contourner la difficulté liée à la forme, souvent complexe, de l'isolateur, nous avons procédé au choix d'un modèle expérimental simple, semblable à ceux considérés notamment par P.Claverie et Y.Porcheron [1] et J.Danis [40]. Il est constitué d'une plaque en verre (500x500x5)mm<sup>3</sup>, ayant la propriété de résister à la chaleur, évitant ainsi toute explosion ou fissuration éventuelle. Cette plaque était munie de deux électrodes planes en aluminium, l'une circulaire mise à la haute tension et l'autre rectangulaire mise à la terre (fig.3. 2).



*Fig. 3.3- dispositif expérimental*

Pour la mesure du courant de fuite, nous avons inséré une résistance de  $100\Omega$  entre l'électrode rectangulaire et la terre. La mesure de la tension aux bornes de cette résistance sur oscilloscope (canal.1), est réalisée à l'aide d'un câble coaxial. De même, la tension d'alimentation relevée aux bornes du voltmètre est portée au même oscilloscope (canal.2) à travers une sonde. En visualisant simultanément le courant de fuite et la tension d'alimentation, nous sommes en mesure de relever le déphasage entre eux.

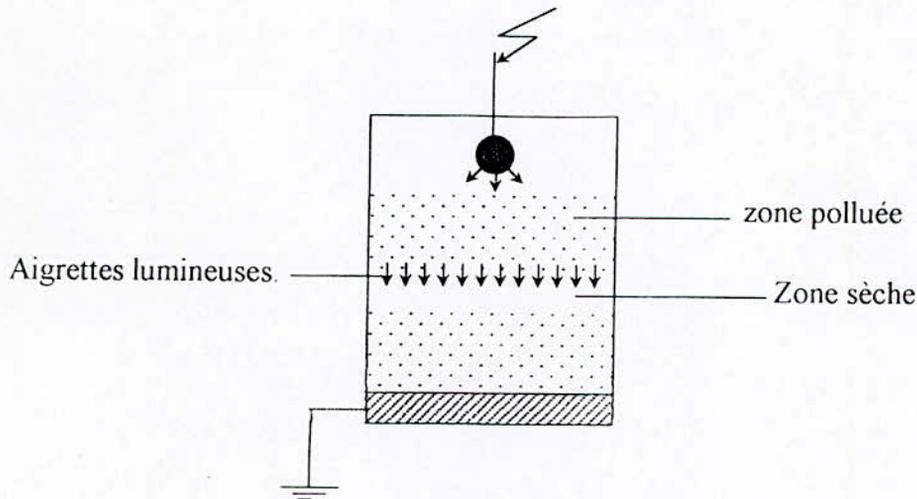
Afin d'éviter l'influence du champ électrique, qui pourrait introduire des parasites dans le signal du courant, la résistance a été introduite dans une boîte métallique (en aluminium) mise à la terre, formant ainsi un écran (le champ à l'intérieur étant nul).

Pour la protection de l'oscilloscope, contre les surtensions lors du contournement, deux diodes rapides ont été utilisées et montées en tête bêche.

### 3.7. Résultats obtenus et interprétations:

#### 3.7.1. Observation:

En augmentant progressivement la tension d'essais (environ  $2\text{kV/s}$ ) entre les électrodes de la plaque isolante, recouverte d'une mince couche électrolytique saline discontinue, un courant de fuite s'établit à travers l'électrolyte qui s'échauffe. la conductivité de l'électrolyte augmente avec la température et entraîne l'accroissement du courant de fuite. La densité de courant devient importante au voisinage de la zone sèche, la température s'élève. la tension aux bornes de l'électrolyte est pratiquement nulle, par conséquent, elle se retrouve reportée à la zone sèche. Quand cette tension atteint la tension d'application de l'effet couronne, les premières décharges apparaissent au niveau de la bordure de la première couche préétablie sous forme d'aigrettes lumineuses. Ainsi la nouvelle configuration du système d'électrodes (Fig.3.4), qui fait que le champ devienne très intense autour des aigrettes, favorise l'apparition des décharges au bord de la dite couche. Un claquage diélectrique se produit et un arc s'établit dans cette zone.



*Fig. 3.4- Représentation de la nouvelle configuration du système.*

A partir de ce stade, nous constatons l'évolution d'un arc qui développe en longueur en se déplaçant latéralement pour trouver une position plus stable.

Si, l'évaporation est très importante, l'apparition de ces arcs est fugitive et leur disparition a lieu quand la couche devient sèche.

### 3. 7. 2. Résultats obtenus:

En vue d'étudier le développement d'un arc électrique sur une surface isolante polluée, nous avons relevé, pour chaque niveau de tension, le courant de fuite, la longueur d'arc et le déphasage tension-courant.

Six paliers de tension ont été utilisés: 15, 21, 28, 32, 33 et 34 kV. Sachant que le dernier palier a été choisi loin de la tension de contournement pour éviter ainsi tout incident éventuel.

Lors des essais, la conductivité de la solution saline est de  $500\mu\text{s}/\text{cm}$ .

Les résultats expérimentaux sont présentés selon le tableau suivant :

U(KV)	15	21	28	32	33	34
I(mA)	0. 79	1. 6	3. 7	4. 5	6. 1	6. 8
X(cm)	1	2	4	5	6	6. 5
$\varphi$ (degré)	$-5^\circ$	$-5^\circ$	$-5^\circ$	$-5^\circ$	$-5^\circ$	$-5^\circ$

*Tableau .1- Résultats expérimentaux*

Pour l'exploitation des résultats expérimentaux, en utilisant notre modèle mathématique, nous avons procédé comme suit :

- Afin d'obtenir des caractéristiques [  $V(I)$  et  $V(X)$  ] théoriques confondues avec celles expérimentales avec un minimum possible d'erreur, nous avons déterminé les constantes caractéristiques  $k$  et  $n$  à travers logiciel dit EUREKA. L'erreur relative maximale commise lors de ce traitement est l'ordre de 10 %.

les valeurs des constantes caractéristiques ont été trouvées:

$$K = 453.91 \quad ; \quad n = 0.49$$

- L'ensemble de ces deux valeurs obtenues ainsi qu'une des deux caractéristiques théoriques (citées dans le point précédent) sont injectées dans le programme élaboré. Ainsi, nous avons pu calculer les valeurs caractérisant l'état critique et obtenir les différentes courbes décrivant les phénomènes engendrés par le contournement.

### 3.7.2.1 Valeurs critiques:

A fin de faire une étude comparative entre les valeurs critiques expérimentales et celles simulées, nous dressons le tableau suivant :

Valeur critiques	Résultats expérimentaux	Résultats théoriques
$V_c(KV)$	40	36
$I_c(mA)$	14	15
$X_c(cm)$	9	8.66

*Tableau. 2 - Caractéristiques de l'état critique.*

## 3.7.2.2. Caractéristiques obtenues :

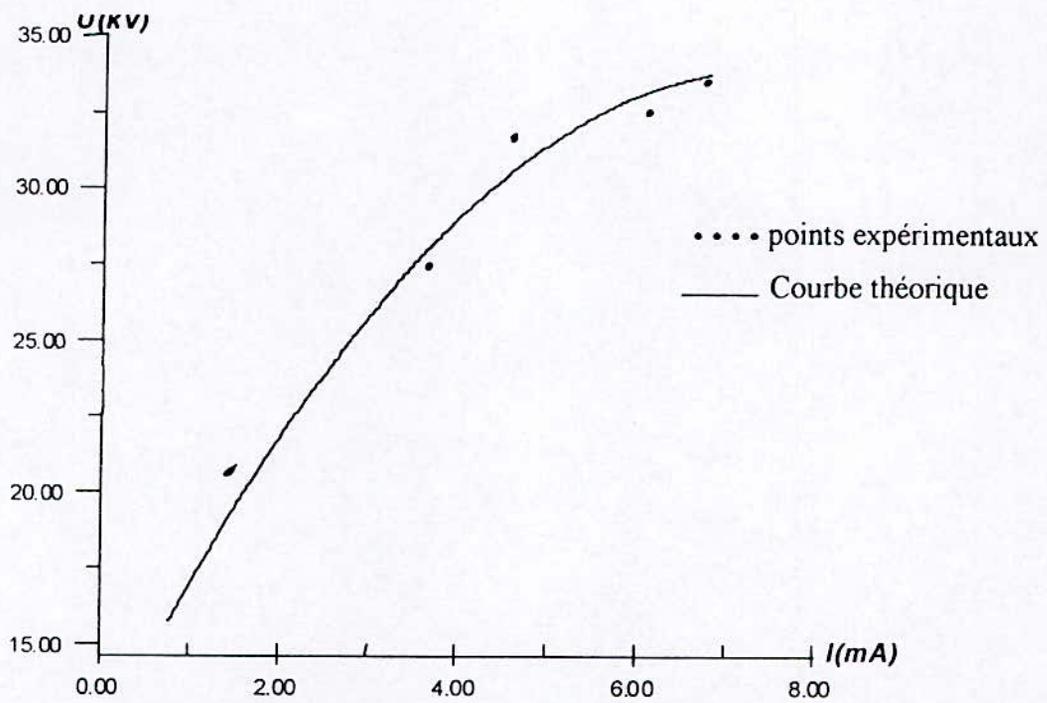


Fig. 3.5- tension d'essai en fonction du courant de fuite.

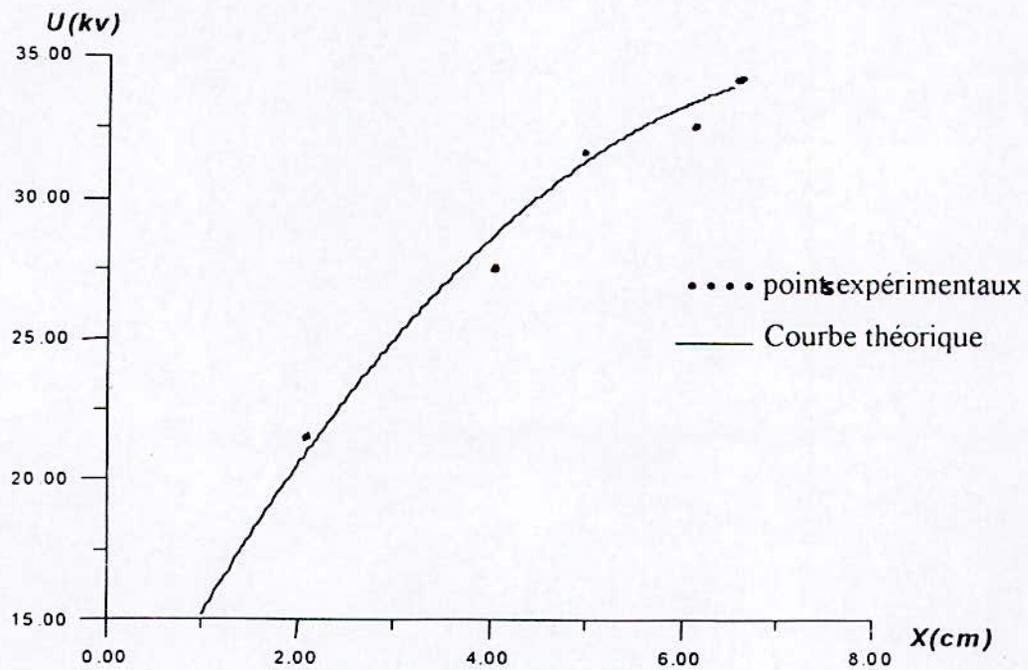
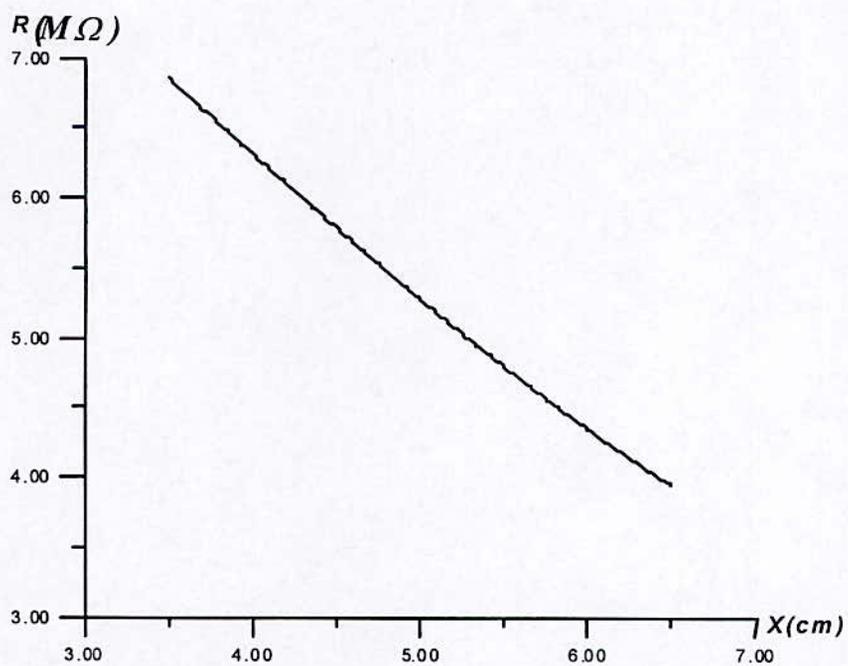
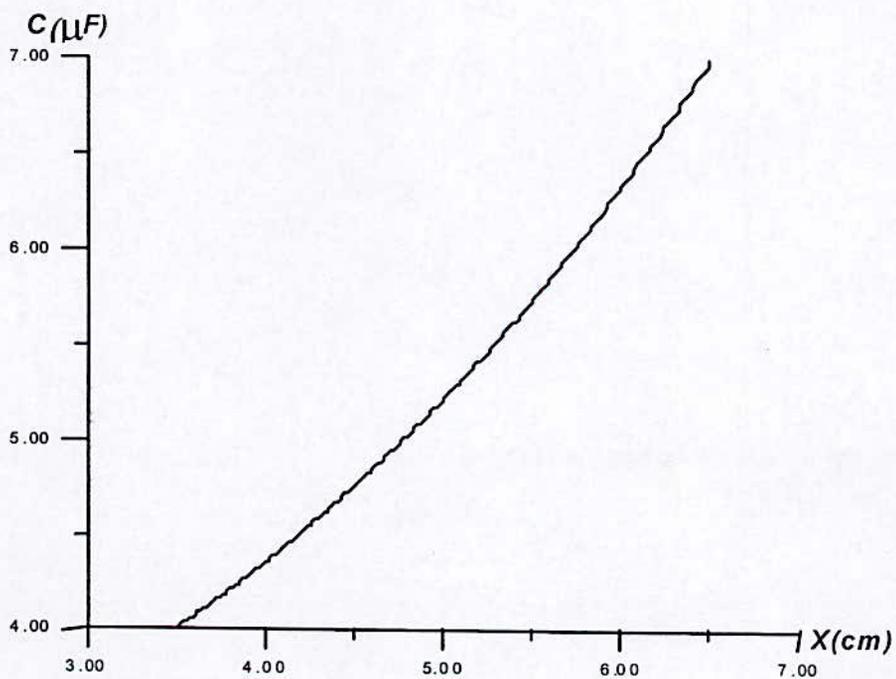


Fig. 3.6- Tension d'essai en fonction de la longueur d'arc.



*Fig. 3.7- résistance de couche polluante en fonction de la longueur d'arc x.*



*Fig. 3.8- Capacité de couche polluante en fonction de la longueur d'arc.*

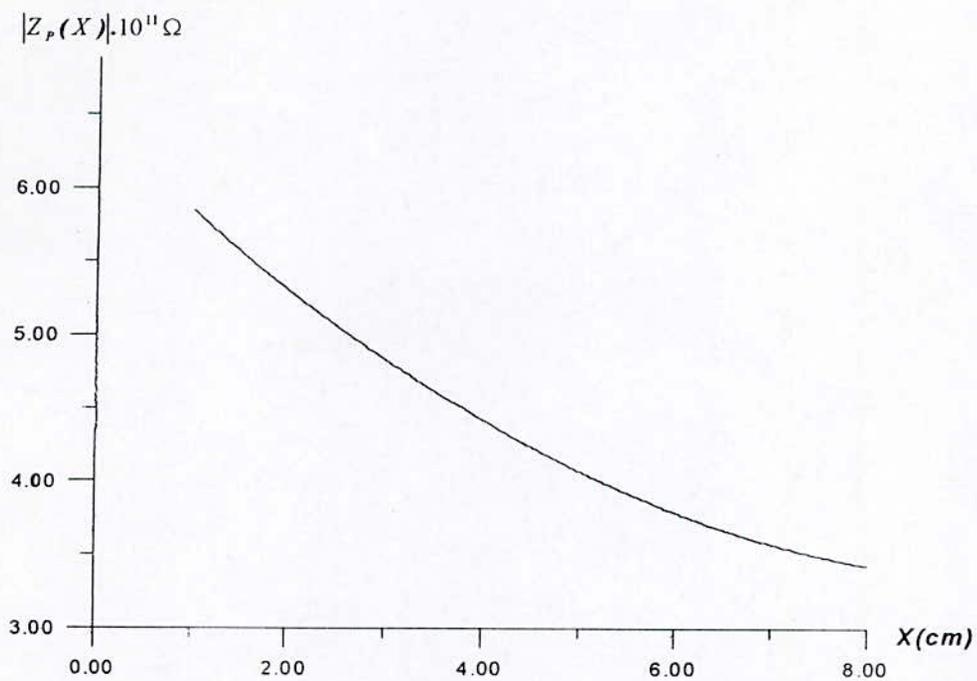


Fig.3.9- module de l'impédance de la couche polluante en fonction de la longueur d'arc.

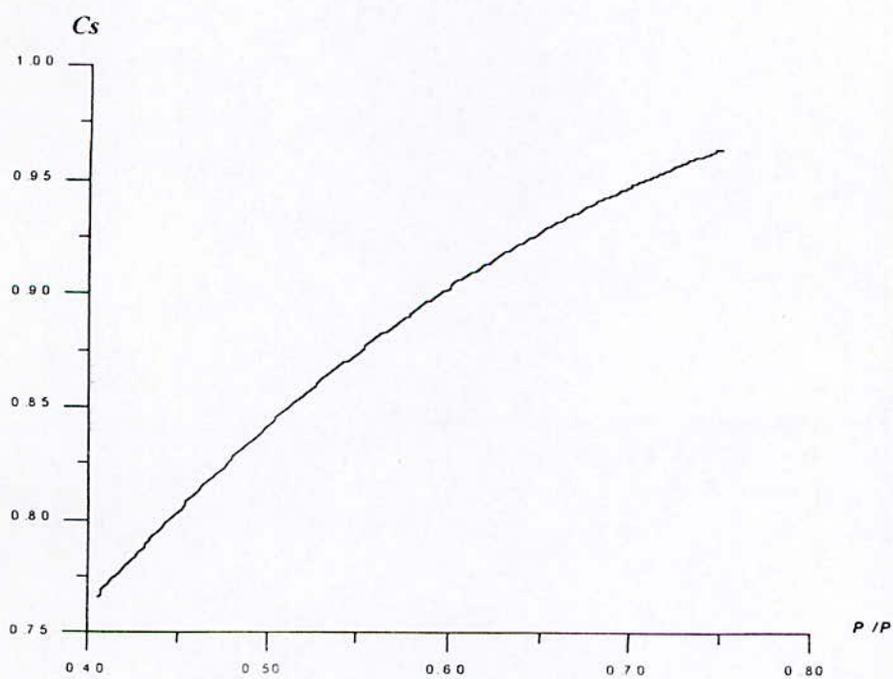


Fig. 3.10- Coefficient de sécurité en fonction du produit relatif.

### 3.7.3. Interprétations :

- Selon le tableau 2, nous pouvons conclure que les valeurs critiques expérimentales et celles théoriques se coïncident.
- La caractéristique tension d'alimentation en fonction du courant de fuite (fig.3.5), montre que l'augmentation de la tension entraîne l'augmentation du courant de fuite. En outre, nous constatons un accord entre la caractéristique simulée et celle expérimentale.
- Concernant la caractéristique tension d'alimentation en fonction de la longueur d'arc (fig.3.6) ; la longueur d'arc augmente au fur et à mesure que la tension croît.
- La Caractéristique résistance de la couche polluante  $R_p(X)$  en fonction de la longueur d'arc et décroissante (fig. 3.7), ceci paraît évident car l'allongement de cet arc court-circuite une partie de la couche polluante.
- La Caractéristique de la figure.3.8 montre que l'allongement de l'arc provoque un accroissement de la capacité de couche polluante car, la propagation de l'arc électrique latéralement vers l'électrode de terre diminue la distance entre eux et par conséquent la capacité augmente.
- Selon la caractéristique donnant le module de l'impédance  $Z_p(x)$  en fonction de la longueur d'arc, nous remarquons que tout allongement de la longueur de l'arc provoque une diminution du module de l'impédance de la couche polluante, car ce module est liée directement à la résistance quand le déphasage est constant.
- Nous avons obtenu la caractéristique donnant le coefficient de sécurité en fonction de la longueur d'arc relative est la représentées à la figure 3.10.

L'augmentation de la longueur d'arc relative provoque l'accroissement de coefficient de sécurité.

En effet, pour un type d'isolateur d'une zone quelconque, la caractéristique donnant le coefficient de sécurité en fonction du produit relatif, sera déterminée par des essais au laboratoire, en utilisant la méthode du brouillard salin, par exemple. Pour cela, on mesurera pour une valeur de la salinité de la solution, la tension de contournement et le courant de fuite maximal  $I$ , pour différents paliers de tension.

A partir de cette caractéristique, en mesurant en permanence le courant de fuite d'un isolateur identique à celui essayé au laboratoire et en service dans l'ouvrage concerné et en reportant simplement à la caractéristique précédente, il sera possible à tout moment de connaître la marge de sécurité en évaluant l'écart séparant la tension appliquée de la tension de contournement, sans qu'il soit nécessaire de connaître le degré de pollution.

### 3. 8. Conclusion:

Il ressort de notre travail présenté dans ce chapitre, que :

- Les caractéristiques  $V(X)$  et  $V(I)$  simulées sont approximativement confondues avec celles expérimentales.
- Les valeurs critique (la tension  $V_c$ , le courant  $I_c$ , et la longueur d'arc  $X_c$ ) expérimentales et théoriques sont pratiquement identiques.

En outre, nous avons obtenu, à partir du modèle mathématique, les caractéristiques:

- L'impédance, la résistance et la capacité représentant la couche polluante en fonction de la longueur d'arc.
  - La courbe du coefficient de sécurité en fonction du produit relatif.
-

# Conclusion Générale

### Conclusion générale :

Cette étude présente un modèle mathématique plus général que ceux présentés par Clavier et Porcheron [1] d'une part, et Mékhaldi et Tegar [2] d'autre part. L'analyse du mécanisme de contournement des isolateurs pollués montre que leur comportement est déterminé par la fonction caractéristique de la couche polluante  $Z_p(x)$  qui représente l'impédance en série avec l'arc de longueur  $X$ . Pour tenir compte de l'effet capacitif des couches polluantes, cette impédance est constituée d'une résistance en parallèle avec une capacité. Par ailleurs, la plupart des chercheurs [1-2,40] ont représenté dans leurs modèles, la couche de pollution par une résistance.

Notre modèle mathématique, nous a permis de faire une estimation préliminaire des contraintes critiques, de courant de fuite critique et de longueur d'arc critique ; rationaliser les résultats expérimentaux ; mieux décrire les mécanismes engendrant le contournement des surfaces isolantes polluées ; généraliser les résultats expérimentaux. Il n'est absolument pas destiné à se substituer aux essais, qui demeurent indispensables pour l'obtention des données réelles.

En utilisant notre modèle mathématique et en exploitant les résultats expérimentaux, nous avons remarqué la concordance entre les caractéristiques expérimentales et celles simulées. Ainsi nous avons pu confirmer la validité de notre modèle. Par conséquent nous pouvons établir une généralisation pour d'autres isolateurs ayant différentes répartitions et différentes résistivités de couche de pollution.

L'étude du processus de contournement sous pollution a conduit à la proposition d'un moyen de surveillance du degré de pollution des installations électriques basé sur l'interprétation du courant de fuite. En effet, nous avons pu établir une caractéristique très importante pour la surveillance de degré de pollution des isolateurs qui est le coefficient de sécurité. Ce dernier nous permet d'intervenir avant l'avènement du contournement, et cela soit en lavant ou en graissant les isolateurs concernés.

Enfin, il est souhaitable que cette étude soit poursuivie pour une modélisation plus complète en étudiant par exemple, les phénomènes de contournement dans les cas d'arcs multiples, en série et en parallèle sur les surfaces polluées.

# Sommaire

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1 :Synthèse Bibliographique.</b>	
1. Introduction :	3
1.1. Partie 1 :Phénomène de pollution.	3
1.1.1. Formation de couche polluante	3
1.1.2. Différents types de pollution	4
1.1.3. Conséquence de la pollution	5
1.1.4. Degrés de pollution	7
1.1.5. Méthodes d'essais sous pollution	9
1.1.6. Mesures actuelles sur le choix des isolateurs	10
1.1.7. Technique de lutte contre la pollution	11
1.1.8. Domaines de recherche	13
a)- Conductivité du dépôt polluant	13
b)- Condition météorologiques	13
c)- Nature de la pollution	14
1.2. Partie2 : Modèles du contournement des isolateurs sous pollution	14
1.2.1. Modèles en courant continu	14
1.2.2. Modèles à résistance de pollution Uniforme	16
1.2.3. Critères de propagation de l'arc	16
1.2.4. Critères multiples	17
1.2.5. Raffinements des modèles en courant continu	17
a)- Modèles de la couche mixte	17
b)- Modèle du disque circulaire	19
c)- Chute de tension aux électrodes de l'arc	22
d)- Isolateurs de grand diamètre	22
f)- Effet de la température	23
1.2.6. Modèles en courant alternatif	23
1.2.6.1. Modèles théoriques	23
a)- Modèles de réalumage par rupture énergétique	24
b)- Modèles de réalumage par rupture diélectrique	25
1.2.6.2. Modèles expérimentaux	25
1.2.7. Conclusion.	27
<b>Chapitre 2 :Modèle Mathématique.</b>	
2.1.Introduction	28
2.2.Mise en équation	28
2.2.1.Etablissement des équations fondamentales	28
2.2.2.Condition limite de maintien de l'arc électrique en courant alternatif	30
2.2.3.Tension appliquée en fonction de la pollution	31
2.2.4.Etat critique et Contournement	32
Premier Cas : déphasage $\varphi(X)$ nul.	33
Deuxième Cas : déphasage constant	33
Troisième Cas : déphasage $\varphi(X)$ variable	34

2.2.5. Corrélation entre la tension appliqué et le courant de fuite .....	34
2.2.6. Détermination de l'impédance de la couche polluante .....	35
2.3. simulation numérique .....	36
2.3.1. Algorithme de simulation .....	37
2.4. Validation .....	38
2.4.1. Résultats obtenus par simulation .....	38
2.5. Conclusion .....	42

### **Chapitre 3 :Essais de laboratoire et Exploitation du Modèle Mathématique.**

3.1. Introduction .....	43
3. 2. Caractéristiques des couches polluantes naturelles .....	43
1. 3. Reproduction du modèle réel au laboratoire .....	43
2. 4. Modèle expérimental .....	44
3. 4. Equipement du laboratoire de L'école Nationale Polytechniques .....	46
3.5. Méthode d'essai .....	47
3.6. Mode opératoire .....	47
3.7. Résultats obtenus et interprétations .....	48
3. 7. 1. Observation .....	48
3. 7. 2. Résultats obtenus .....	49
3.7.2.1 valeurs critiques .....	50
3.7.2.2. Caractéristiques obtenues .....	51
3.7.3. Interprétation .....	54
3. 8. Conclusion .....	55
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>56</b>

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] P.Claverie, Y.Porcheron.-« les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées », RGE, Tome 82, N° 3, mars 1973, p.166-194.
- [2] M-Teguar. A-Mekhaldi " Algorithmme for pollution flashover calculations " Archives of Electrical Engineering, VOL.XLL, N°4, P.1662-1996.
- [3] Matei Barnea, Pascu Ursu, «pollution et protection de l'atmosphère », Edition Eyrolles, Paris 1974.
- [4] V.M.Rutsky « Prediction of discharge characteristics of external high-voltage insulation near industrial enterprises, polluting the atmosphere », 9<sup>e</sup> international symposium on high voltage engineering, rapport 3247 , Autriche, 28 Aout-1<sup>e</sup> Septembre 1995.
- [5] A.Djouadi, H.Melouk, « Problème de la pollution marine des isolateurs de haute tension en Algérie », PFE, ENP 1975.
- [6] J.Keller-Jacobsen, Aa. Pedersen, J.K. Rasmussen, A. Henriksen, C. Lindqvist, S. Smedsfelt « Essais au laboratoire et en plein air pour dimensionner correctement les isolateurs exposés à la pollution saline », CIGRE, rapport 33-11, 1978.
- [7] M. Dobarzik, «formes de décharges glissantes sous tension de choc 1.2/50  $\mu$ s sur les surfaces de diélectriques solides polluées par le sable du Sahara » thèse de docteur-ingénieur, ENP, Alger, juin 1975.
- [8] A. Mekhaldi.-«Modèle de contournement d'isolateurs pollués dans des conditions désertiques du Sahara algérien », Thèse de magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire Haute Tension, Ecole nationale polytechnique d'Alger, juin 1990.
- [9] A. Béréal.- «les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport d'énergie électrique » cours de post-graduation, Département de Génie Electrique, Laboratoire haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1992.
- [10] M. Khalifa, M. Abou-Seada, H. el-ghazaly.-« Laboratory simulation of desert pollution flashover of high voltage insulators », Forth International Symposium of High voltage Engeneering, Athens, Greece, 5-9 September 1983, rapport N°. 46-03.
- [11] C. Huraux, M.A.Aliouchene, M. Izzularab.- «isolateurs pollués : quelques modèles récents et critères de contournement associés », Laboratoire Génie Electrique (UA 304), Université Paul Sabatier, Toulouse 1985.
- [12] C. Huraux, A.M. Rahal .- « Le contournement des isolateurs hauts tension approchée à l'aide d'un modèle de laboratoire », RGE, Tome 84, N°.6, juin 1975, P.425-429.
-

- [14] W. Heise, M.P.Verma, H.Niklasch, H. Lpken, H.Schreiber, g.f.luxa.- « Critères de contournement par pollution et ses applications pour le dimensionnement et le contrôle de l'isolation », CIGRE, session, Paris France , 30 août – 7 septembre 1978, rapport N°. 33-09.
- [15] W.Heise, G.F.Luxa, G.Revery, M.P. Verma,- «Estimation de la méthode d'essai sous pollution artificielle par couche solide. », CIGRE, Rapport 33-09 1972.
- [16] R.Bosignoli, E. Gomes Jr « Pollution test under natural wetting conditions » 7<sup>e</sup> International symposium on high voltage engineering, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991, rapport 44-12.
- [17] CEI-60-1.- « techniques des essais à haute tension première partie, définitions et prescriptions générales relatives aux essais », première édition, 1973, p.1-43.
- [18] A. Cimador, M.cojan, P.Hautefeuille, M. Moreau.- «méthode de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées », CIGRE, session, Paris, France, 30 août – 7 septembre 1978, rapport N°.33-04.
- [19] B.F.Hampton.- « Flashover mechanism of polluted insulation », Proc. IEE, vol.111,N° 5, May 1964, p.985- 990.
- [20] A. Cimador, S.Vitet, -« La pollution des isolateurs », EDF-Epure N°27-juillet 1990.
- [21] C.H.A. Ely, P.J.Lambeth, J.S.T. Looms, D.A.Swift, C.E.G.B « Contournement des polymères humides et pollués : l'ailette BOOSTER » CIGRE, Rapport 15-02, 1978.
- [22] M.A.B El-koshairy, El Sayed A.H Aly, A.E Abdullah, Ahmed M. El Arbaty, E.A.A Mansour, S. El Dbeiky, « Comportement des isolateurs en résine époxy pour lignes de transport à haute tension dans les conditions de pollution rencontrées dans le desert »,CIGRE, rapport 15-12,1978.
- [23] G.Neumarker, « Verschmutzungszustand und Kriechweglänge » Deutche Elektrotechnik, vol.4,1958, p.135-136.
- [24] A.Boubakeur, M.E Zaim, «pollution des isolateurs de haute tension dans les conditions sahariennes », PFE, ENP juin 1975.
- [25] R. Kostaluk, W.Czaplak, R. Kucharski- «mesures de pollution, Essais d'isolateurs pollués, choix des isolateurs », CIGRE, rapport 33-07, 1978.
- [26] H.Boehme, F.Obénaus.- «essais de contournement sur des isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'un modèle d'amorçage pour courant rampant », CIGRE, 1966, N°.407.
- [27] S.Hesketh, « General criterion for the prédiction of pollution flashover » Proc. IEE, vol.114, N°4, avril 1967, p.531-532.
- [28] H. Nacke. « Stabilitat der fremdschichtentladungen und theories des fremdschichtubershlags », ETZ-A, N°.16, 1966, p.577-585.
-

- [29] F.A.L.M. Rizk. – « Analysis of Dielectric Recovery with Reference to Dry-Zone Arc on polluted insulators », IEEE Conf. Paper, n°71 C 134 PWR, Winter Power Meeting, New York, janvier/février 1971.
- [30] T.C.Cheng, C.T.Wu, A.Rodriguez-Penz « Contamination flashover of HVDC insulators », Table 3-13, final report, prepared for electric power research institute (EPRI), EL-2016 , Aug. 1981.
- [31] H.H. Woodson, A.J.Mc.Elroy.- « Insulators with Contaminated Surfaces Part : Modeling of discharge Mechanisms », IEEE Trans., vol. 324,1971, p.469-489.
- [32] R.Wilkins.-« Flashover voltage of high voltage insulators with uniforme surface films », Proc. IEE, vol.116, N°3, Mars 1969, p.457-465.
- [33] A. S. Maikopar.- « The Open Small Current Arc », Elektrichestvo, n°2, 1965, p.22-25.
- [34] O. Mayr. –« Beitrag zur theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens »,Arch. F. Electrotechnik, vol 37, 1943, p.588-608.
- [35] T.E.Browne Jr.- « A Study of AC Arc Behavior Near Current Zero by means of Mathematical Models », AIEE Trans, vol67,.1948, p.141-153.
- [36] H. Maecker. –« Uber die Charateristiken Zylindrischer Bogen », Zeitschrift fur Physik, vol. 157,1959, p.1-29.
- [37] JJ. Hurley, G. J., Limbourn.- Correlation of Service Performance of Insulators and Lightning Arresters under polluted conditions with Test Results with a view to Examining the Validity of Present Criteria for Insulator Selection and Testing », CIGRE , SC. 33,september 1969.
- [38] P. Claverie, -« Predetermination of the Behaviour of polluted Insulators », IEEE Trans., vol. PAS-92, n°4, juillet/aout 1971, p. 1902-1908.
- [39] D. Namane –« Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur Haute Tension », Thèse de Magister, Dépt. G. Elect. Lab. H. T., ENP, Alger 1998.
- [40] J. Danis, " A stochastic pollution flashover model" , 4<sup>e</sup> international symposium on highvoltage engeering, rapport 46-12, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
-