

P0007/05B

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

## Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie électrique

Laboratoire de Haute Tension

Mémoire de projet de fin d'études d'ingénieur d'état en électrotechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Thème

---

# Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle

---

Rapporteurs: Mr. A. BOUBAKEUR  
Mr. M. TEGUAR

Professeur, ENP  
Maître de Conférences, ENP

Présidente : M<sup>me</sup>. D. NAMANE

Chargée de cours, ENP

Examineurs : Mr. A. MEKHALDI  
Mr. S. BOUAZABIA

Maître de Conférences, ENP  
Chargée de cours, USTHB

Présenté par :

Malik BENAKOUCHE

Rabah TIMGHELLETTE

Promotion juin 2005

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension du Département de génie Electrique de l'Ecole Nationale Polytechnique, sous la Direction Scientifique de Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur M. TEGUAR, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre très sincère reconnaissance pour leurs précieuses directives, leur très grande disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Nous remercions, Monsieur A. MEKHALDI, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique pour ses directives, ses conseils combien utiles.

Nous vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier : M<sup>me</sup> D. NAMANE et Mr S. BOUAZABIA.

Nous tenons à remercier nos parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux nous ne pouvons traverser ces longues années d'études et de travail.

Enfin, nous remercions tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

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

*A mes très chers frères et mes sœurs.*

*A tous mes amis.*

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

*A vous.*

*BENAKOUCHE Malik*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, grands parents ma petite et grande famille ; Hassina, Nadia, Djamel, Amar, Farinas, Ouahab, Youcef, Omar, Ferroudja...*

*A mes frères et mes sœurs ; Chafik, Massinissa, Mohammed, Tassadit, Kahina que j'aime beaucoup.*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime : Zahir, Daou, Belaid, Houcine, Yazid, Mouhand, Farid, Mourad, Karim, Malik, Djedjiga, Nabila, Djouhar, Fayçal....*

*Avec qui j'ai partagé vraiment des meilleurs moments d'aventure, de risque et de bonheur, et qui hantent mon esprit, que je ne peux pas oublier....*

*A vous.*

TIMGHELLETTE Rabah

**Résumé :**

Dans ce travail, nous analysons les résultats expérimentaux concernant l'influence de la pollution discontinue (présence de bandes propres) sur le comportement de surfaces isolantes soumises à divers paramètres électrogéométriques. Pour chaque configuration de la pollution, des essais ont été effectués sur un modèle d'isolateur au laboratoire sous tension impulsionnelle dans le but de déterminer la tension moyenne de contournement, l'influence de la largeur de la pollution, la polarité, et le temps entre deux impulsions successives. De même on a procédé à la détermination des différentes caractéristiques du champ électrique sur la plaque.

**Mot clés :** Isolateur, pollution, champ électrique, tension impulsionnelle, contournement.

**Abstract:**

In this work, we analyze the experimental results concerning the Influence of discontinuous pollution (presence of clean bands) on the behaviour of insulating surfaces subjected to various parameters electrogeometric. For each configuration of pollution, tests were carried out on a model of insulator at the laboratory under impulse tension with an aim of determining the average tension of skirting, the influence of the width of pollution, the polarity, and time between two successive impulses. In the same way one proceeded to the determination of the various characteristics of the electric field on the plate.

**Key word:** Insulator, pollution, electric field, impulse tension, skirting.

**ملخص :**

نحلل في هذا العمل النتائج التجريبية التي تخص تأثير التلوث المتقطع (وجود أشرطة نظيفة) على تصرف مساحات عازلة موضوعة تحت عوامل كهربائية مختلفة. لكل نموذج من التلوث تم إجراء عدة تجارب على نوع من العوازل في المختبر تحت تأثير توتر نبضي بهدف إيجاد التوتر المتوسط الاحاطي، تأثير عرض التلوث، القطبية والزمن بين نبضتين. وبالمثل قمنا بتحديد مختلف مميزات الحقل الكهربائي على اللوحة.

**الكلمات المفتاحية :** عازل، تلوث، حقل كهربائي، توتر نبضي، إحاطة.

# SOMMAIRE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## INTRODUCTION GENERALE

1

## CHAPETRE I : ISOLATEURS DE HAUTE TENSION

### I.1. INTRODUCTION

3

### I.2. DEFINITIONS

3

I.2.1. Isolement

3

I.2.2. Isolation

3

I.2.3. Gradation de l'isolement

4

I.2.4. Décharge disruptive

4

I.2.5. Contournement

4

I.2.6. Tension de contournement

5

I.2.7. Tension de tenue (Tension d'essai)

5

I.2.8. Courant de fuite

7

I.2.9. Courant de fuite critique

7

I.2.10. Longueur critique de l'arc

7

I.2.11. Conductance superficielle

7

I.2.12. Contrainte de contournement

7

### I.3. PRINCIPAUX TYPES D'ISOLATEURS ET LEUR CONSTITUTION

8

I.3.1. Fonctionnement et constitution d'un isolateur

8

I.3.2. Matériaux utilisés dans la constitution des isolateurs

9

I.3.3. Principaux types d'isolateurs

10

I.3.3.1. Isolateurs de type rigide

10

I.3.3.2. Isolateurs à capot et tige

11

I.3.3.3. Isolateur à long fût en porcelaine

14

I.3.3.4. Chaînes d'isolateurs

15

### I.4. CONCLUSION

16

# CHAPITRE II : POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION



<b>II.1. INTRODUCTION</b>	17
<b>II.2. SOURCE DE POLLUTION</b>	17
II.2.1 pollution naturelle	17
II.2.1.1. pollution marine	17
II.2.1.2. Pollution désertique	18
II.2.1.3. Autres sources de Pollution	18
II.2.2. Pollution industrielle	18
II.2.3. Pollution mixte	19
<b>II .3. FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE DE POLLUTION</b>	19
II.3.1. La non-uniformité longitudinale par groupe	19
II.3.2. La non- uniformité transversale	20
II.3.3. La non-uniformité longitudinale périodique	20
<b>II.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION</b>	20
II.4.1. Arc non localisé	20
II.4.2. Arc permanent	21
II.4.3. contournement des isolateurs	21
Étape 1 : Dépôt de la pollution	21
Étape 2 : Humidification de la pollution	22
Étape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs	22
Étape 4 : Comportement des arcs	23
<b>II.5. MESURES DE LA SEVERITE D'UN SITE</b>	24
II.5. 1. Classification de la sévérité des couches polluantes	24
II.5.2. Méthodes de mesure de la sévérité de pollution	25
II.5. 2. 1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)	25
II.5. 2. 2. Conductance superficielle	26
II.5. 2. 3. Courant de fuite de la plus forte crête ( $I_{fc}$ )	26
II.5. 2. 4. Comptage d'impulsions	26
II.5. 2. 5. Contrainte de contournement	27

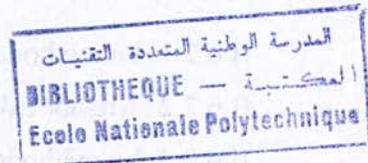
II.5. 2. 6. Mesure de la pollution de l'air	27
II.5. 2. 7. Mesures optiques	27
II.5. 2. 8. Densité de dépôt non soluble	28
<b>II.6.METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION</b>	28
II.6.1. Essais sous pollution naturelle	28
II.6.2.Essais sous pollution artificielle	28
II.6.2.1. La méthode de la couche solide	29
II.6.2.2. Méthode du brouillard salin	29
II.6.2.3. La méthode de pollution liquide [Gary]	29
II.6.3.Analyse des différentes méthodes d'essais artificiels	30
<b>II.7. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION</b>	30
II.7.1. Allongement de la ligne fuite	31
II.7.2. Isolateurs plats	31
II.7.3. Graissage périodique	32
II.7.4. Revêtement silicones	32
II.7.5. Les isolateurs composites	32
II.7.6. Nettoyage des isolateurs	32
<b>II.8.CONCLUSION</b>	33

## **CHAPITRE III : MODELES D'ISOLATEURS POLLUEES**

<b>III.1. INTRODUCTION</b>	34
<b>III.2. PRINCIPAUX MODELES</b>	34
III.2.1. Modèle de J.Danis	34
III.2.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh	36
III.2.3. Modèle P.Claverie et Y.Porcheron	38
III.2.4. Modèle de D. Namane	38
III.2.5. Modèle de Woodson et Mc Elroy	40
III.2.6. Modèle d'Alston et Zoledziowski	41
III.2.7. Modèle de Wilkins	41
<b>III.3. CONCLUSION</b>	42

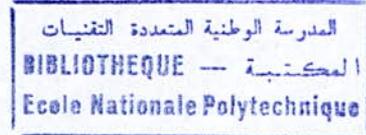
## CHAPITRE IV : STATION D'ESSAIS AU LABORATOIRE DE HAUTE TENSION DE L'ENP

<b>IV.1.INTRODUCTION</b>	43
<b>IV.2.L'EQUIPEMENT DE LA STATION DE CHOC DU LABORATOIRE DE L'ENP</b>	43
IV.2.1. Générateur de choc de l'ENP	43
IV.2.1.1. Description	43
IV.2.1.2. Principe de fonctionnement	44
IV.2.1.3. Schéma multiplicateur de Marx	46
IV.2.1.4 Forme d'onde impulsionnelle	47
IV.2.1.5. les différents couplages	48
IV.2.2. Diviseur de tension résistif	49
IV.2.3. Oscilloscope et Voltmètre de choc	49
IV.2.3.1. oscilloscope de choc	49
IV.2.3.2. Voltmètre de Crète	50
IV.2.4. Eclateur à sphères	50
<b>IV.3. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE MOYENNE <math>U_{50\%}</math></b>	51
<b>IV.4. CLASSIFICATION DES ESSAIS DE HAUTE TENSION</b>	51
<b>IV.5. METHODE MONTEES ET DESCENTES (Up and Down)</b>	52
IV.5.1. Méthode Up and Down selon DIXON et MOOD	52
IV.5.1.1. Détermination de $U_{50\%}$ et $\sigma$	52
IV.5.1.2. Intervalle de confiance	53
IV.5.2. Méthode Up and Down élargie	53
<b>IV.6.CONDITIONS ATMOSPHERIQUES</b>	53
IV.6.1. Atmosphere normalisé de référence	54
IV.6.2. Facteurs de correction atmosphériques	54
IV.6.3. Facteur de correction de densité de l'air	54
IV.6.4. Facteur de correction de l'humidité	55
<b>IV.7. CONCLUSION</b>	55



## CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

<b>V.1.INTRODUCTION</b>	56
<b>V.2.MODELE OPERATOIRE</b>	56
V.2.1.modèle expérimental	56
V.2.2.préparation du modèle	58
V.2.3.procéde d'essais	58
V.2.3.1.mesure de la tension de contournement	58
V.2.3.2. Résultats et interprétations	58
V.2.3.2.1.Observations	58
V.2.3.2.2.Tension $U_{50\%}$	59
V.2.3.2.2.1.Influence de la largeur des couches polluantes	66
V.2.3.2.2.2.Influence de temps entre deux chocs	67
V.2.3.2.2.3.Influence de la polarité	67
V.2.3.3.Calcul du champ électrique	70
V.2.3.3.1.Interprétation des résultats	70
V.2.3.3.1.1.Repartition du champ électrique sur la plaque	70
V.2.3.3.1.2.La variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale	77
<b>V.3.CONCLUSION</b>	85
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	86



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique forment la colonne vertébrale de l'économie d'un état industriel moderne. Avec la progression de l'industrialisation, naissent des exigences de plus en plus élevées concernant la mise à disposition de cette énergie. Pour des raisons économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement par des lignes aériennes. Leur fiabilité dépend donc considérablement du comportement mécanique, électrique et diélectrique des différents composants de ces lignes. Parmi ces composants, on note le rôle primordial que jouent les isolateurs. Leur choix est donc de la plus haute importance.

L'isolement des réseaux électriques est réalisé à l'aide des chaînes d'isolateurs pour maintenir les conducteurs à une distance suffisante de la masse pour éviter tout risque de contournement.

Les isolateurs ou les chaînes d'isolateurs placés sur des pylônes ne tardent pas à se recouvrir de divers types de pollution. Cette pollution est due aux particules emportées par la fumée éjectée par les véhicules et les usines (pollution industrielle), aux particules salines dans les régions situées au bord de la mer (pollution marine) et aux particules de sable dans les régions désertiques (pollution désertiques) [DOB 72]. Ces particules, souvent constituées d'une combinaison de plusieurs types de pollution (pollution mixte), portées par les vents et déposées sur les isolateurs peuvent s'accumuler sur une longue période.

La pollution en état sec n'engendre pas une dégradation de la rigidité diélectrique. Cependant, quand elle est humide, elle provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la naissance d'un courant de fuite, qui par effet Joule chauffe la couche de pollution qui sèche progressivement [SAI 92]. La répartition du potentiel entre électrodes est changée. Ainsi, une partie importante de la tension appliquée se trouve rapportée sur la bande sèche engendrant un claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique, si le champ local dépasse un certain seuil. Dans certaines conditions, cette décharge peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total.

Pendant son fonctionnement, un système d'isolation peut subir des surtensions accidentelles. Celles-ci sont d'origine atmosphérique (la foudre) ou de manoeuvre (ouverture d'un disjoncteur). Cependant, comme il est difficile de reproduire ces formes d'ondes au

laboratoire pour tester et dimensionner l'appareillage, on a recours à des formes simples – bi exponentielle – produite par des générateurs d'impulsions types multiplicateurs de Marx [DOB 72, GUE 04].

Le présent travail consiste à mettre en évidence l'effet de la pollution discontinue sur le comportement d'un modèle expérimental, sous tension impulsionnelle. Le modèle de laboratoire est soumis à une répartition de la pollution discontinue reproduisant l'état de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L installé dans la région électrique de Hassi-R'mel au Sahara Algérien [MEK 90, MEK 96]. Ce modèle est soumis à différentes contraintes électrogéométriques à savoir la longueur de la pollution en papier aluminium, la polarité de l'électrode active, la tension appliquée et le temps entre deux impulsions successives. Notre travail comporte cinq chapitres distincts.

Nous entamons le premier chapitre, par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension.

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

Nous citons dans le troisième chapitre, les principaux modèles ainsi que les critères de propagation des décharges électriques et le mécanisme des décharges électriques.

L'équipement de la station d'essais de l'ENP, ainsi que générateur de choc et son principe de fonctionnement sont représentés dans le quatrième chapitre. Les différentes méthodes de mesures y sont également citées.

La partie expérimentale est présentée dans le cinquième chapitre. Cette partie concerne la variation de la tension  $U_{50\%}$  en fonction des contraintes électrogéométriques auxquelles est soumis le modèle de laboratoire. En utilisant le logiciel FEMM (présenté dans l'annexe II), nous déterminons la répartition du champ électrique le long du modèle expérimental.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale permettant une synthèse globale de notre travail.

# **CHAPITRE I**

## ***ISOLATEURS DE HAUTE TENSION***

## **I.1. INTRODUCTION :**

Dans la plupart des lignes électriques de haute tension les isolateurs sont menacés par le phénomène de pollution.

Cette pollution mène à une diminution de la rigidité diélectrique et résistivité superficielle des matériaux isolant. Par conséquent des pertes d'énergie, parfois énormes peuvent avoir lieu et conduisent à la mise hors service de la ligne, après destruction fréquente de matériels.

Ces pertes d'énergie sont engendrées par les courants de fuite qui prennent naissance dans les zones sèches de la surface des isolateurs et se propage graduellement sur la surface sujette à la pollution qui fait apparaître des arcs électriques provoquant le contournement.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique non approfondie des divers aspects de la pollution des isolateurs. Il est constitué tout d'abord d'un très bref rappel (définitions), puis, d'une synthèse sur les différents isolateurs de haute tension.

## **I.2. DEFINITIONS :**

### ***I.2.1. Isolement :***

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

### ***I.2.2. Isolation :***

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

### 1.2.3. Gradation de l'isolement :

Les appareils dont la coordination de l'isolement est correcte, présentent les niveaux de tension de la figure (I.1).

- Tension de perforation  $U_p$  (isolation interne)
- Tension de contournement  $U_c$  (isolation externe)
- Tension d'essai fixée par les règles de coordination des isolements  $U_e$  (Prescription CEI).

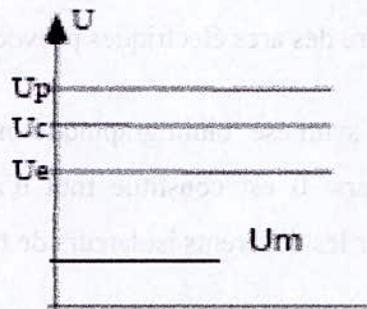


Fig.I.1.Niveaux de tension.

### 1.2.4. Décharge disruptive :

Phénomène associé à une défaillance de l'isolation sous l'effet de contrainte électrique, avec chute de tension et passage d'un courant. Pour les diélectriques gazeux on parlera de l'amorçage ; claquage pour les liquides et enfin perforation pour les solides [BOU 88].

### 1.2.5. Contournement :

Décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier. Dans notre cas, c'est de l'isolateur qu'il s'agit. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur [BOU 88].

### I.2.6. Tension de contournement :

C'est le niveau de tension le plus bas au delà duquel les arcs électriques joignent les deux électrodes [BOU 88].

### I.2.7. Tension de tenue (Tension d'essai):

C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive.

La tension d'essai ou de tenue est fixée par les règles nationales ou internationales et permet une coordination correcte de l'isolement.

#### ❖ Exemple d'essai au choc : d'un isolateur en résine Epoxy (Figure I.2).

Tension nominale la plus élevée 24 kV efficace.

Tension d'essai 125 kV, onde 1.2 / 50  $\mu$ s.

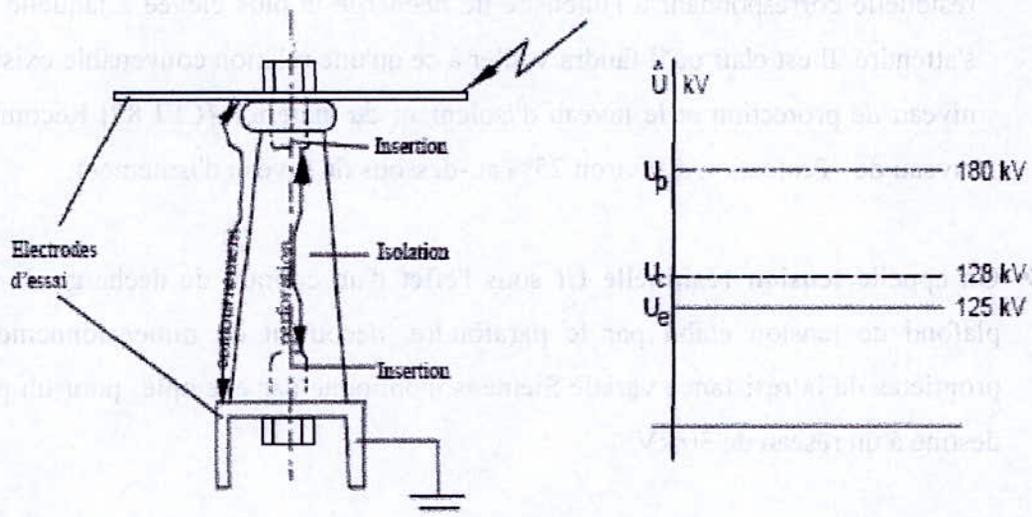


Fig.I.2.Exemple d'essai (isolateur en résine Epoxy).

Pour déterminer la tension de perforation de l'isolateur, il faut immerger ce dernier dans de l'huile ou dans du gaz sous pression (par exemple  $N_2$ ,  $SF_6$ ).

**Quelques définitions complémentaires :**

- ❖ On appelle **tension de tenue à fréquence industrielle** la valeur efficace la plus élevée de la tension à la fréquence de service que le matériel doit supporter pendant une minute entre sa partie active et la masse, sans qu'il ne se produise de décharge disruptive de perforation ou de contournement.
- ❖ On appelle tension de **tenue au choc** la valeur de crête de la tension de choc en onde pleine de forme normalisée que le matériel doit supporter dans des conditions spécifiées.
- ❖ Le **niveau d'isolement** d'un matériel donné est défini par les valeurs de tenue à fréquence industrielle et de tenue au choc.
- ❖ Le **niveau de protection au choc** d'un dispositif de protection est la valeur de crête la plus élevée de la tension qui peut exister entre ses bornes lors de l'application d'une onde de choc normalisée. Pour un parafoudre à résistance variable, ce sera la tension résiduelle correspondant à l'intensité de décharge la plus élevée à laquelle on puisse s'attendre. Il est clair qu'il faudra veiller à ce qu'une relation convenable existe entre ce niveau de protection et le niveau d'isolement du matériel. [CEI 89] Recommande un niveau de Protection d'environ 25% au-dessous du niveau d'isolement.
- ❖ On appelle **tension résiduelle**  $U_r$  sous l'effet d'un courant de décharge, la valeur du plafond de tension établi par le parafoudre, découlant du dimensionnement et des propriétés de la résistance variable. Siemens mentionne par exemple pour un parafoudre destiné à un réseau de 30 kV

Pour une intensité de 1 kA  $U_r = 93$  kV

Pour une intensité de 5 kA  $U_r = 114$  kV

Pour une intensité de 10 kA  $U_r = 122$  kV

Pour une intensité de 65 kA  $U_r = 135$  kV

**1.2.8. Courant de fuite :**

C'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humectée le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre [CLA 73].

**1.2.9. Courant de fuite critique :**

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement total de l'isolateur.

**1.2.10. Longueur critique de l'arc :**

C'est la longueur limite de l'arc partiel, qui au delà de laquelle, l'arc conduira au contournement total. Autrement dit, pour une tension donnée, si l'arc atteint cette longueur, il est probable que le contournement ne se produise pas encore, mais dès qu'il la dépasse, le contournement est inévitable.

**1.2.11. Conductance superficielle :**

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite traversant l'isolateur à la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface d'isolateur [HEI 82].

**1.2.12. Contrainte de contournement :**

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur total de cet isolateur [LAM 72].

### I.3. PRINCIPAUX TYPES D'ISOLATEURS ET LEUR CONSTITUTION :

L'isolateur est un matériau isolant solide présentant une très grande résistance au passage du courant et dont la conductivité est pratiquement nulle [CLA 73]. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension, afin d'empêcher les court-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

#### I.3.1. Fonctionnement et constitution d'un isolateur :

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Ils sont utilisés pour assurer une liaison mécanique entre les conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes. Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage). Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile,  $SF_6$ ) et l'isolation externe (air atmosphérique). Ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de Transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [RIQ 98].

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

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

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

L'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants [CLA 73] :

- L'intervalle d'air
- Le matériau diélectrique
- L'interface air matériau diélectrique

### ***1.3.2. Matériaux utilisés dans la constitution des isolateurs :***

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

#### **❖ Isolants :**

Jusqu'à quelques années de cela seuls le verre et la céramique ont justifié d'un bon comportement en exploitation, bien que ces deux matériaux soient de nature fragile.

#### **a) Céramique :**

Elle est généralement utilisée pour les isolateurs à haute tension et aussi pour les isolateurs support (long fût).

La composition des céramiques et leur fabrication sont longuement développées. Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés [CLA 73].

#### **b) Verres :**

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de détecter les défauts par une simple observation [CLA 73].

#### **• Le verre recuit :**

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

- **Le verre trempé :**

Celui ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation [CLA 73]. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C [CLA 73].

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

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

**Note :**

Il est à noter que la couleur verte de l'isolateur en verre provient de l'oxyde de fer présent dans sa composition, si celui-ci est absent le verre est transparent.

❖ **Pièces métalliques de liaison :**

Les parties isolantes constitutives de l'isolateur sont reliées entre elles ou au support par des pièces métalliques, réalisées par des métaux qui doivent répondre aux contraintes mécaniques et thermiques appliquées à l'isolateur au cours de son exploitation.

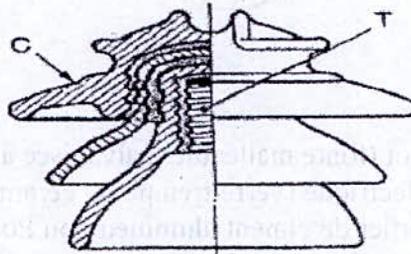
**I.3.3.Principaux types d'isolateurs :**

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

**I.3.3.1. Isolateurs de type rigide :**

Un isolateur rigide (Fig. I.3.) est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent

être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [CLA 73].

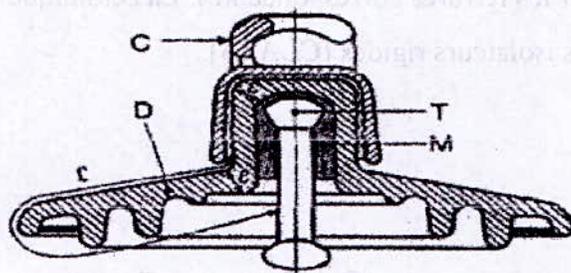


C : Cloche  
T : Logement de tige.

**Fig.I.3. Isolateur rigide en verre.**

### **I.3.3.2. Isolateurs à capot et tige :**

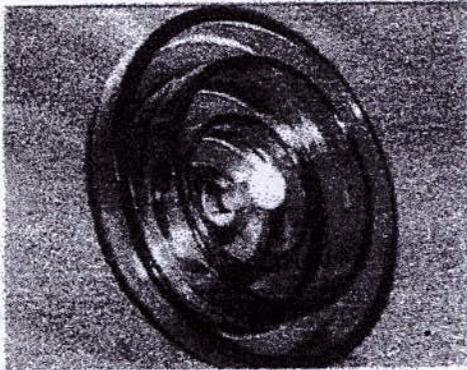
L'isolateur capot tige (Fig.I.4.) est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre ( ou la porcelaine ). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille [KOS 70, AMI 98]. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique, le tout est posé sur une table vibrante pendant une minute afin d'obtenir un bon scellement [AMI 98].



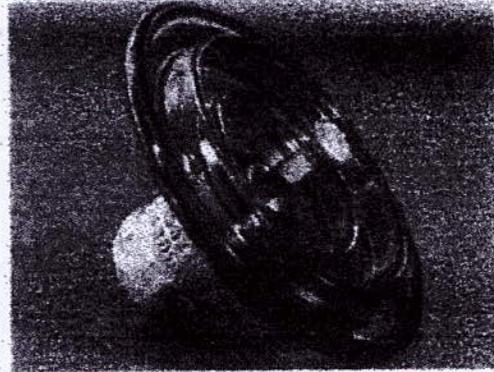
- C : Capot (fonte malléable, galvanisée à chaud)
- D : Diélectrique (verre trempé ou céramique)
- M : Mortier de ciment alumineux ou Portland
- T : Tige (acier, galvanisé à chaud)
- L : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur
- $\varepsilon$  : Longueur du canal de perforation,  $\varepsilon \ll L/2$

**Fig.I.4. Isolateur à capot et tige.**

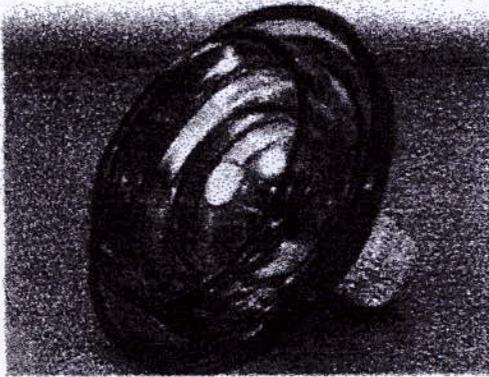
Différents profils des isolateurs à capot et tige :



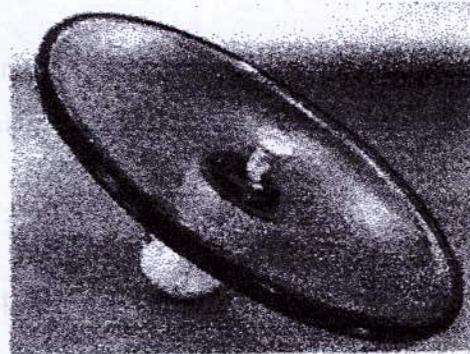
**Profil standard**



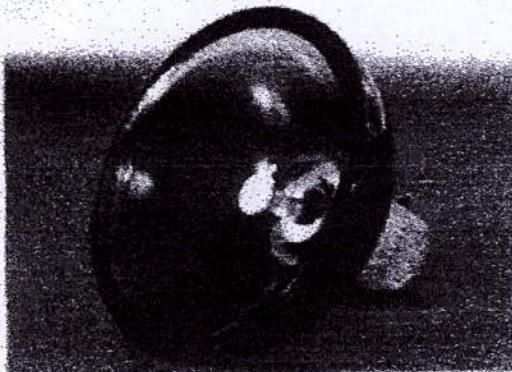
**Profil antibrouillard (A)**



**Profil antibrouillard (B)**



**Profil ouvert**



**Profil sphérique**

Fig.I.5. Différents profils d'isolateurs à capot et tige.

**a/- Profil standard :**

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

**b/- Profil brouillard :**

Plus large que le profil standard, l'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou la pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire. L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans des conditions sévères de pollution.

**c/- Profil ouvert :**

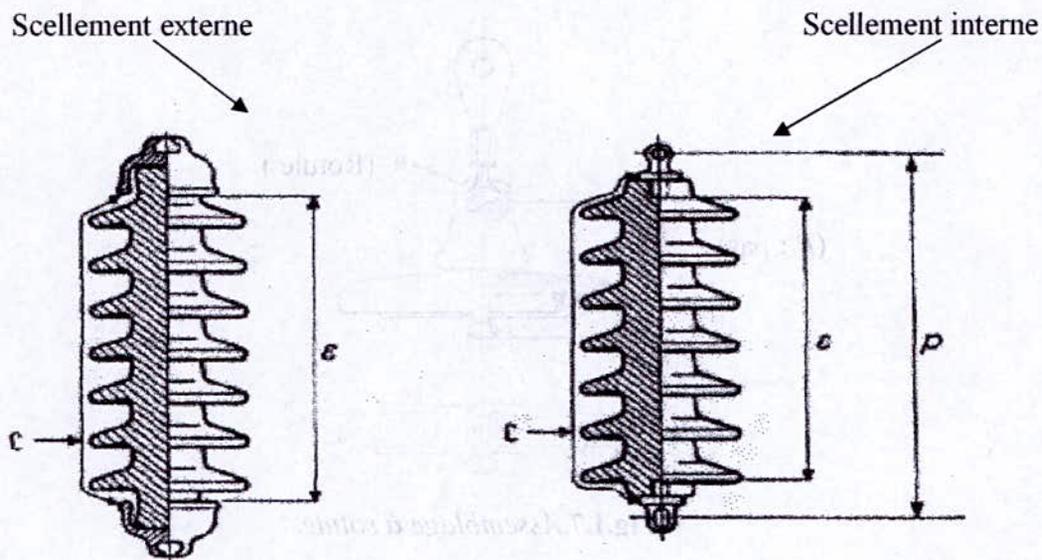
La suppression complète des anneaux permet de réduire l'accumulation des dépôts polluants. Ce type de profil est particulièrement efficace en régions désertiques où le lavage par pluie est très rare.

**d/- Profil sphérique :**

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

**I.3.3.3. Isolateur à long fût en porcelaine :**

Ils sont constitués d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure I. 6). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [CLA 73].



$L$  : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

$\epsilon$  : Longueur du canal de perforation

$p$  : pas

$$\epsilon \gg L/2$$

**Fig.I.6.** Isolateur à long fût en porcelaine.

#### I.3.3.4. Chaînes d'isolateurs :

Les chaînes d'isolateurs sont constituées d'un ensemble d'isolateur de type capot et tige ou à long fût équipés de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour les relier de façon flexible les uns aux autres (Fig. I.7.), à la pince de suspension du conducteur ou au support.

Les éléments de chaînes sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontales (chaînes d'ancrages) [CLA 73].

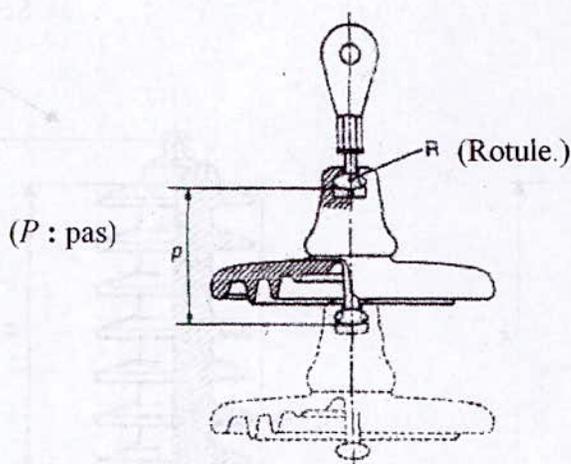


Fig.I.7. Assemblage à rotule.

#### I.4. CONCLUSION :

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépend la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [AMI 98].

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

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

Dans ce chapitre on a présenté certains types d'isolateur et leurs utilisations.

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

## **CHAPITRE II**

# ***POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION***

**II.1. INTRODUCTION :**

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles [CIM 90].

**II.2. SOURCE DE POLLUTION :**

On peut classer les différentes sources de pollution en trois catégories :

- Pollution naturelle (marine, désertique,....)
- Pollution industrielle
- Pollution mixte.

**II.2.1. pollution naturelle :**

Cette pollution peut provenir des sels d'origine marine, de poussières du sol et des sables véhiculés par les vents dans les régions désertiques.

**II.2.1.1. pollution marine :**

Les installations situées en bords de mer sont exposées aux envahissements des grains de sable portés par les vents et se posant sur les éléments d'isolations pour former des couches de pollution de sels qui contribuent à des décharges électriques après humidification ou condensation de ces sels.

Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance et se développer jusqu'au contournement total de l'isolateur [MEK 99].

**II.2.1.2. Pollution désertique :**

Ce type de pollution est fréquent dans les régions désertiques, où le sable emporté par les vents se pose sur les surfaces des isolateurs. Ces polluants deviennent conducteurs après humidification, engendrant un courant de fuite qui est suivi par l'apparition des arcs partiels, pouvant s'allonger jusqu'au contournement total.

**II.2.1.3. Autres sources de Pollution :**

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 contrariée par le phénomène de ruissellement [MEK 99].

En présence d'une pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne ou de la colonne isolante. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut entraîner le contournement de la chaîne d'isolateurs ; c'est le contournement sous pluie [MEK 99].

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.

**II.2.2. Pollution industrielle :**

Ce type de pollution est fréquent dans les zones industrielles surtout à proximité des usines, entreprises de production éjectant des fumées (raffinerie, cimenterie, .....).

Par ailleurs les gaz d'échappements (centrale thermiques) et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

En présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces polluants abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois avoir lieu.

**II.2.3. Pollution mixte :**

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre les pollutions précitées, comme exemple les pollutions marine et industrielle lorsque les installations électriques sont situées en bord de mer.

**II.3. FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE DE POLLUTION :**

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépend du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et du niveau de tension qui leur est appliqué.

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto nettoyage (vent et pluie forte). Par conséquent, la répartition de la pollution le long des chaînes d'isolateurs n'est pas uniforme [NEU 59]. Cette non uniformité devient plus accentuée lorsque la longueur des chaînes d'isolateurs augmente.

Il existe une distinction nette entre les couches formées à la surface supérieure et celles formées à la surface inférieure d'un isolateur soumis à la pollution naturelle

La non uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories [STR 83]:

**II.3.1. La non- uniformité longitudinale par groupe :**

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, dont la valeur est constante dans chaque groupe. Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants :

- Temporairement pendant le lavage sous tension.
- Dans les chaînes d'isolateurs en forme de « T ».
- Par effet du champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension.

**II.3.2. La non- uniformité transversale :**

Ce type est caractérisé par des secteurs ou bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante. Ces bandes sont réparties transversalement autour de la surface de chaque isolateur de la chaîne. La conductivité dans chaque secteur est la même le long de la ligne de fuite. Ce type de pollution est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

**II.3.3. La non uniformité longitudinale périodique**

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

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

**II.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION :**

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [LAM 72]:

**II.4.1. Arc non localisé :**

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçait aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation [HEI 82].

### II.4.2. Arc permanent :

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit on s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation de support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [HEI 82].

### II.4.3. contournement des isolateurs :

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes. Chacune de ces étapes a une importance sur la tenue ou le contournement de la chaîne isolante sous tension de service du réseau.

#### Étape 1 : Dépôt de la pollution

Les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent entre les nervures ou autour du capot (figure II.1). Les facteurs d'accumulation sont les suivants :

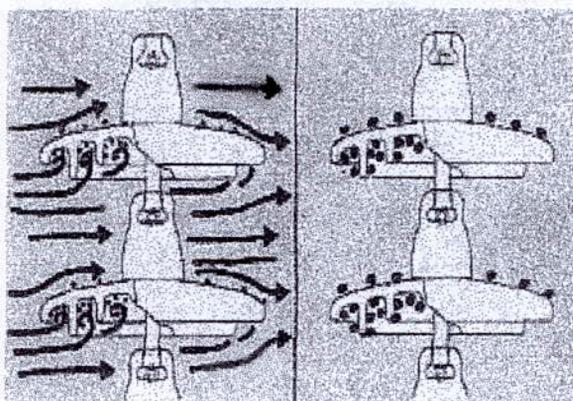


Fig.II.1. Dépôt et évolution de l'agent polluant

- La nature, le poids et la taille des particules polluantes.
- La distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peuvent provenir les poussières.
- La vitesse du vent.

- L'orientation de la chaîne.

La forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto nettoyage par les fortes pluies et vents.

### Étape 2 : Humidification de la pollution

Le brouillard et la condensation de la petite pluie modifient graduellement et pratiquement sans délavage la surface de l'isolateur pollué. Ces conditions sont dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, mais diminue s'il y a séchage. Le niveau de courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et insolubles. Ces derniers maintiennent par adsorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt. (Figure II.2).

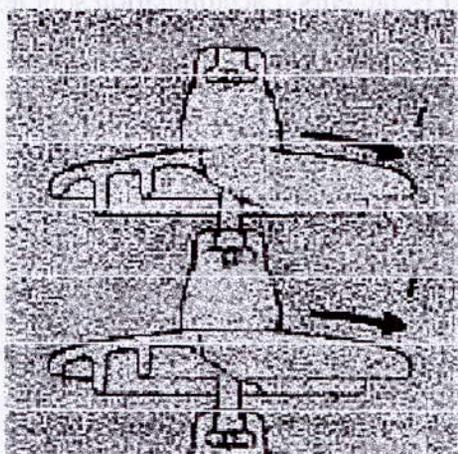


Fig.II.2. Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite

### Étape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs

La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche». La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande

portion du potentiel électrique se trouve reportée à ses bornes. Si la largeur de cette bande sèche est insuffisante pour supporter la différence de potentiel correspondante, un arc est créé. (Figure II.3).

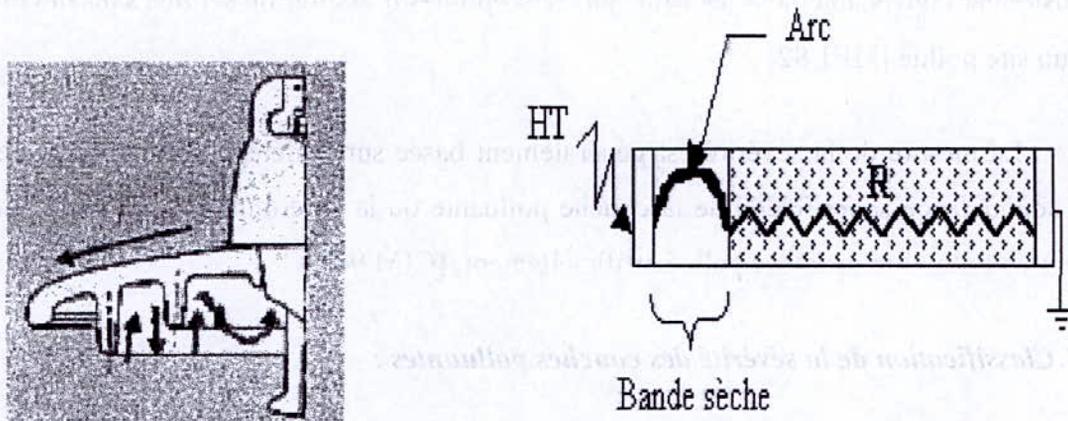


Fig. II. 3. Arc et bande sèche

#### Étape 4 : Comportement des arcs

La résistance du dépôt humidifié non court-circuité par l'arc limite le courant et la longueur de l'arc. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle le «courant critique» correspondant à une «longueur critique» de l'arc, cette situation reste stable (figureII.4). Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir [TAI 02].

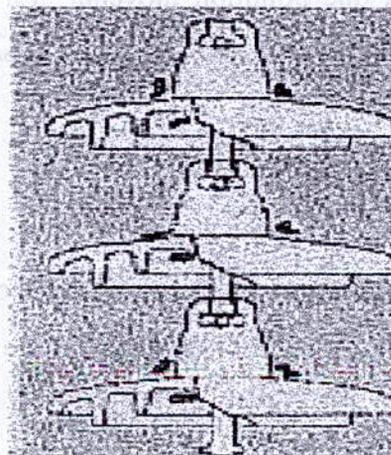


Fig. II. 4. Régime d'arcs sous pollution

## **II.5. MESURES DE LA SEVERITE D'UN SITE :**

Le choix des isolateurs à installer sur le réseau ne peut se faire que si la sévérité de pollution est connue. En effet, la mesure de cette sévérité est indispensable afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué [HEI 82].

La mesure de la sévérité est généralement basée sur la détermination expérimentale de la conductance superficielle de la couche polluante ou la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement [CIM 90].

### **II.5.1. Classification de la sévérité des couches polluantes :**

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [HEI 82].

- **Classe 1 :**

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2,5 g /l de concentration.

- **Classe 2 :**

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. En classe 2 la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g /l

- **Classe 3 :**

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. La salinité équivalente maximale concernant cette classe est de 80 g /l

- **Classe 4 :**

La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle, industrielle ou mixte. La salinité équivalente maximale, pour la classe 4, est de 160 g/l.

### **II.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité de pollution :**

La mesure de la sévérité de pollution peut être effectuée selon plusieurs méthodes [LAM 72, TEG 93]. Généralement, on se base soit sur la mesure de la conductivité des agents polluants, soit sur le courant de fuite. Les essais de laboratoires sont valables dans la mesure où les conditions d'essais conduisent aux mêmes valeurs de courant de fuite observées sur site. Les principales méthodes qui ont été proposées, pour mesurer la sévérité de pollution d'un site, sont :

#### **II.5.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) :**

La **DDSE** est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par  $\text{cm}^3$  de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau [LAM 72, TEG 93].

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

Ainsi, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux maximums entre les périodes de lavage naturel. Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente, en outre, certains inconvénients, tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte.

**II.5.2.2. Conductance superficielle :**

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $\sigma$  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 [LAM 72, TEG 93].

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

**II.5.2.3. Courant de fuite de la plus forte crête ( $I_{fc}$ ) :**

$I_{fc}$  est la plus forte crête du courant de fuite enregistrée pendant une période donnée sur un échantillon ou un isolateur réel, continuellement soumis à sa tension de service. Ces mesures doivent être effectuées pendant une période relativement longue et donc, à coût relativement élevé [LAM 72, TEG 93].

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension sur la couche polluante ; mais le coût relativement élevé de l'équipement de mesure contrebalance les avantages de cette méthode.

**II.5.2.4. Comptage d'impulsions :**

Il consiste à enregistrer, à l'aide d'un dispositif approprié, pendant une période donnée, le nombre d'impulsions du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude, pour un isolateur soumis à sa tension de service. L'existence d'impulsions précède généralement la phase finale de contournement sous pollution. La fréquence et l'amplitude de ces impulsions croissent lorsqu'on s'approche du contournement [LAM 72, TEG 93].

Cette méthode se prête mieux à la détermination des longueurs d'isolateurs dans le cadre de l'extension ou du réisolement de réseaux existants. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs et exige une aptitude au contrôle permanent.

**II.5.2.5. Contrainte de contournement :**

La mesure de la contrainte de contournement donne toutes les informations nécessaires au calcul de la longueur de l'isolateur, qui donnera une fiabilité assez importante ou un taux de défaillance acceptable [LAM 72, TEG 93].

Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons, entre autres :

➤ L'installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des portions d'amorçage enregistrées.

➤ La disposition des éclateurs qui sont disposés sur chaque chaîne afin que sa longueur effective soit augmentée jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

Ces méthodes présentent des mesures les plus directes qui puissent être faites sur les isolateurs réels, afin de déterminer leurs performances. L'inconvénient de ces méthodes, est le coût élevé qui peut toutefois être réduit par l'utilisation d'une ligne existante.

**II.5.2.6. 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 les caractéristiques de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesures adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne le phénomène de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air sur un site et la sévérité de la pollution sur ce même site [LAM 72, TEG 93].

**II.5.2.7. 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 laser 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 [LAM 72, TEG 93].

**II.5.2.8. Densité de dépôt non soluble :**

La densité de dépôt non soluble (DDNS) 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 DDNS s'accompagnent également souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [LAM 72, TEG 93].

**II.6. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION :**

Avant de mettre en service un isolateur quelconque, il faut le soumettre à certains essais prescrits par la CEI. [CEI 89].

Les isolateurs destinés à être utilisés dans les régions très polluées sont soumis aux essais sous pollution. Ces essais peuvent être classés en deux groupes :

- Essais sous pollution naturelle sur site (in situ).
- Essais sous pollution artificielle au laboratoire.

**II.6.1. Essais sous pollution naturelle :**

Ils ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toute leur complexité dans un site donné. L'inconvénient majeur est qu'ils nécessitent plusieurs années pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs.

**II.6.2. Essais sous pollution artificielle :**

Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle. Ils sont aujourd'hui largement utilisés et ont l'avantage d'être rapides. Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont les méthodes de la couche solide, la méthode du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide.

**II.6.2.1. Méthode de la couche solide :**

Dans cette méthode la surface isolante est recouverte par pulvérisation, par trempage ou au pinceau, d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. Les isolateurs sont alors séchés afin que la couche polluante se stabilise.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité se définit mieux par la conductivité de la couche polluante [BOU 88].

Dans certains cas, la couche solide est constituée d'une peinture semi-conductrice qui garde après séchage une conductivité constante [AMI 98, HEI 82].

**II.6.2.2. Méthode du brouillard salin :**

La surface isolante est alimentée par une tension de service, (maintenue constante durant tous les essais) et soumise à un brouillard salin. 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 [HEI 82].

Le degré de salinité exprimé en  $\text{kg}$  de sel par  $\text{m}^3$  de solution, définit le paramètre de sévérité. Les valeurs de salinité appliquée en référence aux conditions de pollution sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160  $\text{kg} / \text{m}^3$ .

**II.6.2.3. Méthode de pollution liquide:**

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire.

### **II.6.3. Analyse des différentes méthodes d'essais artificiels :**

La méthode de brouillard salin qui a été assez strictement normalisée par la CEI-60 [CEI 89], permet d'obtenir une bonne reproductibilité des essais, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes pour lesquelles nombre d'éléments subjectifs sont laissés à l'appréciation des agents d'essai. En outre, la méthode du brouillard salin est la seule qui assure un renouvellement de la couche polluante au cours de l'essai.

La méthode de brouillard salin nécessite une installation fixe assez importante, à l'encontre, des autres méthodes qui ne nécessitent pas d'installations fixes aussi complexes. Cependant, la préparation des agents polluants pour ces dernières est plus délicate et le temps d'essai est généralement plus long.

Pour qu'une méthode artificielle simule d'une façon satisfaisante l'effet des polluants sur le comportement des isolateurs en exploitation, il faut appliquer la tension avant que la pollution soit effective. C'est le cas de la méthode de la couche solide et la méthode de brouillard salin.

Par contre, si la pollution est appliquée avant la mise sous tension, comme dans le cas de la méthode de pollution liquide, l'essai ne peut simuler que le cas de la mise sous tension d'un réseau initialement hors tension dont les isolateurs sont pollués.

Les trois méthodes font appel au chlorure de sodium pour ajuster la conductivité de la pollution. On peut admettre que ces méthodes simulent de plus, la pollution marine et même la pollution industrielle si celle-ci ne contient que peu de matières insolubles.

Par contre, ces méthodes sont moins représentatives pour simuler la pollution désertique qui est très contraignante dans les pays qui possèdent des lignes dans des régions désertiques (Algérie, Egypte,... etc.)[MEK 99].

### **II.7. Techniques de lutte contre la pollution :**

Contre de nouvelles sources de pollution, le dimensionnement initial des isolateurs peut s'avérer insuffisant pour le bon fonctionnement des installations. Pour cela, plusieurs

moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service.

Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propre au site considéré et au changement possible de la sévérité de pollution due à de nouveaux facteurs (apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, ....). Les différentes méthodes utilisées sont [HEI 82] :

### **II.7.1. Allongement de la ligne fuite :**

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

Deux techniques sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existant.
- Sur les pylônes recevant les conducteurs en nappe, la phase centrale est la plus perturbée en raison de la limitation de sa ligne de fuite vu la distance à la masse à respecter ; c'est la raison pour laquelle on utilise pour les chaînes médianes, des chaînes en « V » ou en « V inversé ( $\wedge$ ) » de façon à augmenter la ligne de fuite et à respecter les distances à la masse imposées par le cahier des charges.

### **II.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 très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques et soumises à des tempêtes de sable où la principale source d'humidification est la condensation.

**II.7.3. Graissage périodique :**

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

**II.7.4. Revêtement silicones :**

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

**II.7.5. Les isolateurs composites :**

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une haute résistance mécanique que lui confrère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères.

Cependant, ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique).

**II.7.6. Nettoyage des isolateurs :**

- **Le nettoyage manuel** (essuyage à sec de l'isolateur) ou **le lavage hors tension** peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Aussi, il faut limiter, autant que possible, leur utilisation.

- ***Le lavage sous tension*** permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage .
- ***Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif*** pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certain pays (Amérique du nord en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs [CIM 90].

## **II.8. CONCLUSION :**

Les essais ont pour but soit de déterminer la tension de contournement aux conditions bien précises soit de tester si l'isolateur soumis à certaines conditions supporte ou non la tension appliquée sans perdre sa qualité isolante.

La méthode d'essais sous pollution artificielle est largement utilisée, elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

Pour diminuer les effets indésirables de ce phénomène il est nécessaire d'adapter les surfaces des isolateurs à la nature et le degrés de pollution régnants dans la région et parmi les techniques de lutte contre la pollution les plus utilisées sont : le graissage, le lavage, le changement périodique des isolateurs...

## **CHAPITRE III**

# ***MODELES D'ISOLATEURS POLLUES***

### III.1. INTRODUCTION :

Afin de contourner la difficulté liée à la configuration souvent complexe de l'isolateur, des modèles de laboratoire ont été adoptés par un certain nombre de chercheurs [DAN 83, CLA 73, ALS 63, WOO 70, WIL 69]. Ils ont l'avantage de mieux observer quelques phénomènes qui ne sont pas évidents sur l'isolateur réel (arcs, effet couronne...) et permettent, en outre, la constatation des processus physiques accompagnant ces phénomènes.

Si quelques modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur, d'autres par contre en restent assez éloignés [ALS 63, WOO 70].

### III.2. PRINCIPAUX MODELES :

Nous citons brièvement quelques-uns de ces modèles les plus utilisés :

#### III.2.1. Modèle de J.Danis [DAN 83]

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

Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, J.Danis a considéré plus d'une zone sèche (Fig. III. 1)

Ainsi l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches, et se déplace vers les zones humides.
- Cet arc commence d'une façon aléatoire le long de la zone sèche et aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.
- Dans le cas d'une alimentation continue, l'aspect de l'arc dépend de la polarité de l'électrode qui se trouve juste à proximité de l'arc (en cas de zone humide). Il semblerait que l'anode provoque un arc en forme de simple décharge lumineuse. La cathode, par

contre, provoque un arc aux multiples ramifications fines. De plus, le développement de l'arc à proximité de la cathode est plus rapide que celui à proximité de l'anode.

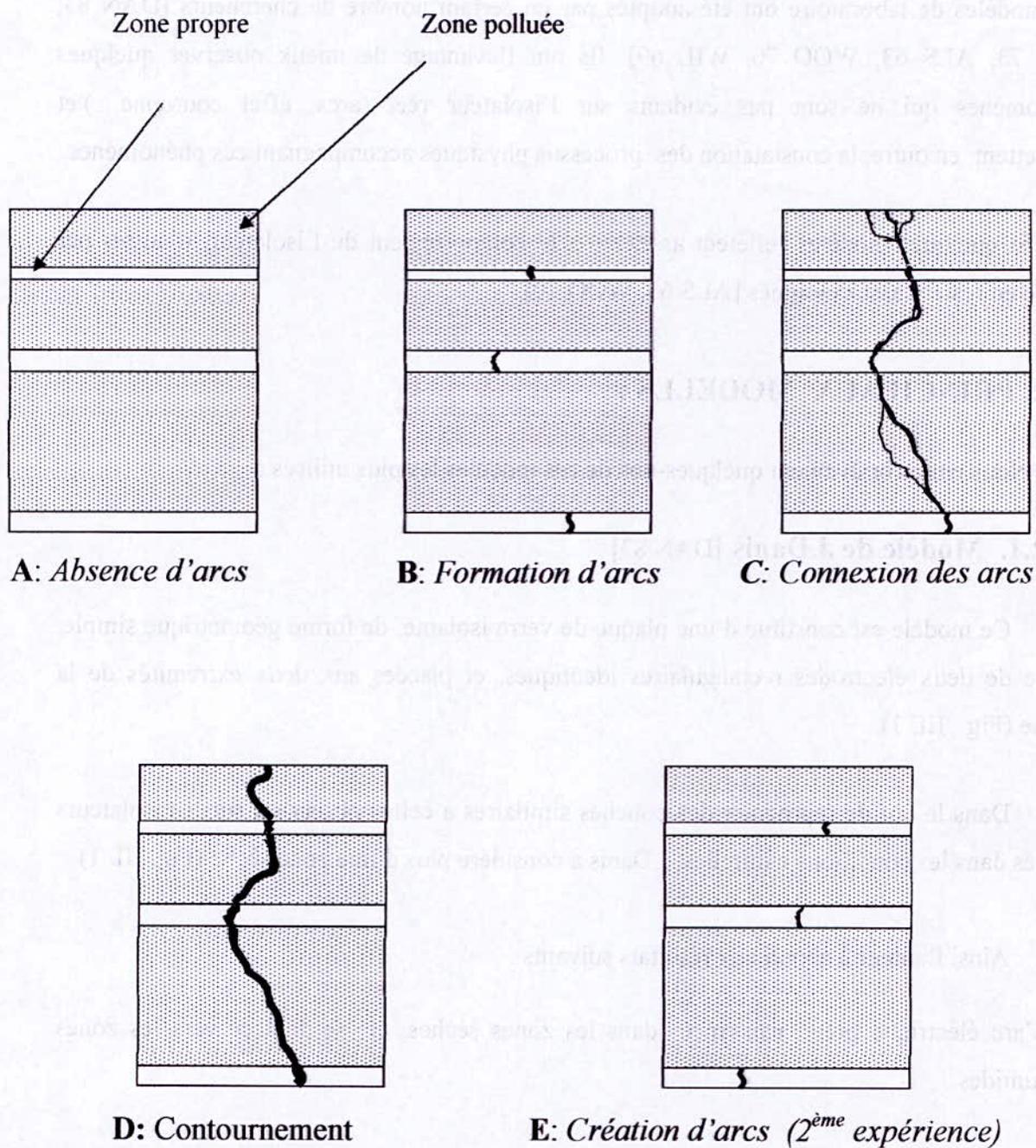


Fig.III. 1. Modèle de J.Danis

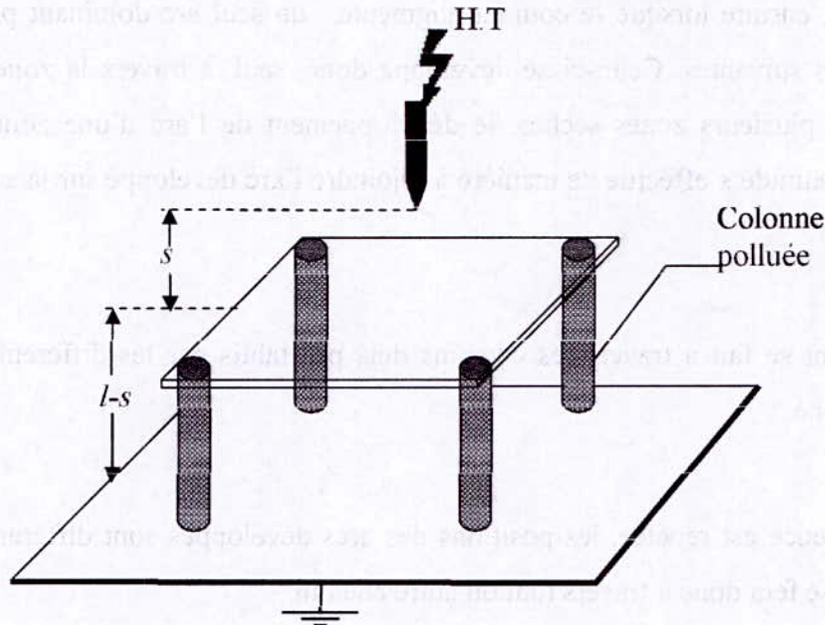
- Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Ceux-ci disparaissent, ensuite lorsque le courant augmente, un seul arc dominant persiste au cours des étapes suivantes. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide. Dans le cas de plusieurs zones sèches, le développement de l'arc d'une zone sèche à travers la zone humide s'effectue de manière à rejoindre l'arc développé sur la zone sèche voisine.
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche.
- Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes, et le contournement se fera donc à travers tout un autre chemin.

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

### III.2.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh [RAY 91] :

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

Les auteurs se sont alors intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur  $s$  de la zone sèche, pour plusieurs conductivités de la pollution appliquées aux colonnes.



**Fig.III. 2.** Modèle de *M.N.Rayes* et *M.Zhirh*

Les auteurs ont donc abouti aux résultats suivants :

- La tension de contournement  $U_c$  en fonction de "s" atteint un minimum, correspondant à une largeur  $s_{min}$  qui se situe à environ 45-50% de la longueur totale, ce sont des courbes en forme de "V".
- La tension de contournement, pour une même largeur de la zone sèche, diminue avec la conductivité des couches polluantes.
- La tension de contournement de l'ensemble zone sèche zone polluée semble être confondue avec celle de la zone polluée lorsque  $s < s_{min}$ , et avec celle de la zone sèche pour  $s > s_{min}$ .

Les auteurs ont conclu que :

- La tension de contournement de l'isolateur dépend du rapport des largeurs des zones sèche et polluée.

- Les courbes en forme de V des tensions de contournement totales montrent que cette dernière ne représente pas la somme des contournements partiels zone sèche-zone polluée.
- Le contournement total correspond à un des contournements partiels considérés, suivant le rapport entre les largeurs de la zone sèche et de la zone polluée.
- La rigidité diminue pour une plage précise de variation de la zone sèche. Cette plage devrait dépendre de la longueur critique d'arc, qui serait favorisée par des zones sèches préétablies.
- L'augmentation de la rigidité lorsque la largeur sèche préétablie devient supérieure à la largeur critique, où aucun arc stable ne peut être observé. Cette largeur critique dépendra du modèle utilisé.

### **III.2.3. Modèle P.Claverie et Y.Porcheron :**

Plusieurs études sur le modèle plan et rectangulaire similaire à celui considéré par P.Claverie et Y.Porcheron [CLA 73] ont été faites au niveau du laboratoire de Haute Tension de l'Ecole National Polytechnique [MEK 99, MEK 90]. Nous les évoquons brièvement afin de faire une liaison avec notre travail. Ces travaux s'intéressaient surtout à l'évolution du courant de fuite ainsi que la longueur de l'arc électrique en fonction de la conductivité de la couche de pollution, du rayon de l'électrode circulaire, de la distance inter électrodes, de l'épaisseur de la couche de pollution, Et de la répartition discontinue de la couche de pollution.

A partir de ces études, les résultats tirés sont les suivants :

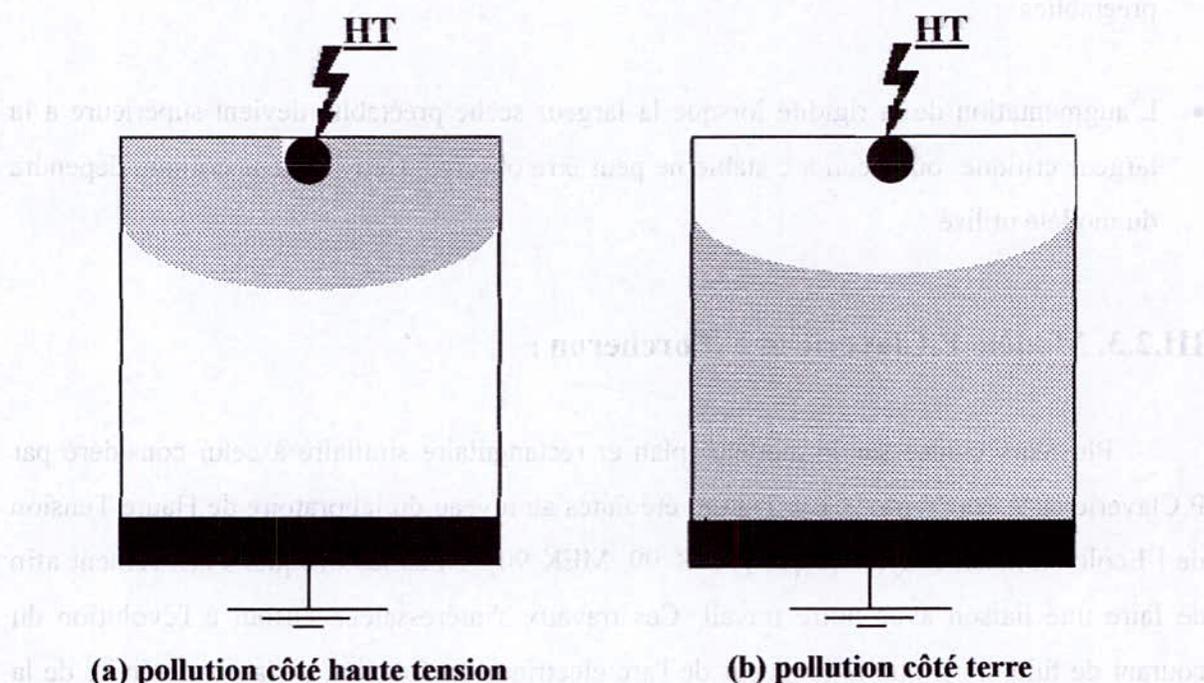
Le courant de fuite diminue avec la distance inter électrodes, augmente avec le rayon de l'électrode circulaire, augmente avec la conductivité et augmente aussi avec l'épaisseur de la couche de pollution.

### **III.2.4. Modèle de D. Namane**

Afin d'examiner le comportement des surfaces isolantes sous pollution discontinue, D.Namane [NAM 98] a proposé un modèle plan rectangulaire (Fig. III.3). Les différentes

contraintes sous lesquelles est soumis son modèle de laboratoire sont: la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution, la position de la pollution par rapport aux électrodes ainsi que la conductivité de la couche polluante appliquée sur la plaque.

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



**Fig.III. 3.** Modèle expérimental selon D.Namane

Les principaux résultats qui ont été obtenus sont les suivants :

- Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est caractérisé par une pollution de 90% de la surface de l'isolateur.
- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre. Ceci est dû au phénomène de la conduction dans la zone sèche et à l'effet de couronne. En effet, lorsque la zone sèche est de côté haute tension, le rayon de courbure de l'électrode circulaire provoque un champ électrique,

vraisemblablement plus intense que celui de l'électrode rectangulaire, par conséquent, on obtient une augmentation du courant de fuite.

- La position de la couche polluante vue des électrodes a peu d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement pour les conductivités utilisées.
- Il existe une longueur critique d'arc à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur est évaluée au tiers de la longueur totale de la plaque isolante et diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par Claverie et Porcheron dans le cas d'une pollution continue. Cette longueur, est toutefois indépendante de la conductivité de la couche polluante.
- Il existe une conductivité limite, selon l'auteur, à partir de laquelle, en cas de zones sèches préétablies, la couche polluante peut être considérée comme court-circuitée. Cette conductivité est comprise entre 500 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

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

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

### III.2.5. Modèle de Woodson et Mc Elroy

En utilisant une configuration géométrique circulaire, *Woodson* et *Mc Elroy* [WOO 70] ont essayé de reproduire d'une façon idéale, la surface d'un isolateur (Fig. III. 4).

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

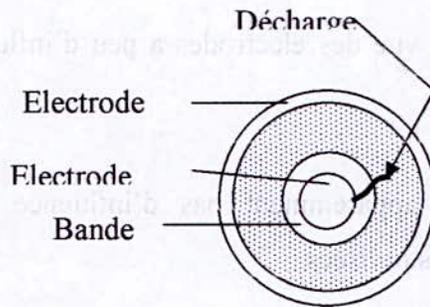


Fig. III. 4 - Modèle de *Woodson* et *Mc Elroy*

### III.2.6. Modèle d'Alston et Zoledziowski

Il est constitué d'un cylindre muni de deux électrodes. Ces dernières étant disposées tout autour des extrémités du cylindre (Fig.III.5) [ALS 63].

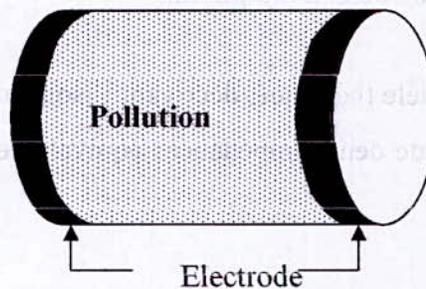


Fig. III. 5.- Modèle d'*Alston* et *Zoledziowski*

### III.2.7. Modèle de Wilkins

Celui-ci [BOU 88] est constitué d'une électrode mise sous tension et située au-dessus d'un bac rempli d'eau additionnée de sel, permettant de simuler la zone polluée. La zone sèche étant considérée comme l'espace compris entre l'électrode et l'eau (Fig.III.6). Ce modèle est très utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc [HUR 75].

Tous ces modèles de laboratoire ont permis par la simplicité de leur configuration, d'examiner aisément l'influence de nombreux paramètres sur le comportement de l'isolateur

(courant de fuite, contournement, tension d'entretien de l'arc, etc.) [NAM 98, MEK 94, HEL 96].

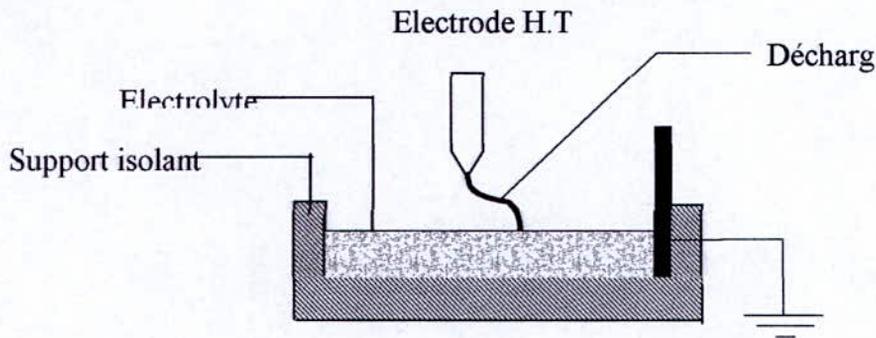


Fig. III. 6 : Modèle de *Wilkins*

### III.3. CONCLUSION :

Cette brève synthèse bibliographique touche l'ensemble des préoccupations des chercheurs dans le domaine de la pollution, car regroupant des aspects aussi variés que la surveillance sur site des isolateurs ou la recherche purement théorique des modèles mathématiques liés à la pollution.

Loin d'être approfondie, car elle n'entre pas dans le cadre précis du sujet traité dans cette thèse, cette synthèse nous a tout de même apporté un grand nombre de connaissances qui nous serviront dans les prochains chapitres.

Nous avons choisi délibérément de ne pas présenter les équations mathématiques liées aux différents modèles présentés, afin de ne pas alourdir le texte, et de considérer uniquement l'aspect essentiel de ce qui touche au domaine de la pollution.

Dans le prochain chapitre, nous présentons la station d'essais de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.

## **CHAPITRE IV**

***STATION D'ESSAIS AU  
LABORATOIRE DE HAUTE  
TENSION DE L'ENP***

**IV.1. INTRODUCTION :**

Dans le laboratoire de haute tension de l'ENP d'Alger, où notre étude expérimentale a été effectuée, existe deux sources d'essais : un transformateur d'essais à fréquence industrielle 50 Hertz et un générateur de choc de foudre de type Marx.

Afin d'assurer un bon fonctionnement des équipements de haute tension, des essais diélectriques sont nécessaires. Ces essais auront pour but de déterminer un niveau de tension bien spécifique. Ce niveau peut être : une tension de tenue, une tension disruptive moyenne  $U_{50\%}$  ou bien une tension à fort probabilité de décharge disruptive ( $U_{100\%}$ ).

Dans ce chapitre nous présentons l'équipement de la station d'essais de choc. Nous présentons aussi les différents types d'essais et explicitons certaines méthodes utilisées en technique de la haute tension.

**IV.2. Equipement de la station de choc du laboratoire de L'ENP :**

Les caractéristiques principales de l'installation de choc de l'ENP sont :

- ❖ Générateur de choc avec dispositif de charge et de commande installé sur un châssis unique et mobile.
- ❖ Diviseur de tension résistif.
- ❖ Un oscillographe cathodique.
- ❖ Un voltmètre de choc.

Tous ces équipements sont disposés dans le hall de laboratoire de haute tension de l'ENP. Le générateur de choc est alimenté par une prise de courant simple 220V, 50Hz située à proximité du pupitre de commande du générateur.

Cette prise alimente le générateur de choc par l'intermédiaire d'un transformateur d'isolement (1.2 kVA, 220/220V, 50Hz) qui sert pour isoler tous les circuits de commande de l'installation.

**IV.2.1. Générateur de choc de l'ENP:****IV.2.1.1. Description :**

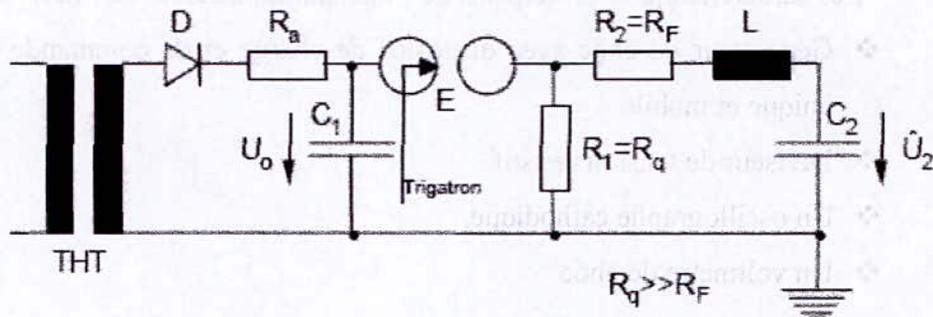
Pour pouvoir expliquer le mode de fonctionnement de ce générateur il est nécessaire de prédéfinir ses éléments constitutifs.

Les condensateurs de générateur sont placés les uns au-dessus des autres dans un cylindre en papier bakélite (générateur de choc avec une colonne), à chaque condensateur de charge  $C_1$  (180  $\mu$ F, 75 kV) correspond une résistance de charge  $R_a$  (7k $\Omega$ ), une résistance de queue parallèle  $R_1$  (430 $\Omega$ ) une résistance de front série  $R_2$  (10 $\Omega$ ) et un éclateur de couplage à deux sphères (E) de même diamètre (12,5cm) ces cinq éléments ( $C_1, R_a, R_1, R_2$  et E) forment un étage. (Figure IV.1).

Le générateur de choc basé sur le principe de Marx comporte huit étages, chaque étage a les mêmes caractéristiques. Les résistances de queue et de front peuvent être démontées et il est possible aussi d'avoir différents types de couplage (couplages A, B, C). (Tableau IV.1).

**IV.2.1.2. Principe de fonctionnement :**

Pour obtenir aux bornes de l'objet en essai une onde unidirectionnelle à front raide, on utilise généralement le schéma suivant :



**Figure IV.1 : Schéma de base**

$C_1$  = Condensateur de choc (réservoir d'énergie).

$C_2$  = Condensateur de charge.

$R_1$  = Résistance de queue d'onde (parallèle)

$R_2$  = Résistance de front d'onde (série)

$L$  = Self-inductance du circuit, due aux dimensions et composants physiques

$$C_1 = (10 \div 20) C_2$$

La condition de périodicité  $R^2 = 4 \frac{L}{C}$  doit être remplie pour avoir une onde unidirectionnelle correcte.

Le condensateur  $C_1$  se charge par l'intermédiaire du transformateur haute tension THT associé à la diode  $D$ . La résistance d'amortissement  $R_a$  empêche une charge trop rapide. La constante de temps lors du processus de charge  $\tau = R_a \cdot C_1$  est de l'ordre de 10 à 20 s.

Lorsque la tension disruptive  $U_0$  de l'éclateur  $E$  est atteinte,  $C_1$  se décharge brusquement dans  $C_2$  à travers la résistance de front  $R_2$ . La résistance de queue d'onde  $R_1$  étant beaucoup plus grande que  $R_2$ , la capacité  $C_2$  va se charger rapidement et  $C_1$  se décharge lentement.

On démontre que la tension aux bornes de  $C_2$  peut être mise sous la forme :

$$U_2 = k \cdot U_0 \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$$

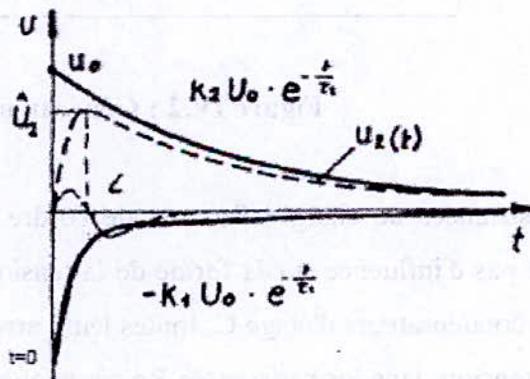
$U_0$  : Tension de charge initiale de  $C_1$ .

$\tau_2$  : Constante de temps de queue d'onde  $= k_2 \cdot (C_1 + C_2) \cdot R_1$  ( $\mu$ s).

$\tau_1$  : Constante de front d'onde  $= k_2 \cdot C_2 \cdot R_2$  ( $\mu$ s).

$k$ ,  $k_1$  et  $k_2$  sont des constantes.

On peut représenter graphiquement la tension  $u_2 = f(t)$  comme indiqué par la figure ci-après :



Il est utile de faire intervenir le rendement en tension du générateur de choc :

$$\eta_{u_2} = \frac{\hat{U}_2}{U_0} = f\left(\frac{C_2}{C_1}\right)$$

Dans la pratique, on préfère plutôt employer les constantes de temps  $\tau_1$  et  $\tau_2$  que de calculer le circuit en fonction des durées normalisées T1 et T2 du front et de la valeur de mi-amplitude de la tension de choc.

Dans le cas du schéma de la (figure IV.1), on obtient :

Selon CEI :

$$T_1 = 2.3 \cdot R_2 \cdot C_2 \quad \text{si } C_1 > 10 \cdot C_2$$

$$T_2 = 0.63 \cdot R_1 \cdot C_1 \quad \text{si } R_1 > 10 \cdot R_2$$

### II.2.1.3. Schéma multiplicateur de Marx :

Pour obtenir des tensions de choc de l'ordre de plusieurs MV, nécessaires à l'essai du matériel à très haute tension, il est indispensable d'utiliser le schéma de la (figure IV.2).

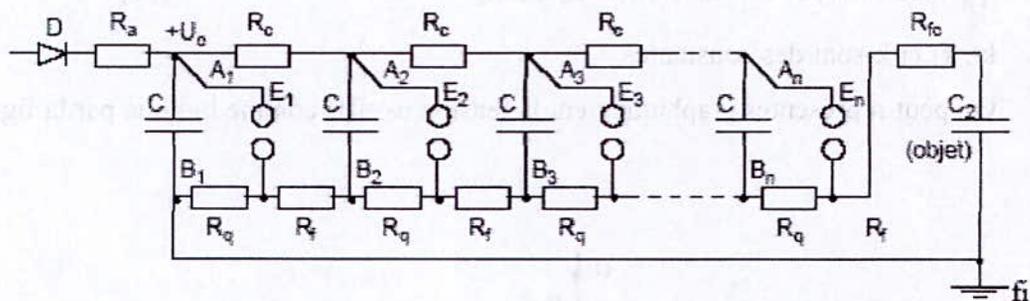


Figure IV.2 : Générateur à n étages

Les résistances de charges  $R_c$  sont de l'ordre de 8 à 10  $R_q$  ce qui fait qu'elles n'ont pratiquement pas d'influence sur la forme de la tension de choc sur  $C_2$ . Pendant la période de charge des  $n$  condensateurs d'étage  $C$ , toutes leurs armatures  $A$  se trouvent au même potentiel. La chute de tension dans les résistances  $R_c$  est négligeable. Les armatures  $B$  sont au potentiel de terre par l'intermédiaire des résistances  $R_q$  et  $R_f$ . Le premier éclateur  $E_1$  est réglé avec un écartement légèrement plus faible que celui des autres éclateurs. Par conséquent, l'amorçage se produit d'abord sur  $E_1$ , à la tension  $U_0$ , et le potentiel de  $A_2$  devient  $2 U_0$ . L'éclateur  $E_2$  sollicité par une tension  $2 U_0$  s'amorce à son tour, et ainsi de suite. La tension de choc totale sera donc de la forme :

$$U_2 = k \cdot U_0 \cdot n \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$$

#### IV.2.1.4. Forme d'onde impulsionnelle :

La tension impulsionnelle est une tension transitoire aperiodique qui habituellement croit rapidement jusqu'à une valeur de crête, puis décroît plus lentement jusqu'à zéro. On peut produire une onde bi exponentielle en laboratoire par les générateurs de choc. Le principe de ces générateurs est basé sur la charge de condensateurs en parallèle, puis de leur décharge en série à travers des résistances.

La tension délivrée est caractérisée par deux paramètres :

- La durée conventionnelle de front  $T_1 = 1.67(T_{90} - T_{30})$  [ $\mu\text{s}$ ].
- La durée de queue à mi-amplitude  $T_2$  [ $\mu\text{s}$ ].

Où  $T_{90}$  est le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête  $U_m$  et

$T_{30}$  celui correspondant à 30%  $U_m$ .

La CEI définit la **tension de choc normalisée** suivante (figure V.4) [CEI 89].

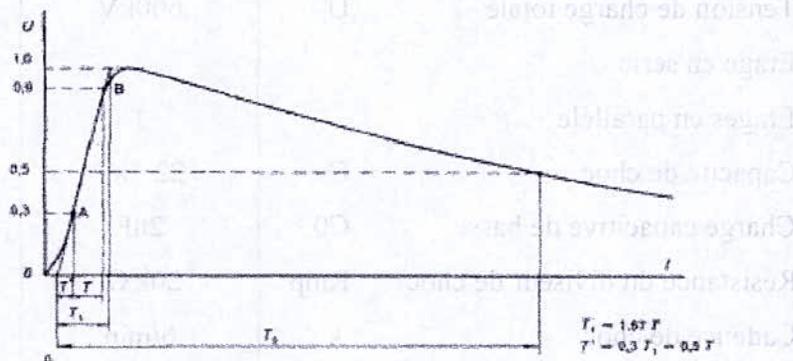


Fig. V.4 : Forme d'une onde impulsionnelle

Les valeurs sont les suivantes :

Tension de crête : tolérance  $\pm 3 \%$

T1 :  $1.2 \mu\text{s} \pm 30\%$

T2 :  $50 \mu\text{s} \pm 20 \%$

#### IV.2.1.5. Les différents couplages :

Le générateur de choc, basé sur le principe de Marx à huit étages. Chaque étage à même caractéristique.

Il est possible d'avoir différents types de couplage selon les résistances de queue et de front, on présente les trois cas :

- ❖ **Couplage A** : dans ce cas tous les condensateurs au moment du déclenchement se déchargent en série, la capacité de choc est huit fois plus petite que la capacité d'un étage.
- ❖ **Couplage B** : dans ce cas, certains étages se déchargent en parallèle et d'autres en série, notamment 4 en série et 2 en parallèle. ce cas donne comme résultat une augmentation de capacité de choc et une diminution de la tension de choc.
- ❖ **Couplage C** : comporte deux étages en série et 4 étages en parallèle, ce qui donne au moment de charge une tension 1/4 de la tension de charge totale et une augmentation de la capacité considérable (16fois).

Ces différents couplages permettent d'adapter l'installation de choc aux objets suivants leurs capacités et la tension désirée. Le tableau suivant présente des paramètres nominaux et les paramètres caractéristiques pour les trois couplages :

Couplage		A	B	C
Tension de charge totale	U	600kV	300kV	150kV
Etage en série		8	4	2
Etages en parallèle		1	2	4
Capacité de choc	$C_1$	22.5nF	90nF	360nF
Charge capacitive de basse	$C_0$	2nF	2nF	2nF
Résistance du diviseur de choc	$R_{mp}$	20k $\Omega$	20k $\Omega$	20k $\Omega$
Cadence de choc	k	6/min	6/min	6/min

Tableau IV.1 : Les différents couplages

**IV.2.2. Diviseur de tension résistif :**

Le diviseur présente la solution la plus simple. Il est composée de deux résistance fondamentalement différentes. La résistance de l'élément de haute tension (la résistance primaire) et ayant une valeur très élevée de  $20 \text{ k}\Omega$  et montées dans un cylindre en papier bakélite rempli d'huile. L'isolation d'huile permet d'une part le travail avec un gradient relativement élevé le long de la résistance et d'autre part une augmentation considérable de la capacité calorifique (surcharge). La partie active de la résistance est formée d'un tissage de fils chrome nickel et de coton formant une bande très peu inductive. Cette bande de résistance est enroulée avec un ruban de soie sur un cylindre en papier bakélite. Ce cylindre est remplis d'huile mais subsiste un coussin d'air destiné à compenser la dilatation d'huile sous l'effet de la chaleur, il est hermétiquement fermé à l'air extérieur par des joints d'étanchéité. La résistance secondaire est de dimension très petite par rapport à la résistance primaire (d'ordre de dix centimètres) et elle peut être facilement enlevée en cas de besoin de diminution du rapport de transformation et de valeur faible d'ordre  $73 \text{ k}\Omega$  elle est connectée à la masse [DOB 72].

Ce type de diviseur est particulièrement bien adapté à des mesures de choc de foudre, mais ne convient pas pour la mesure de choc de manœuvres à cause de la très grande dissipation d'énergie [GUE 96].

**IV.2.3. Oscilloscope et Voltmètre de choc :**

Les oscilloscopes et les voltmètres pour la mesure de chocs doivent être blindés ou placés dans une cage de faraday afin d'éviter les perturbations importantes qui se manifestent lors des essais.

**IV.2.3.1. Oscilloscope de choc :**

C'est un appareil qui permet de donner la forme de l'onde. Les phénomènes enregistrés nécessitent une vitesse de balayage de  $10$  à  $100 \text{ nS/cm}$ .

#### IV.2.3.2. Voltmètre de Crête :

C'est un appareil qui permet de mesurer la tension crête de l'impulsion de tension elle générale utilisé avec un oscilloscope de manière à vérifier si la tension dépourvue d'oscillations ou pas [GUE 96].

#### IV.2.4. Eclateur à sphères :

La tension disruptive entre les sphères suit la loi de Paschen dans les conditions usuelles d'utilisation. Il mesure les valeurs de crête des tensions disruptives et peut s'appliquer pour la mesure:

- des tensions alternatives;
- des tensions de chocs (valeurs différentes selon polarité);
- des tensions continues des deux polarités.

#### Remarques:

- Le diamètre des sphères doit être choisi en fonction de la tension à mesurer.
- Un dégagement suffisant doit être assuré autour des sphères.
- L'avantage de cette méthode est que l'on confirme la mesure de visu, avec une précision de  $\pm 3\%$ .

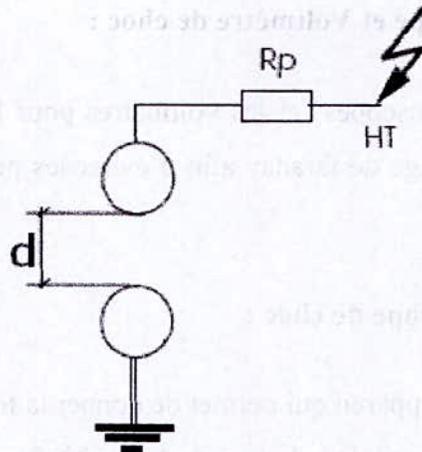


Fig. IV.3. Eclateur à sphère

### IV.3. Détermination de la tension disruptive moyenne $U_{50\%}$ :

La tension  $U_{50\%}$  de décharge disruptive a été déterminée par la méthode Up and Down et calculée d'après DIXONE et MOODE. Les valeurs mesurées ont été ramenées aux conditions normales de température et de pression selon la norme C.E.I 60-1. [GUE 96].

### IV.4. Classification des essais de haute tension :

#### ❖ Classe 1 :

Les essais de cette classe concernent l'application, (n) fois, d'un même niveau de tension (palier), puis la détermination des fréquences de décharge disruptive.

Les formes de tension sont :  $U_{choc}$   $U_{continue}$  et  $U_{alternative}$  [21].

A chaque niveau de tension d'essai correspondra une probabilité de décharge variant de 0% à 100%. pour la détermination de la tension moyenne  $U_{50\%}$  et de l'écart type  $\sigma$ , nous reportons les valeurs de tension avec leur probabilité respective sur une échelle gauss-arithmétique. Dans le cas d'une régression linéaire, la distribution est normale et nous avons les résultats suivants :

$$U_{moy} = U_{50\%} \quad (p(u) = 0,5)$$

$$\sigma = \frac{U_{84\%} - U_{16\%}}{2}$$

#### ❖ Classe 2 :

Dans ce cas, la tension est augmentée progressivement jusqu'à la disruption.

L'essai est répété (n) fois.

Les formes de tension sont :  $U_{continue}$  et  $U_{alternative}$

$$U_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U_k$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (U_k - U_{moy})^2$$

❖ **Classe 3 :**

Dans ce dernier cas, nous procédons à l'application multiple de plusieurs niveaux de tension, dépendant chacun de niveau précédent.

On choisit un niveau de tension  $U_i$  proche de  $U_{50\%}$  et on fixe un  $\Delta U = 0,05 \cdot U_i$ .

- Si pour le niveau de tension  $U_i$  on a une décharge, l'essai suivant s'effectuera à la tension :  $U_{i+1} = U_i - \Delta U$ .
- Si pour le niveau  $U_i$  on a une tenue, l'essai suivant s'effectuera à la tension :  $U_{i+1} = U_i + \Delta U$ .

A chaque niveau de tension  $U_i$ , correspondra un nombre d'applications  $n_i$ .

La tension moyenne est définie par l'expression :  $U_{\text{moy}} = U_{50\%} = \frac{(\sum n_i \cdot U_i)}{(\sum n_i)}$

**IV.5. méthode montées et descentes (Up and Down) :**

Dans le cas où la probabilité de décharge suit la loi normal, il est préférable d'utiliser la méthode Up and Down, pour déterminer des niveaux de tension de différentes Probabilités de décharge.

**IV.5.1. Méthode Up and Down selon DIXON et MOODE : [GUE 96]****IV.5.1.1. Détermination de  $U_{50\%}$  et  $\sigma$  :**

Nous commençons les essais à un niveau de tension  $U_0$ , relativement faible. Le prochain niveau de tension sera :

$$U_1 = U_0 + \Delta U \quad \text{Dans le cas où il y a tenue à } U_0$$

$$U_1 = U_0 - \Delta U \quad \text{Dans le cas où il y a rupture à } U_0$$

Le choix du niveau de tension suivant se fera de la même manière que pour  $U_1$ , on obtient ainsi :

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \left( \frac{A}{N} \pm 0.5 \right).$$

$$\text{Et } S = 1.62 \cdot \Delta U (C + 0.029)$$

$$\text{Avec : } A = \sum (i \cdot n_i)$$

$$B = \sum (i^2 \cdot n_i)$$

$$N = \sum n_i$$

$$C = (N \cdot B - A^2) / N^2$$

$n_i$  : nombre de ruptures (ou tenue) pour le niveau  $U_i$

**Remarque :**

+ : dans le cas où l'on choisit les  $n_i$  tenue

- : dans le cas où l'on choisit les  $n_i$  rupture

**IV.5.1.2. Intervalle de confiance :**

$$U_{\text{moy}} = U_{50\%} \pm 1.96 \cdot \sigma_u$$

$$\sigma_{\text{moy}} = S \pm 1.96 \cdot \sigma_s$$

$$\text{Avec : } \sigma_u = SG / \sqrt{N} \quad \text{et} \quad \sigma_s = SH / \sqrt{N}$$

H et G sont déterminé graphiquement.

**IV.5.2. Méthode Up and Down élargie:**

Cette méthode, établie par Carrara et Dellara, permet la détermination de niveaux de tension à différentes probabilités qu'au moins un choc sur 'm', d'amplitude U.

**IV.6. Condition atmosphérique :**

Les décharge disruptives d'une isolation externe dépend des conditions atmosphériques régnantes habituellement, la tension de contournement d'un parcourés donne dans l'air est accrue par l'accroissement de la densité de l'air ou de l'humidité.

#### IV.6.1. Atmosphère normalisée de référence :

L'atmosphère normalisée est :

Température	$t_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
Pression	$b_0 = 1013 \times 10^5 \text{ N / m}^2$ (1013 mbar).
Humidité	$h_0 = 11 \text{ g d'eau par m}^3$

**Note** : une pression de 1013 mbar correspond à une hauteur barométrique de 760 mm de mercure à 0 C°. Si la hauteur barométrique est H mm de mercure et la température est t C°, la

pression en millibars est :  $b = \frac{1013.H}{760} \left( 1 \div 1.8 \times 10^{-4} \times t \right)$ .

#### IV.6.2. Facteurs de correction atmosphérique :

En appliquant les facteurs de correction, une tension disruptive mesurée dans des conditions d'essais données (température t, pression b, humidité h), peut être ramenée à la valeur qui aurait été obtenue sous les conditions atmosphériques de référence normalisée (  $t_0$ ,  $b_0$ ,  $h_0$  ).

Lors des expériences réalisées au laboratoire, toutes les valeurs des tensions seront corrigées suivant les prescriptions des normes de la C.E.I -60-1.

Il existe deux facteurs de correction :

- Le facteur de correction de densité de l'air  $K_d$ .
- Le facteur de correction de l'humidité  $K_h$ .

Les tensions disruptives mesurées  $U_m$  sont ramenées à  $U_n$  correspondant aux conditions atmosphérique de référence normalisés, en divisant par  $(K_d K_h)$ .

#### IV.6.3. Facteur de correction de densité de l'air :

Le facteur de correction de la densité de l'air dépend de la densité relative de l'air  $\delta$ , et peut en général être exprimé par:

$$K_d = \delta^{(m)}$$

Si les températures  $t$  et  $t_0$  sont exprimés en degrés Celsius et la pression atmosphérique  $b$  donne la même unité que  $b_0$  (kilo pascals ou milli bars) .La densité relative de l'air est :

$$\delta = \frac{b.(273+t_0)}{b_0(273+t)}$$

#### IV.6.4. Facteur de correction de l'humidité :

Le facteur de correction de l'humidité peut être exprimée par :  $k_h = k^{(w)}$

Ou  $K$  : est un paramètre fonction de type de tension d'essai et qui, pour des besoins pratiques, peut être approximativement exprimé en fonction de rapport entre l'humidité absolue  $h$  et la densité relative  $\delta$  . [GUE 96, CEI 89].

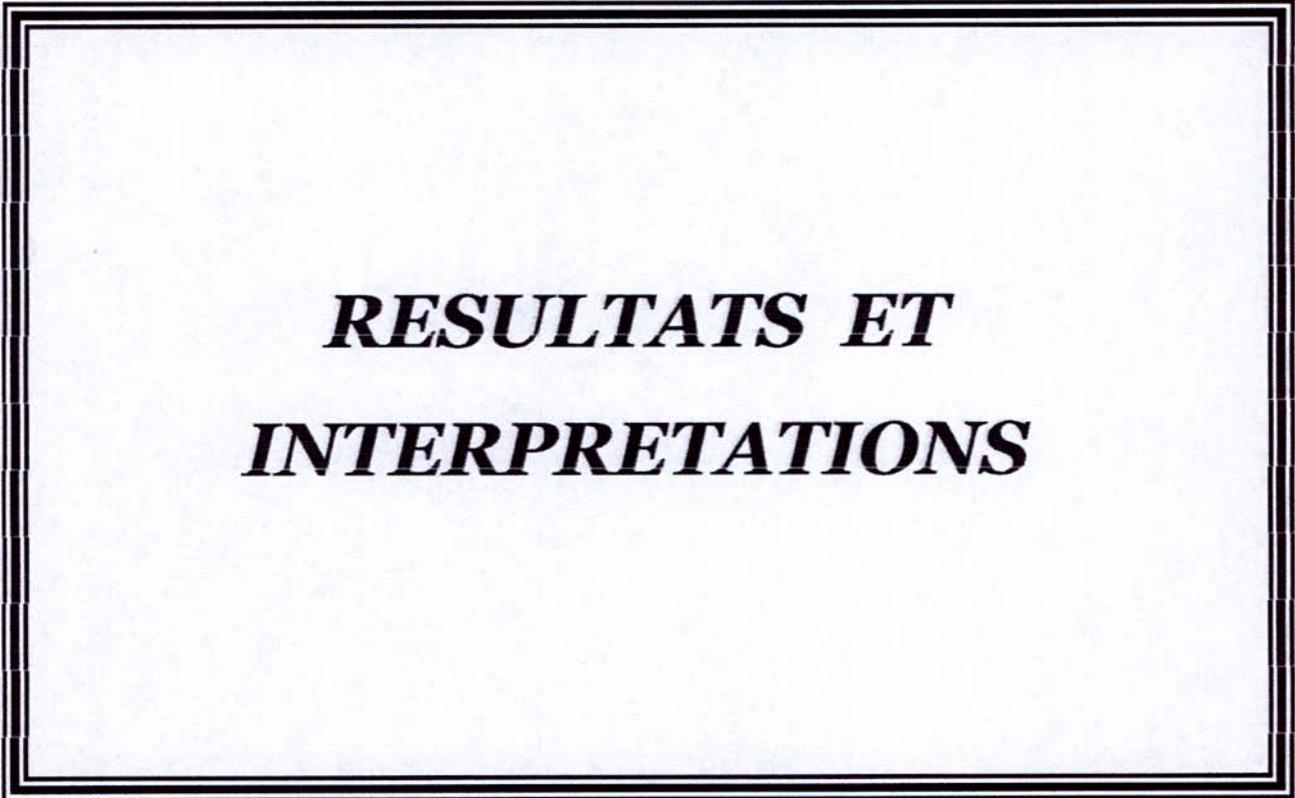
#### IV.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les stations d'essais au laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechniques.

Ce chapitre nous a permis de présenter certaines méthodes statistiques, utilisées dans les mesures de haute tension. Les exemples présents permettent au lecteur une compréhension plus facile.

L'utilité de ces méthodes est de déterminer un niveau de tension ayant une probabilité de décharge donnée, en utilisant un nombre suffisamment réduit d'essais tout en sauvegardant la précision. Ainsi dans le cas d'une distribution normale, la méthode Up and Down est préférable à la méthode des paliers multiples constants, pour la détermination de la tension  $U_{50\%}$  de décharge disruptive aux chocs . La méthode Up and Down élargie permet aussi de déterminer les tensions à faible probabilité de décharge.

## **CHAPITRE V**



# ***RESULTATS ET INTERPRETATIONS***

## V.1. INTRODUCTION :

Des observations sur site ont montré que les dépôts, constitués de couches de sable, sur les isolateurs capot et tige (type 1512L), installés dans les régions désertiques algériennes, se concentrent dans les parties les plus protégées contre les facteurs autonettoyant [MEK 90, MEK 96]. La répartition ainsi discontinue des couches de pollution dépend principalement du profil d'isolateur de la direction du vent et des tempêtes de sable, du taux de pluie ainsi que la disposition des chaînes d'isolateurs et de leurs distances par rapport au sol.

Dans le but de déterminer l'influence de la discontinuité de la couche polluante sur le comportement des isolateurs, nous avons effectué de nombreux essais sur un modèle plan de laboratoire. Ce modèle, qui s'inspire de celui de P.Claverie et Y.Porcheron [CLA 73], est soumis à des contraintes électrogéométriques à savoir la largeur de la pollution, la polarité, la tension appliquée et la durée entre deux impulsions successives de la tension appliquée. Les essais ont été effectués en utilisant une tension de choc impulsionnelle. Les essais expérimentaux concernent la tension  $U_{50\%}$ .

En outre nous nous sommes intéressés à calculer le champ électrique engendré par la tension appliquée, avec le logiciel FEMM [MEE 03] (voir annexe).

## V.2. MODELE OPERATOIRE :

La plupart des travaux considèrent des modèles expérimentaux de géométrie simple et rarement le profil d'un isolateur réel [CLA 73, MEK 94, MEK 90, NAM 98, TEG 93]. Cependant, si ces modèles équivalents ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent par contre une meilleure visualisation du phénomène de décharge électrique. Dans ce qui suit, nous exposons notre modèle en examinant l'effet de la discontinuité de la pollution sur son comportement.

### V.2.1. Modèle expérimental :

Le modèle expérimental que nous avons choisi est semblable à celui utilisé par Claverie et Porcheron [CLA 73]. Il est constitué d'une plaque de verre (500x500x6 mm) ayant la propriété de résister à la chaleur due aux décharges électriques. Cette plaque est munie de

deux électrodes en papier aluminium. La première est circulaire de rayon  $r=25$  mm mise à la borne haute tension et la seconde est rectangulaire (400x50) mise à la terre. Le modèle de laboratoire est soumis à une répartition discontinue de la pollution reproduisant l'état critique de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L, prélevé de la région de Hassi R'mel [CLA 73, AMI 98] (Fig. V.1). La distance inter électrodes du modèle expérimental ( $d=292$  mm) correspond à la ligne de fuite de l'isolateur réel. Les dimensions longitudinales des bandes propres et polluées sont données dans le tableau V.1. Afin de simuler une pollution parfaitement conductrice, les couches polluantes sont réalisées avec du papier aluminium.

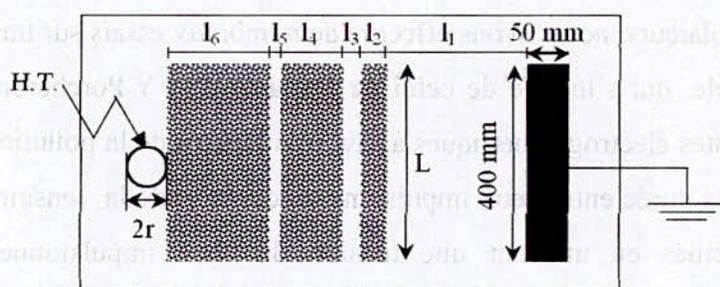


Fig.V.1. Modèle expérimental

	Bande i	Longueur $l_i$ (mm)	Pourcentage par rapport à la longueur de fuite (%)	
Bande propre équivalente	1	106	36.30	42.12
	3	13	4.45	
	5	04	1.37	
Bande polluée équivalente	2	30	10.27	57.88
	4	52	17.81	
	6	87	29.80	

Tableau.V.1. Dimensions longitudinales des zones propres et polluées

**V.2.2. Préparation du modèle :**

Avant chaque essai, la plaque isolante est bien nettoyée, puis imbibée de gaz oil dans les endroits d'emplacement des électrodes en aluminium, de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les électrodes. La plaque est ensuite essuyée avec de coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer toute trace de gaz oil sur la plaque isolante. Le modèle est disposé horizontalement sur quatre colonnes isolantes, elles-mêmes posées sur un support en bois. Le modèle se trouve ainsi placé à environ un mètre du sol et à une distance suffisamment grande du transformateur d'essais (deux mètres environ). Ces dispositions sont prises afin de respecter une distance d'au moins 1.5 fois, le plus court trajet de contournement [CEI 89].

**V.2.3. Procédé d'essais :****V.2.3.1. Mesure de la tension de contournement :**

Avant chaque essai, nous nettoyons toutes les zones propres avec du coton imbibé d'alcool pour éliminer les traces partiellement frottées par le passage de l'arc électrique.

La mesure de la tension de contournement (représentant la moyenne arithmétique de cinq mesures), a été effectuée pour les deux polarités (positive, négative) en variant la largeur de la couche polluante de 0 (plaque propre) à 40 cm par pas de 8 cm.

Dans le but d'opérer avec un minimum d'erreurs dans les mesures, nous avons procédé à plusieurs essais préliminaires. Etant donné la difficulté de pouvoir reproduire exactement le même état des couches en papier aluminium, nous avons gardé, pour un même niveau de tension, la même plaque.

**V.2.3.2. Résultats et interprétations :****V.2.3.2.1. Observations :**

Les observations de laboratoire montrent que le contournement se produit directement sans apparition au préalable de décharge. A cause de l'effet couronne, l'initiation des premières luminosités commence autour de l'électrode haute tension à environ 20 kV. Avec l'augmentation de la tension appliquée, ces luminosités deviennent intenses. A partir d'un certain seuil représentant la tension critique, une décharge électrique rapide court-

circuite brutalement la distance inter électrodes, provoquant ainsi le contournement total de la surface isolante.

Ce phénomène, caractérisé par la non génération d'arcs partiels, est dû à la fois à la nature de la pollution utilisée et surtout au fait que la longueur totale de la bande propre équivalente (représentant la somme des différentes bandes propres partielles) dépasse la valeur critique à partir de laquelle aucune décharge stable ne se propage [BOU 01, TEG 01.a, TEG 00, TEG 01.b]. Cette longueur critique a été estimée dans le cas d'une tension alternative, dans une étude antérieure [NAM 98], au tiers (33 %) de la ligne de fuite totale. Dans notre cas, la longueur de la bande propre équivalente représente 42.12 % de la distance inter électrodes.

#### V.2.3.2.2. Tension $U_{50\%}$ :

La tension  $U_{50\%}$  est la tension pour laquelle nous obtenons une disruption de l'intervalle de l'air entre les deux électrodes du système à étudier avec une probabilité  $P(u)=0.5$ . Pour cela, nous avons utilisé les deux méthodes suivantes :

◆ **La méthode des paliers multiples constants** : Qui consiste à appliquer plusieurs paliers de tension différents. Nous effectuons 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Plus le nombre de paliers à appliquer est grand, plus la précision est bonne. Les caractéristiques probabilité-tension d'essais sont tracées sur une échelle Gausso-arithmétique).

◆ **La méthode montée et descente (Up and Down)** : La présente méthode s'applique lorsque la probabilité de décharge suit une loi normale (sur une échelle Gausso-arithmétique). Elle consiste à appliquer 50 niveaux de tension, en commençant par un niveau de tension  $U_0$  relativement faible, qui sera augmenté de  $\Delta U$  s'il y a tenue à  $U_0$  ou diminué de  $\Delta U$  dans le cas de la rupture électrique. Dans cette méthode, différents temps entre deux impulsions successives ont été adaptés.

Les figures (V.2 à V.13) donnent les caractéristiques de probabilité en fonction de la tension appliquée. Ces figures permettent en fait, la détermination de  $U_{50\%}$  correspondant à la fréquence de décharge de 50%. Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais correspondantes sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle Gausso-arithmétique.

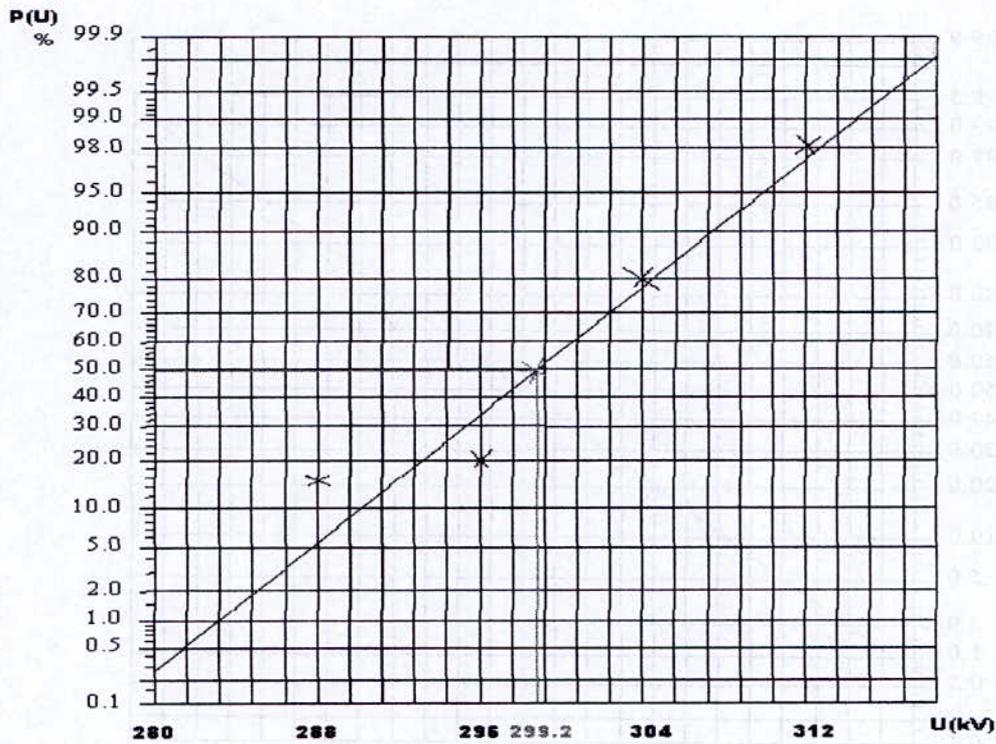


Fig.V.2. Détermination de  $U_{50\%}$  pour un modèle propre (polarité négative)

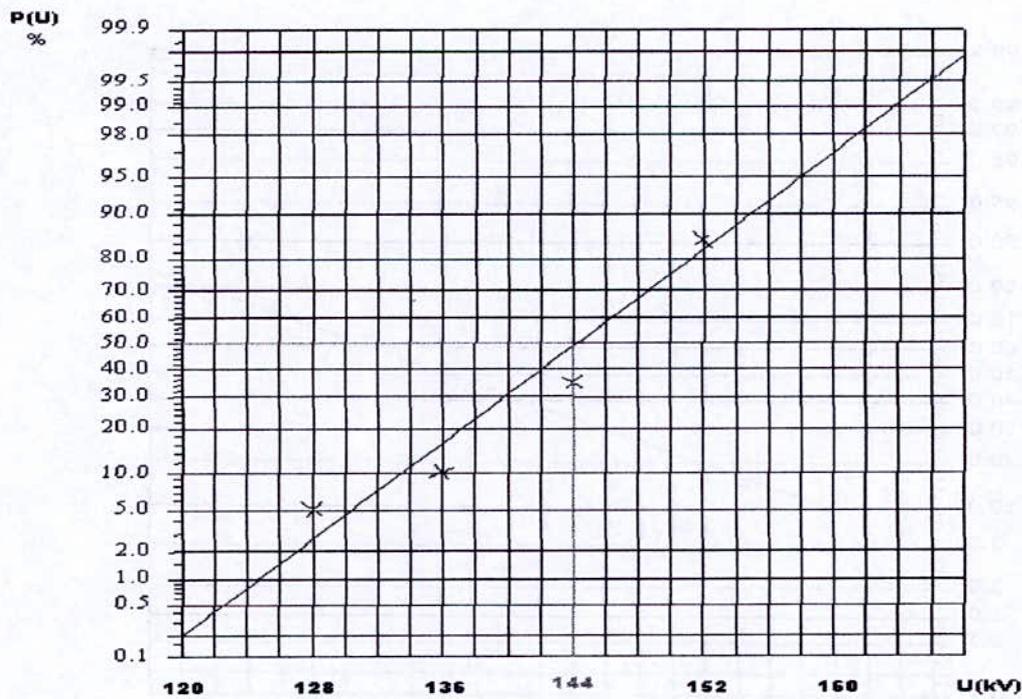


Fig.V.3. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=8\text{cm}$  (polarité négative)

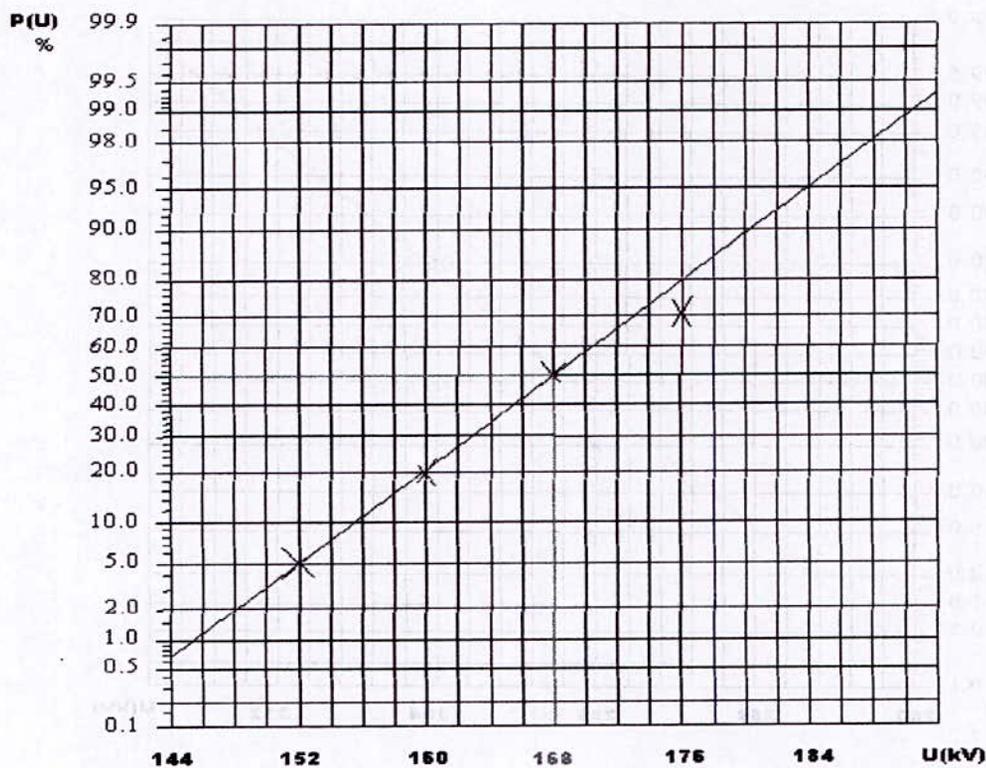


Fig.V.4. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=16\text{cm}$  (polarité négative)

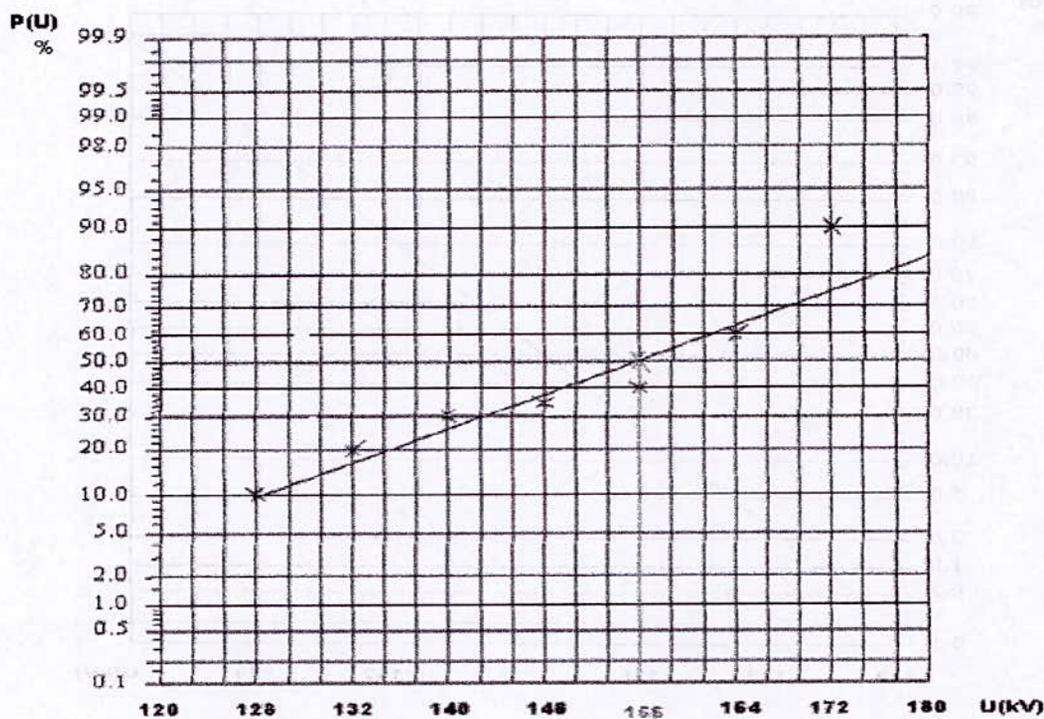


Fig.V.5. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=24\text{cm}$  (polarité négative)

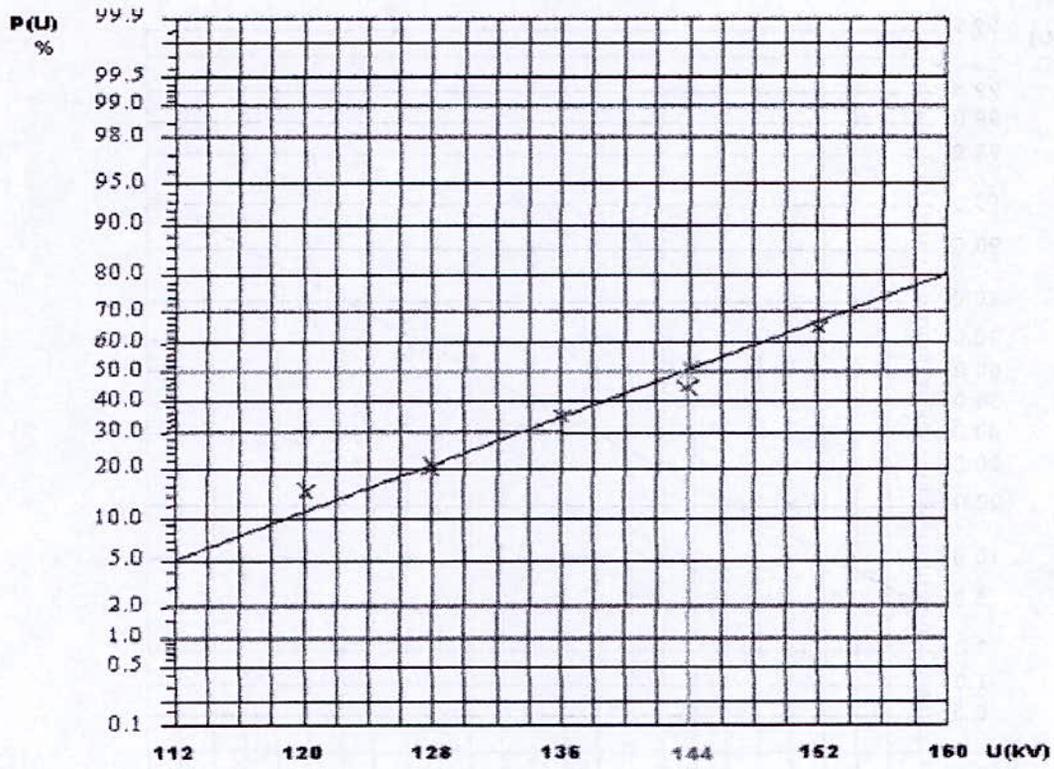


Fig.V.6. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=32\text{cm}$  (polarité négative)

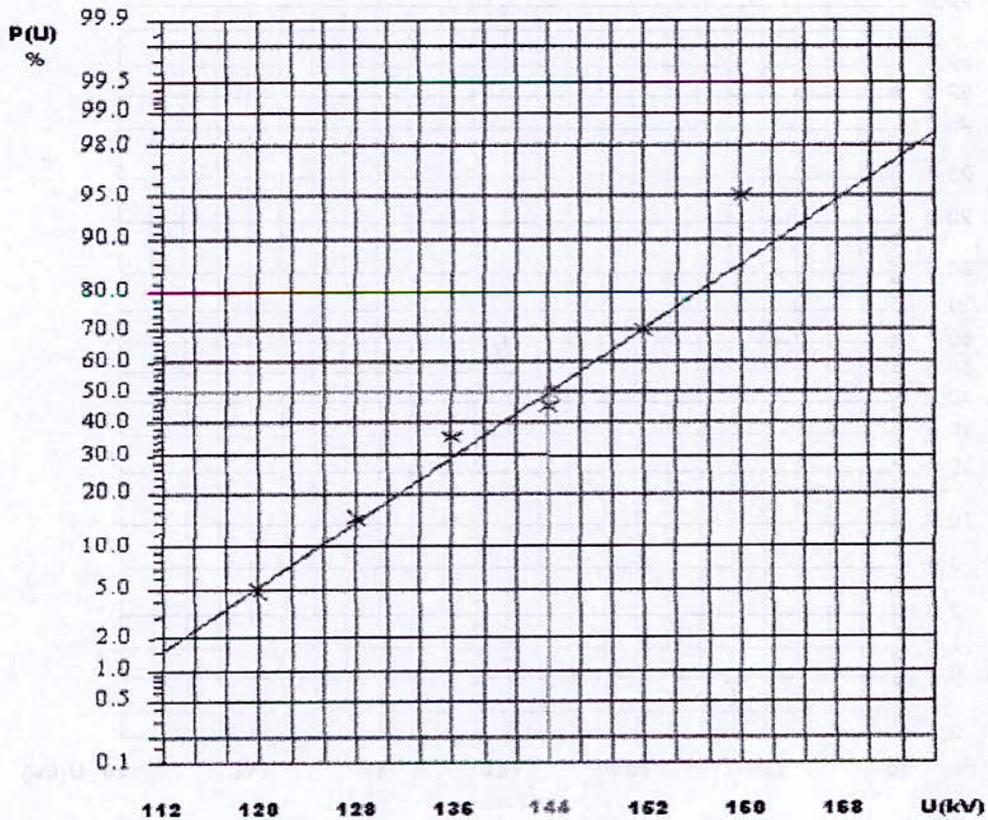


Fig.V.7. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=40\text{cm}$  (polarité négative)

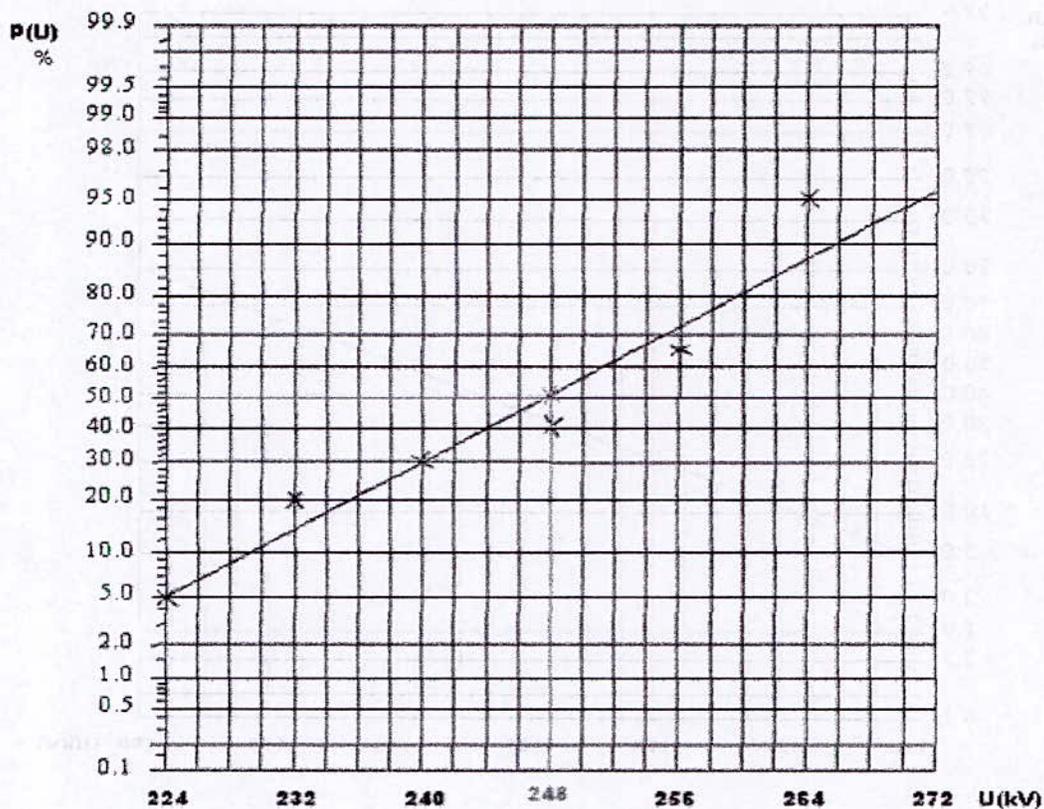


Fig.V.8. Détermination de  $U_{50\%}$  pour modèle propre (polarité positive)

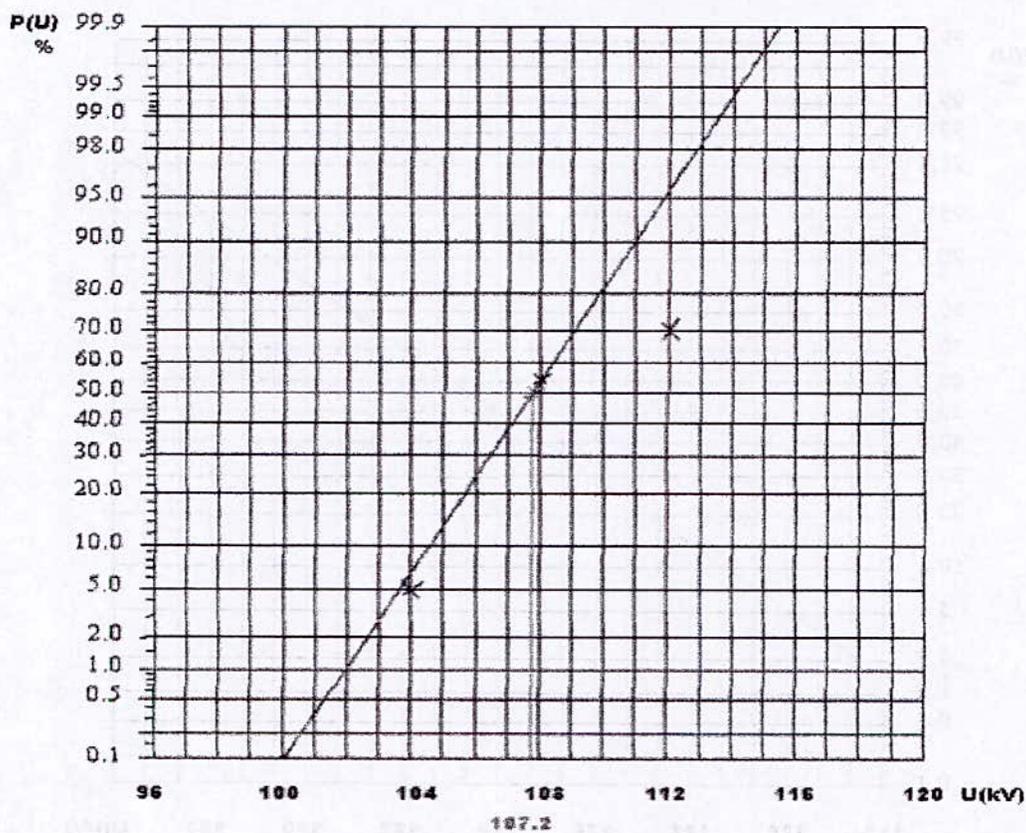


Fig.V.9. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=8\text{cm}$  (polarité positive)

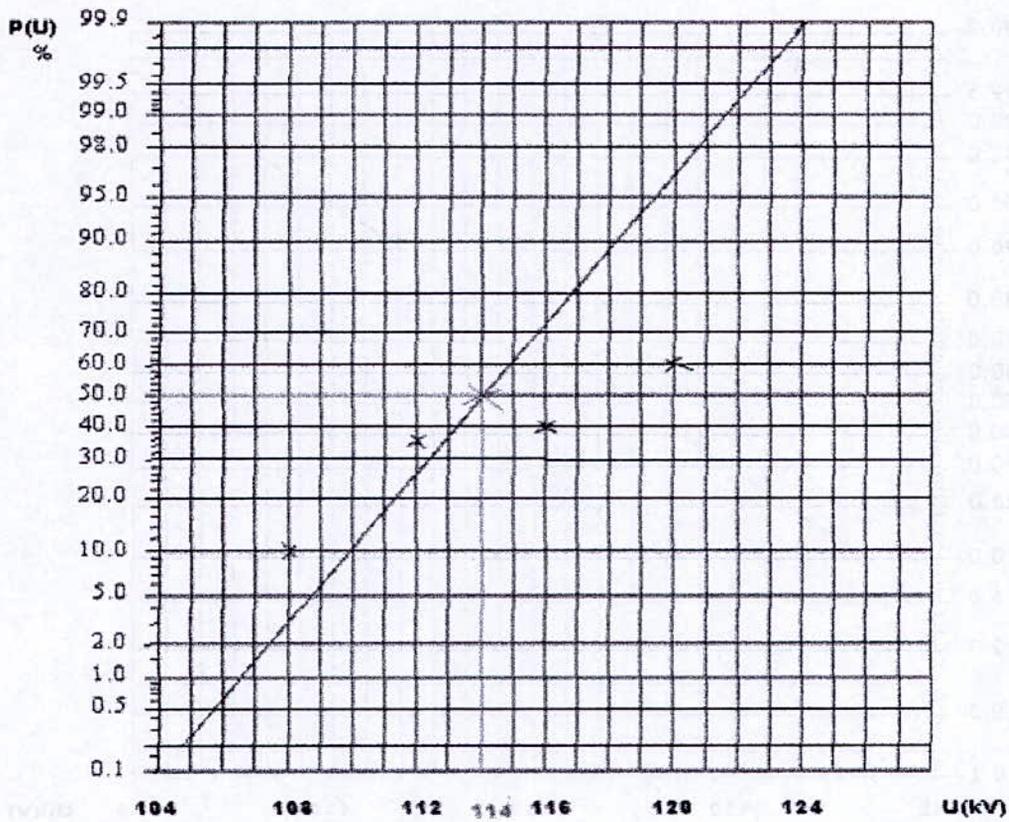


Fig.V.10. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=16\text{cm}$  (polarité positive)

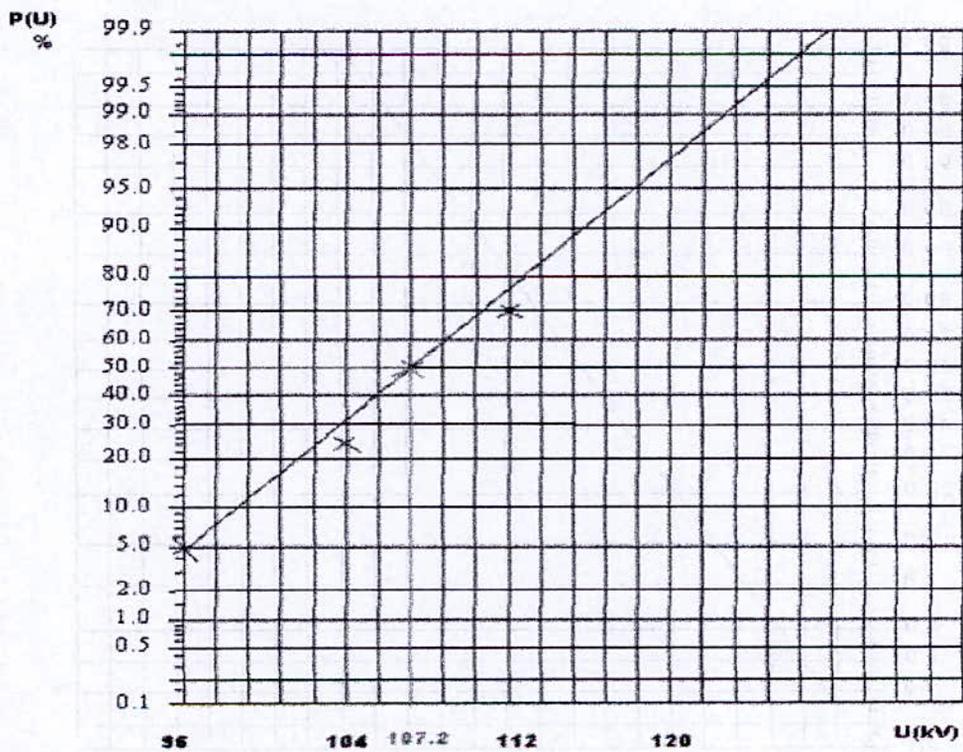


Fig.V.11. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=24\text{cm}$  (polarité positive)

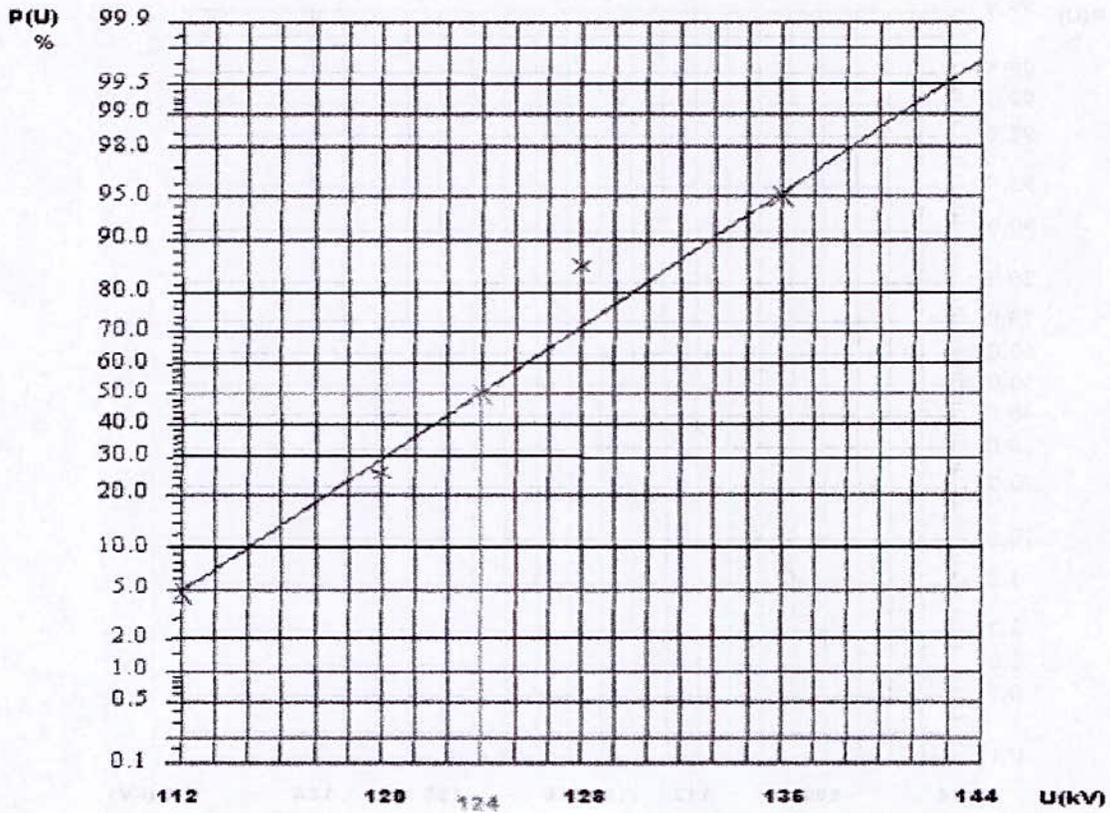


Fig.V.12. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=32$ cm (polarité positive)

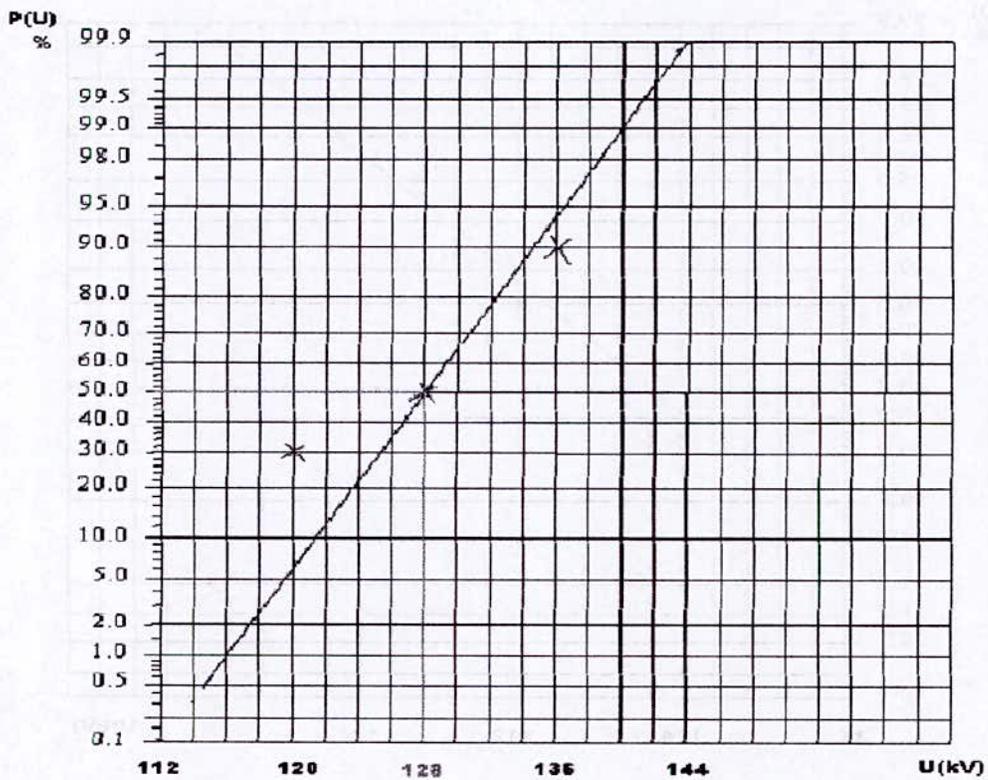


Fig.V.13. Détermination de  $U_{50\%}$  pour  $L=40$ cm (polarité positive)

### V.2.3.2.2.1. Influence de la largeur des couches polluantes :

Dans les figures (V.14 et V.15), nous présentons la variation de la tension  $U_{50\%}$  en fonction de la largeur de la pollution, pour différent temps entre deux chocs et pour les deux polarités. Avec l'augmentation de la largeur des couches polluantes, ces deux figures montrent que la tension  $U_{50\%}$  chute brusquement à la moitié de sa valeur initiale, et ce entre les largeurs 0 et 8 cm. Au delà de 8 cm, la tension  $U_{50\%}$  reste pratiquement invariante.

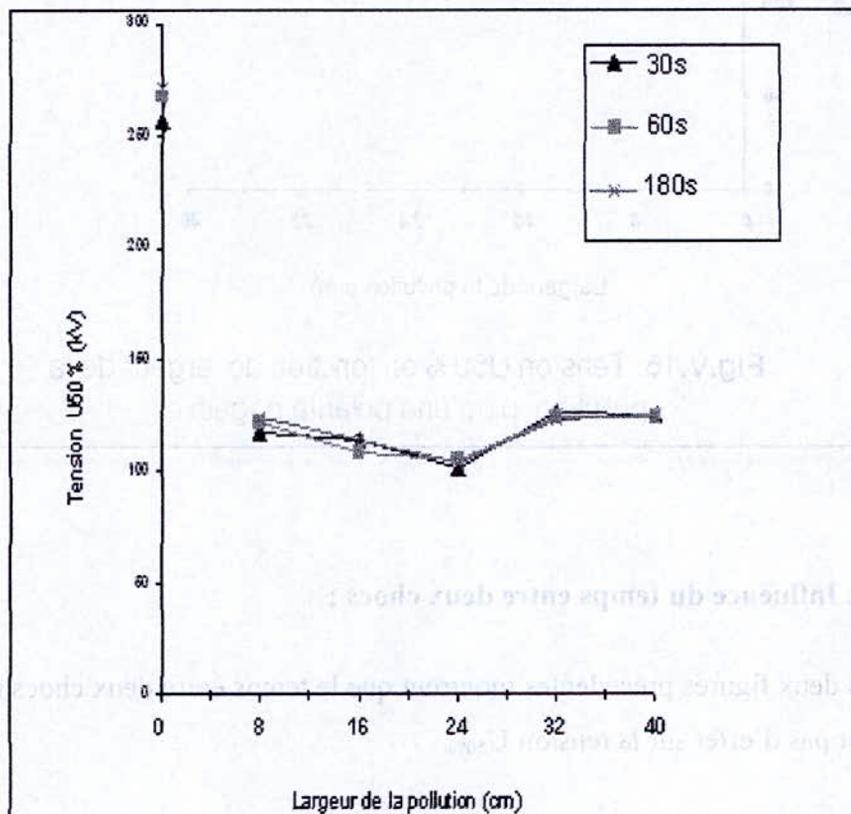
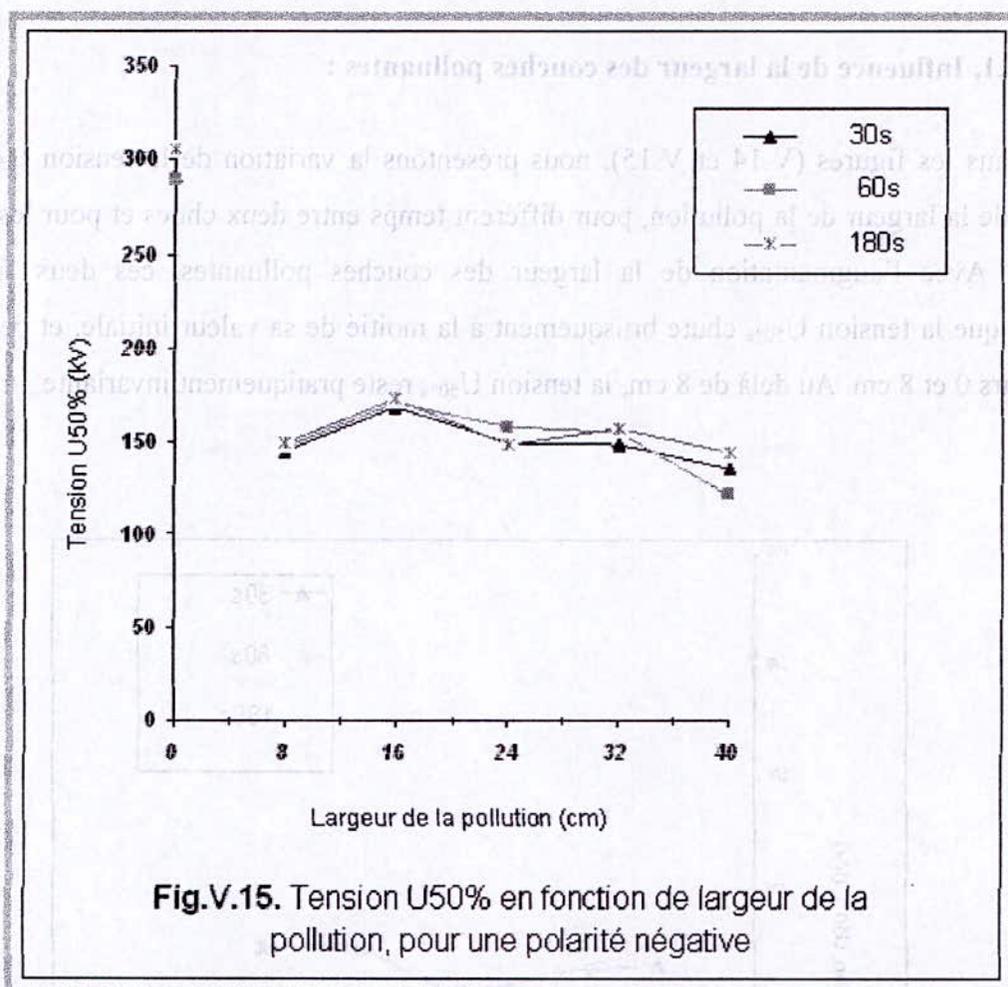


Fig.V.14. Tension  $U_{50\%}$  en fonction de la largeur de la pollution, pour une polarité positive



#### V.2.3.2.2.2. Influence du temps entre deux chocs :

Les deux figures précédentes montrent que le temps entre deux chocs n'a pratiquement pas d'effet sur la tension  $U_{50\%}$ .

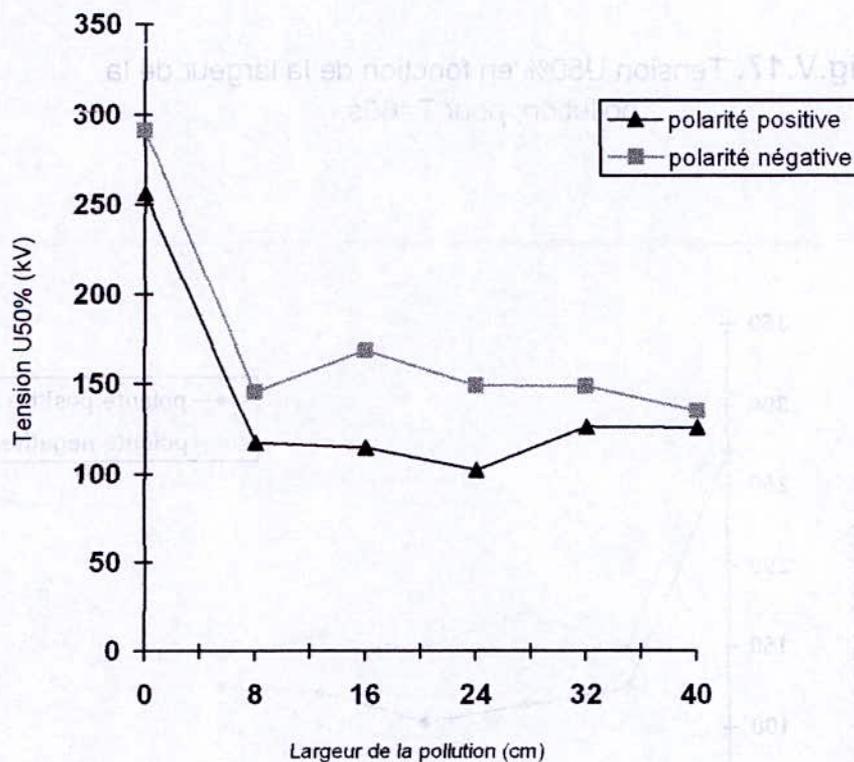
#### V.2.3.2.2.3. Influence de la polarité :

Dans le cas d'une source de tension impulsionnelle, la polarité joue également un rôle non négligeable dans le comportement des isolateurs. Divers essais ont, en effet, montré que les tenues en polarité positive constituent la contrainte la plus sévère pour les réseaux électriques à très haute tension [LER 84].

Certains auteurs ont toutefois obtenu des résultats contraires concernant la tenue de certains types d'isolateurs [ZAF 86]. D'autres travaux, concernant la pollution par dépôts de

glace, ont confirmé également que la polarité négative constitue le cas le plus critique [LER 84].

Concernant nos essais sur le modèle de laboratoire, sous tension impulsionnelle (générateur de choc), et en comparant les tensions  $U_{50\%}$  obtenues expérimentalement pour les deux polarités (positive et négative), les figures (V.16 à V.18), montrent, que pour une même largeur des couches en papier aluminium, la tension  $U_{50\%}$  est plus élevée dans le cas d'une polarité négative, et ce quelque soit le temps entre deux chocs. Nous constatons, par ailleurs que les tensions obtenues pour les deux polarités sont très proches pour la plus grande largeur (40cm) des couches polluantes.



**Fig.V.16.** Tension  $U_{50\%}$  en fonction de la largeur de la pollution, pour  $T=30s$

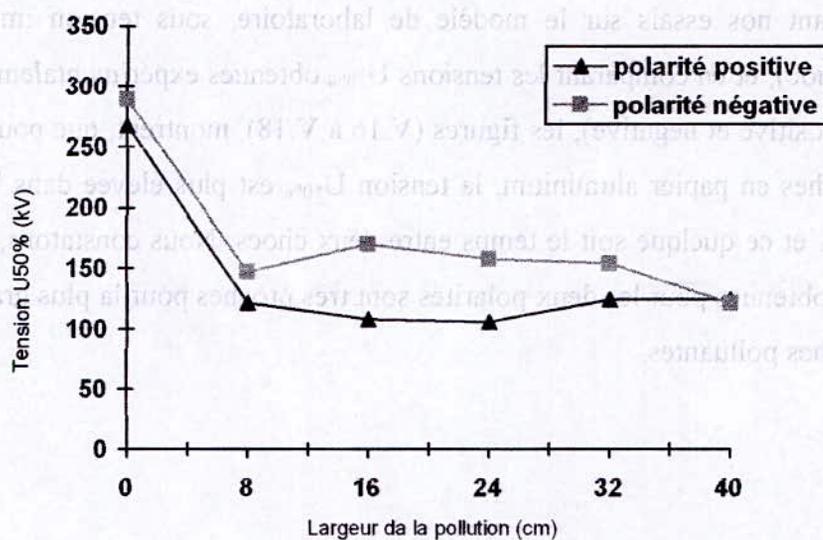


Fig.V.17. Tension U50% en fonction de la largeur de la pollution, pour T=60s

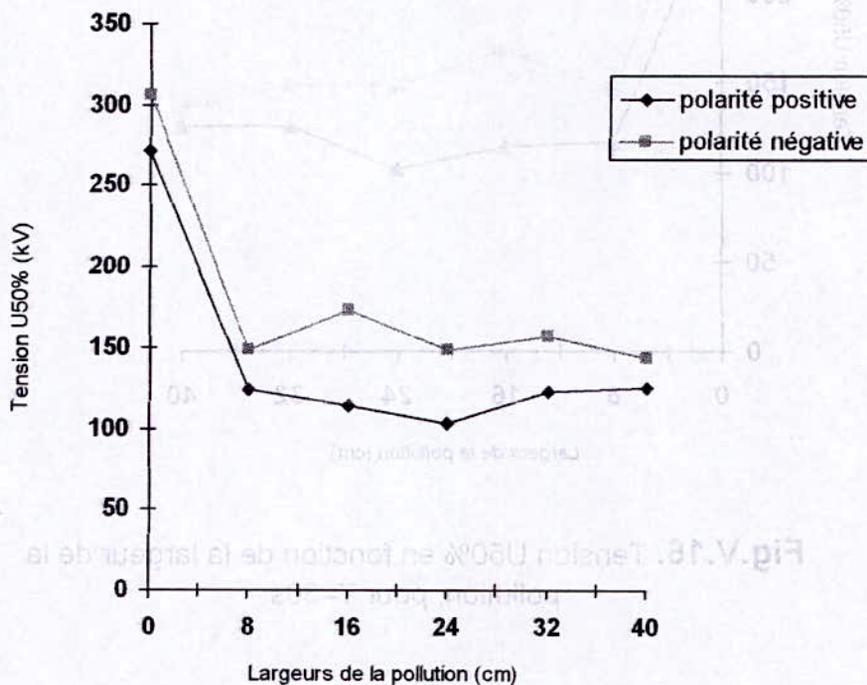


Fig.V.18. Tension U50% en fonction de la largeur de la pollution, pour T=180s

### V.2.3.3. Calcul du champ électrique :

Afin de calculer le champ électrique, nous avons utilisé le logiciel FEMM. Ce dernier est une suite des programmes permettant de donner la répartition du champ électrique en deux dimensions.

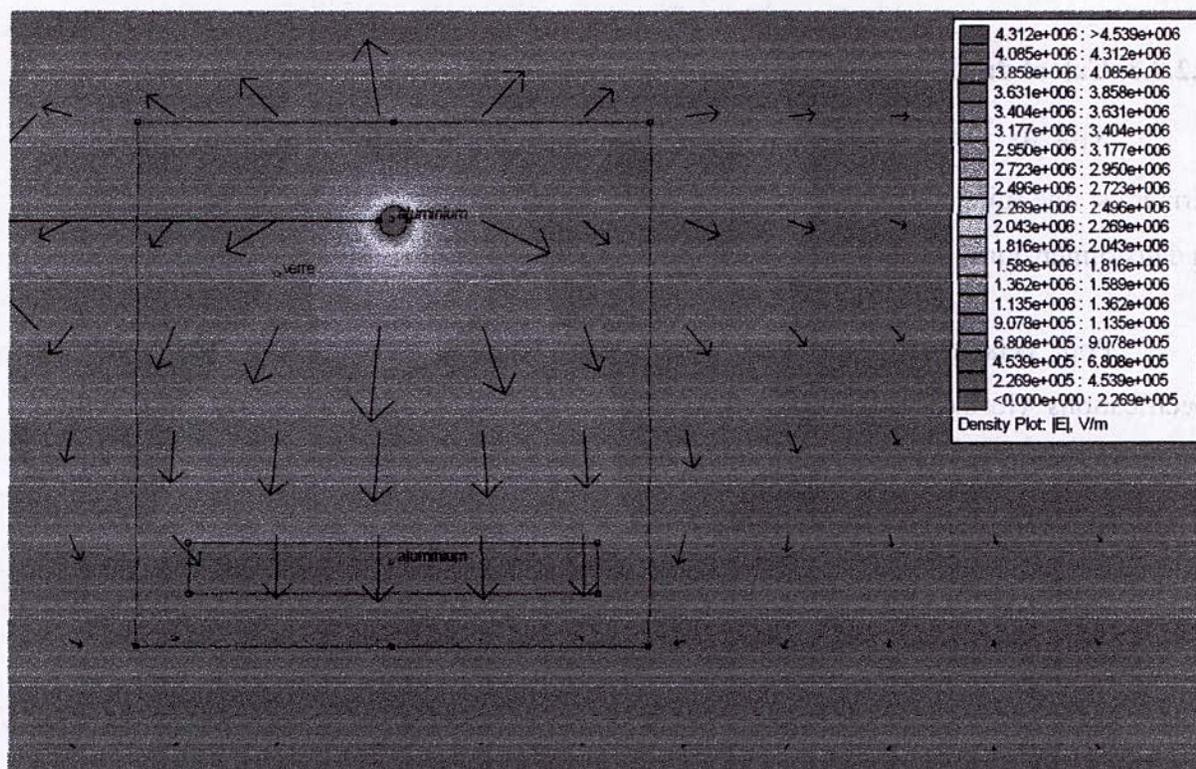
Pour cela, nous avons introduit, dans ce logiciel, notre modèle avec toutes ses spécifications (formes et nature des électrodes, nature et dimensions de la pollution, permittivité des différents milieux, tension appliquée, conditions aux limites,...).

#### V.2.3.3.1. Interprétation des résultats :

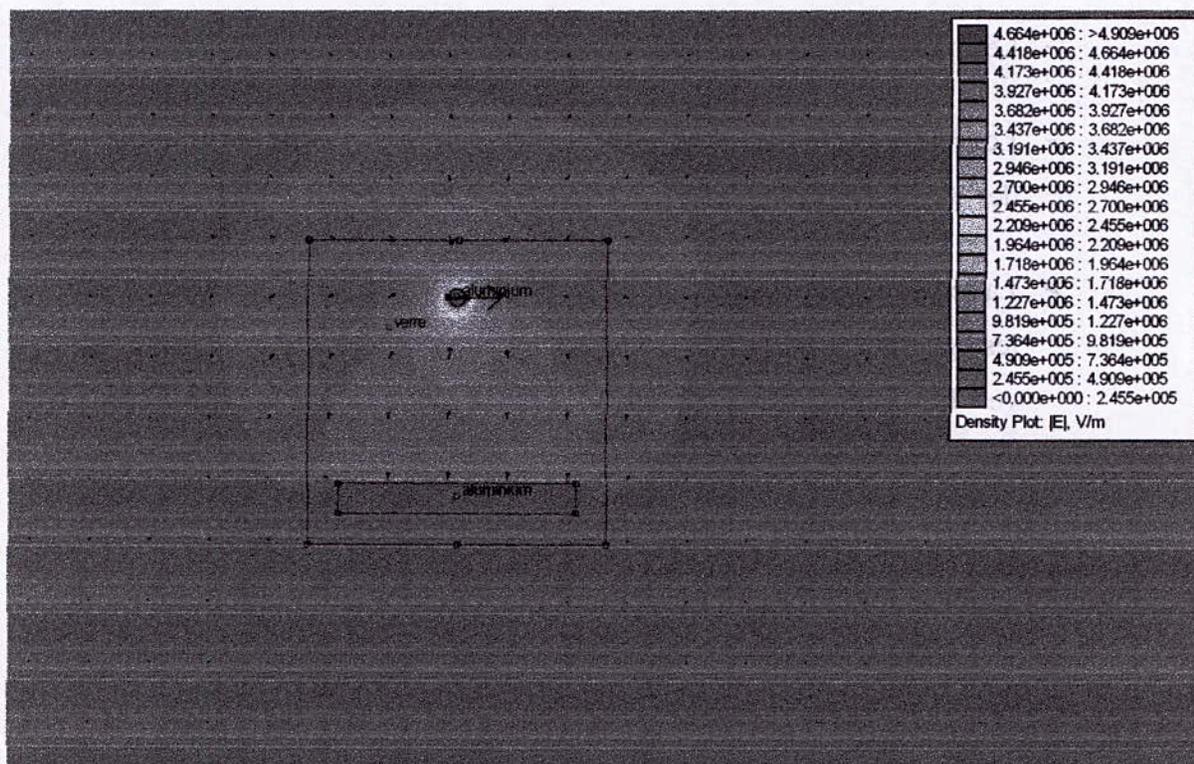
##### V.2.3.3.1.1. Répartition du champ électrique sur la plaque :

Les figures (V.20 à V.24) nous montrent l'influence de la largeur de la pollution et la polarité sur le champ électrique, pour les différents niveaux de tension appliqués. Il ressort de ces caractéristiques les remarques suivantes :

- Le champ électrique est intense à l'extrémité de l'électrode de haute tension.
- Le champ électrique est nul à l'intérieur des deux électrodes et à l'intérieur des couches de pollution, car le papier aluminium est un conducteur parfait.
- La répartition du champ dépend aussi de la polarité. Pour la polarité positive, les lignes du champ sont divergentes (orientés de l'électrode de haute tension vers les extrémités de la plaque), ce qui est contraire pour la polarité négative où les lignes de champ se dirigent vers l'électrode de haute tension.
- Le champ est réduit dans les zones propres 3 et 5, vu leurs faibles dimensions longitudinales. Dans la zone propre 1, le champ électrique diminue en allant de la couche polluante 2 vers l'électrode de terre.

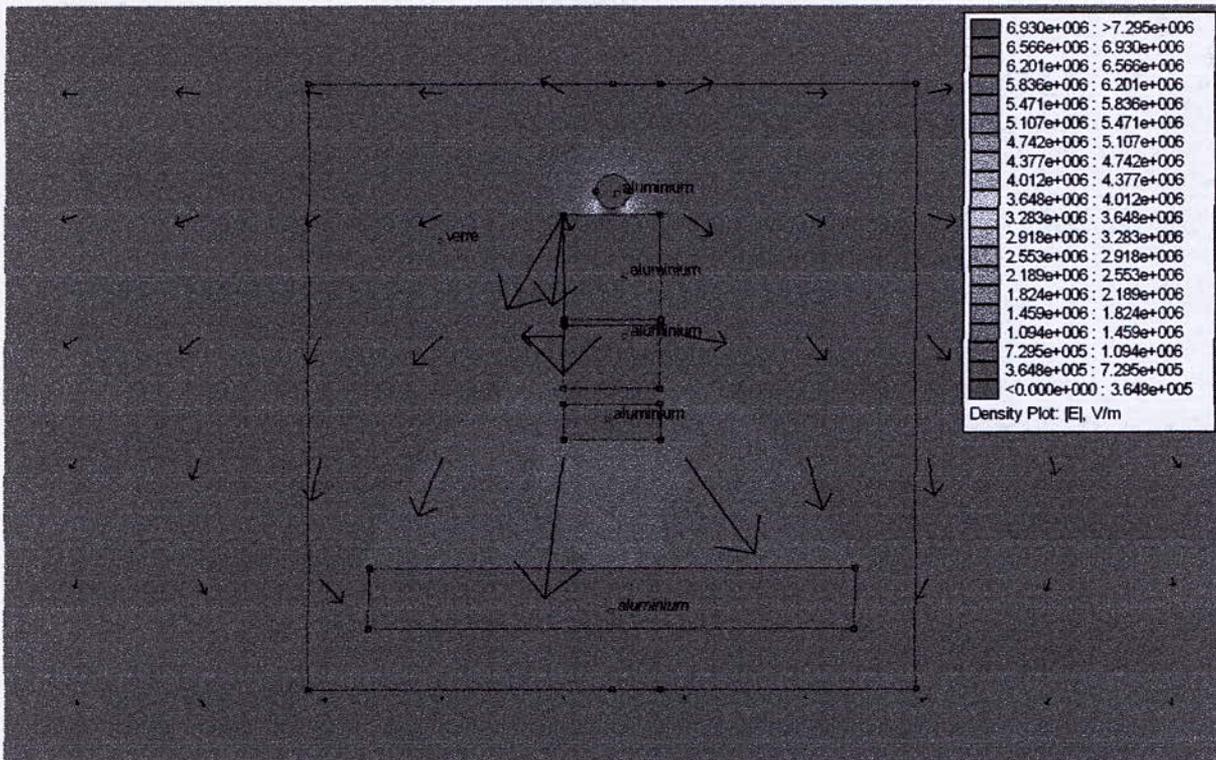


Polarité positive,  $U_{50\%} = 267.6$  kV

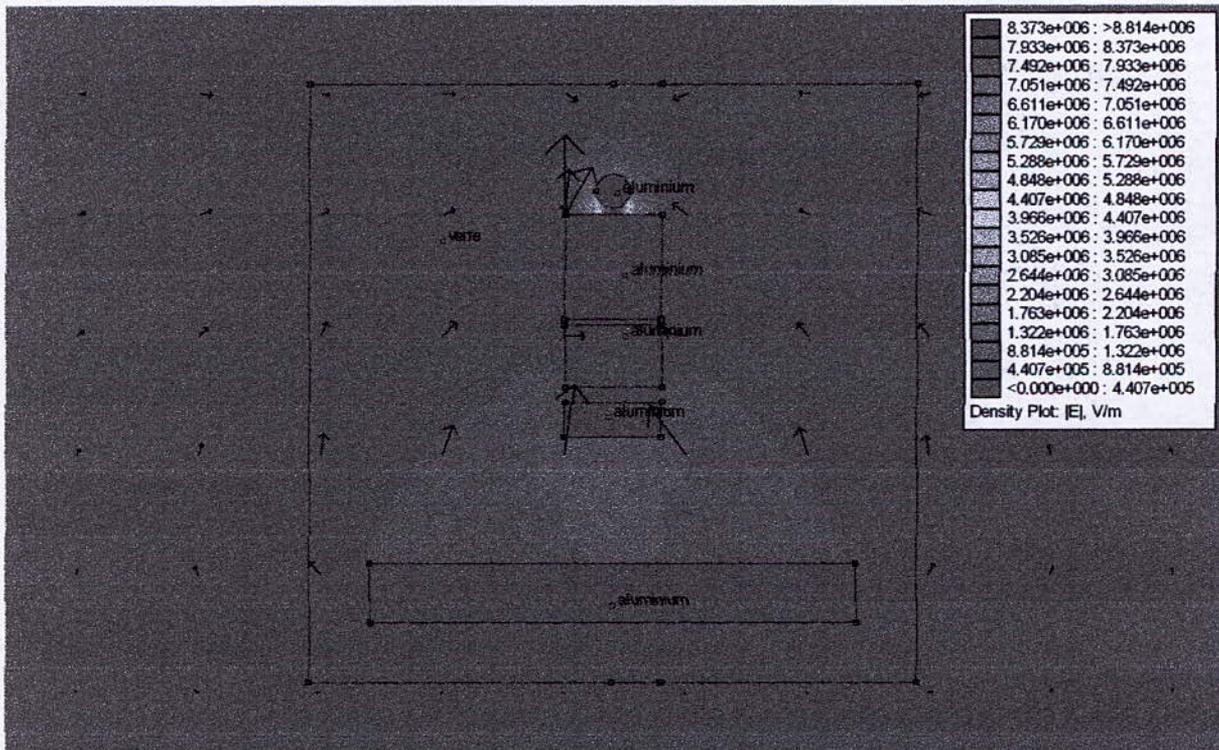


Polarité négative,  $U_{50\%} = 289.44$  kV

Fig.V.19. Répartition du champ pour la plaque propre

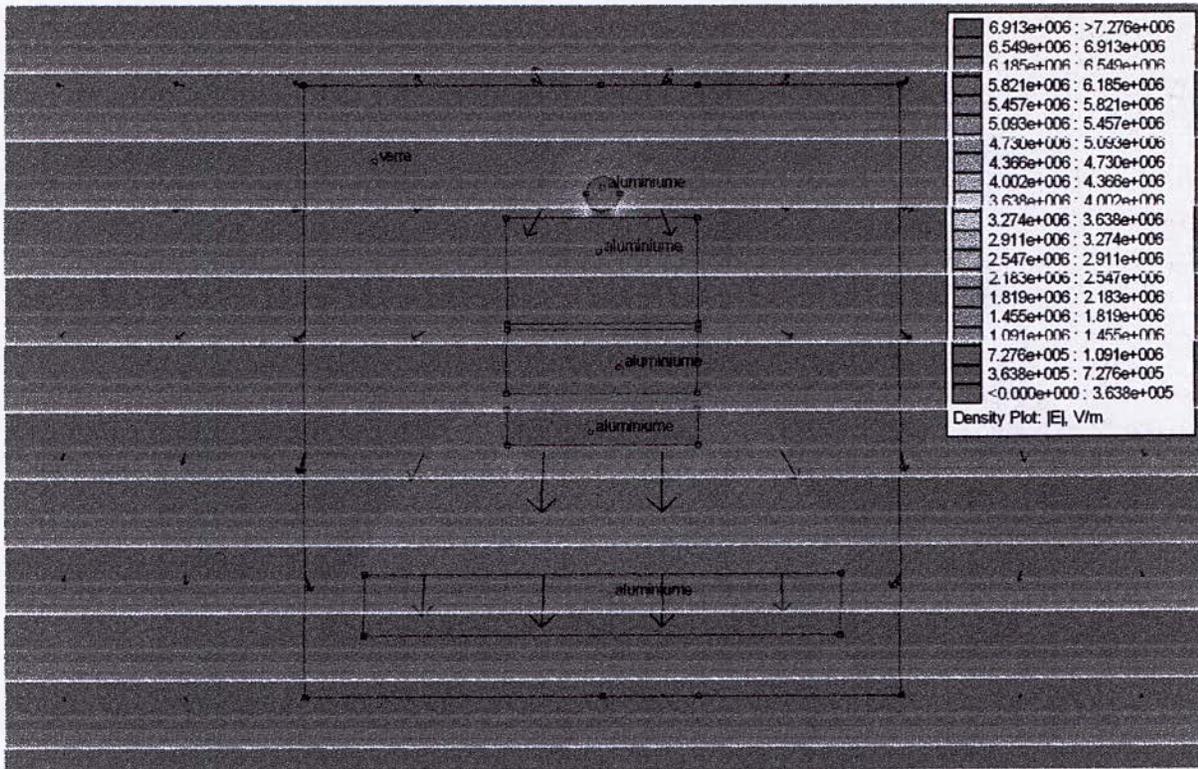


Polarité positive,  $U_{50\%}=121.7$  kV

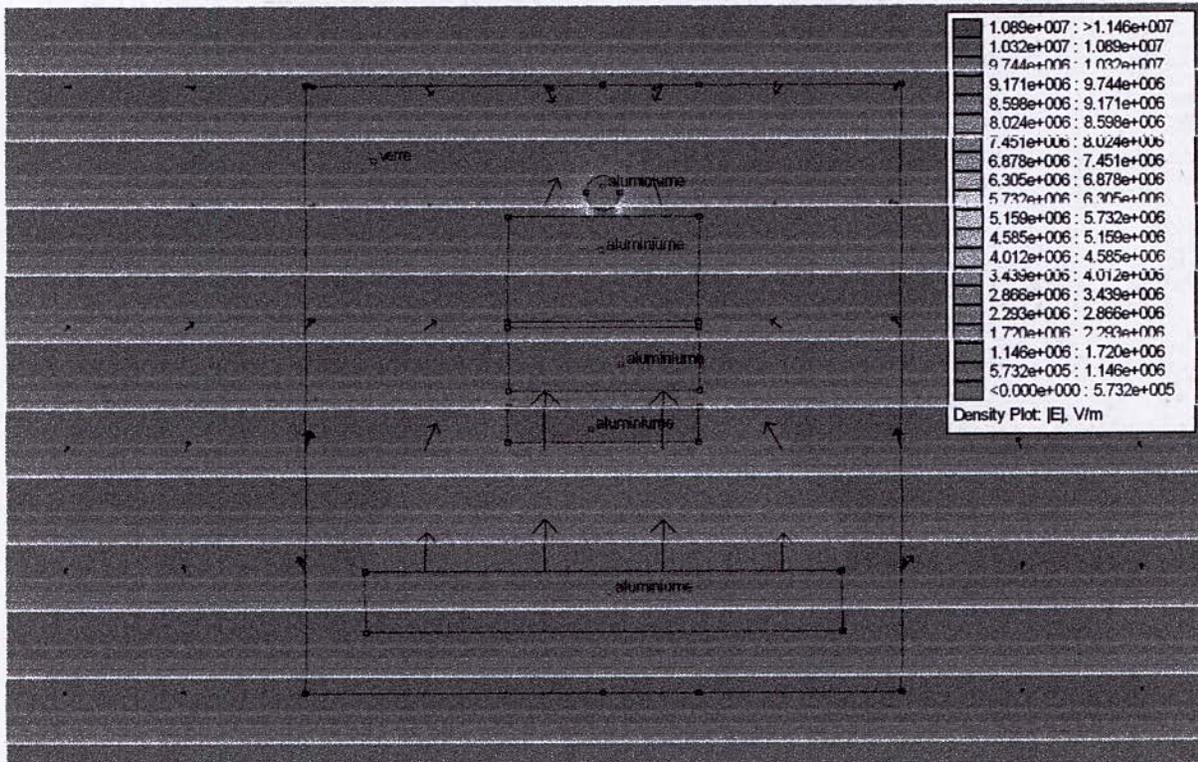


Polarité négative,  $U_{50\%}=147.04$  kV

Fig.V.20. Répartition du champ pour une largeur de la pollution de 8cm

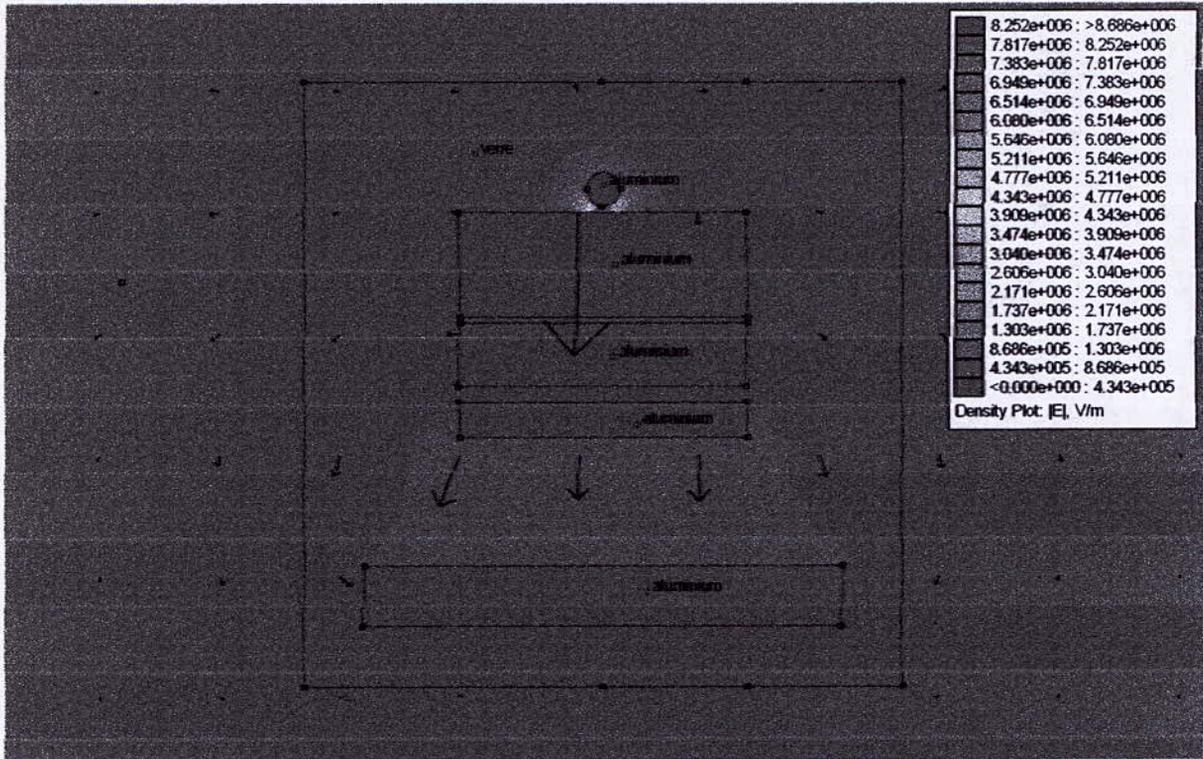


Polarité positive,  $U_{50\%}=108$  kV

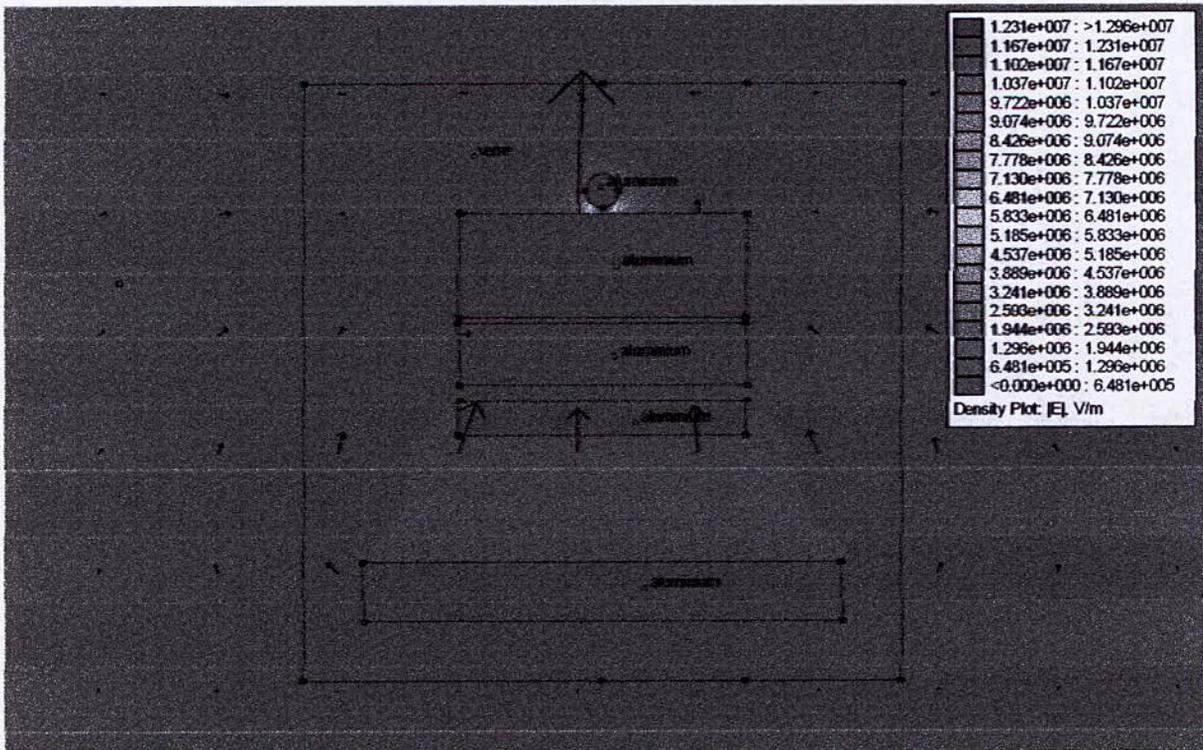


Polarité négative,  $U_{50\%}=170.15$  kV

Fig.V.21. Répartition du champ pour une largeur de la pollution de 16cm

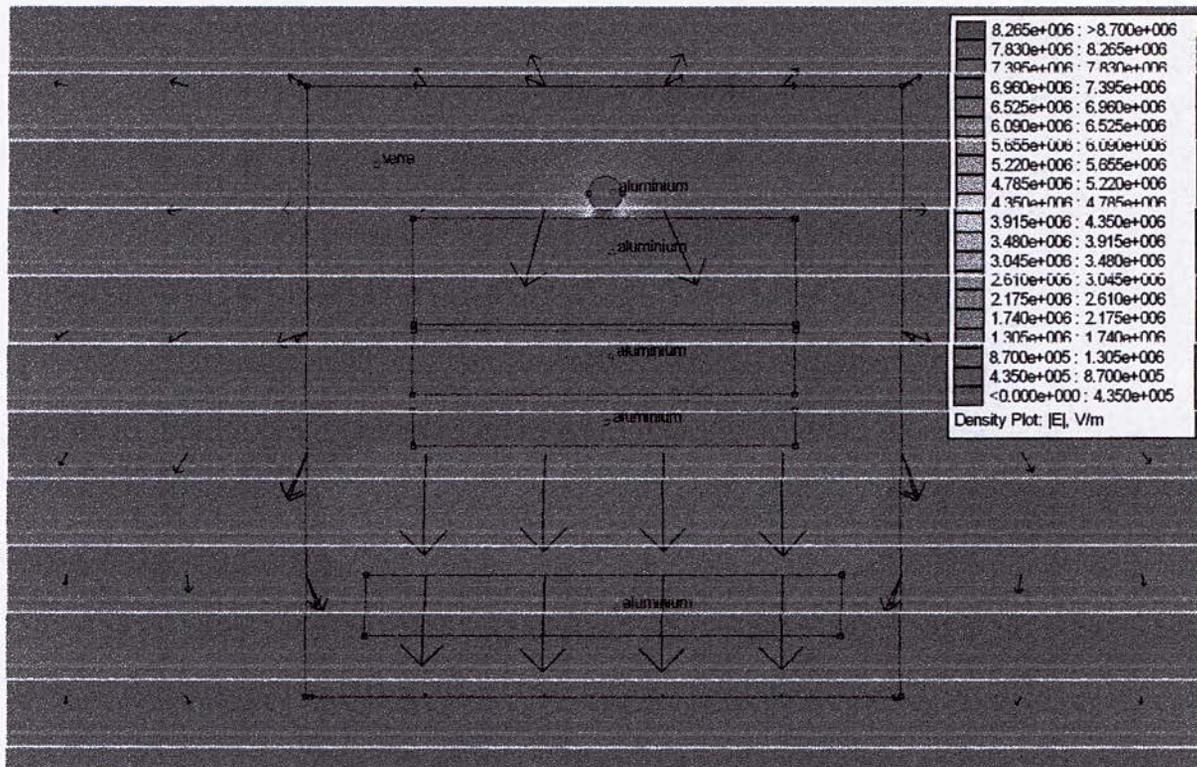


Polarité positive,  $U_{50\%}=105.6$  kV

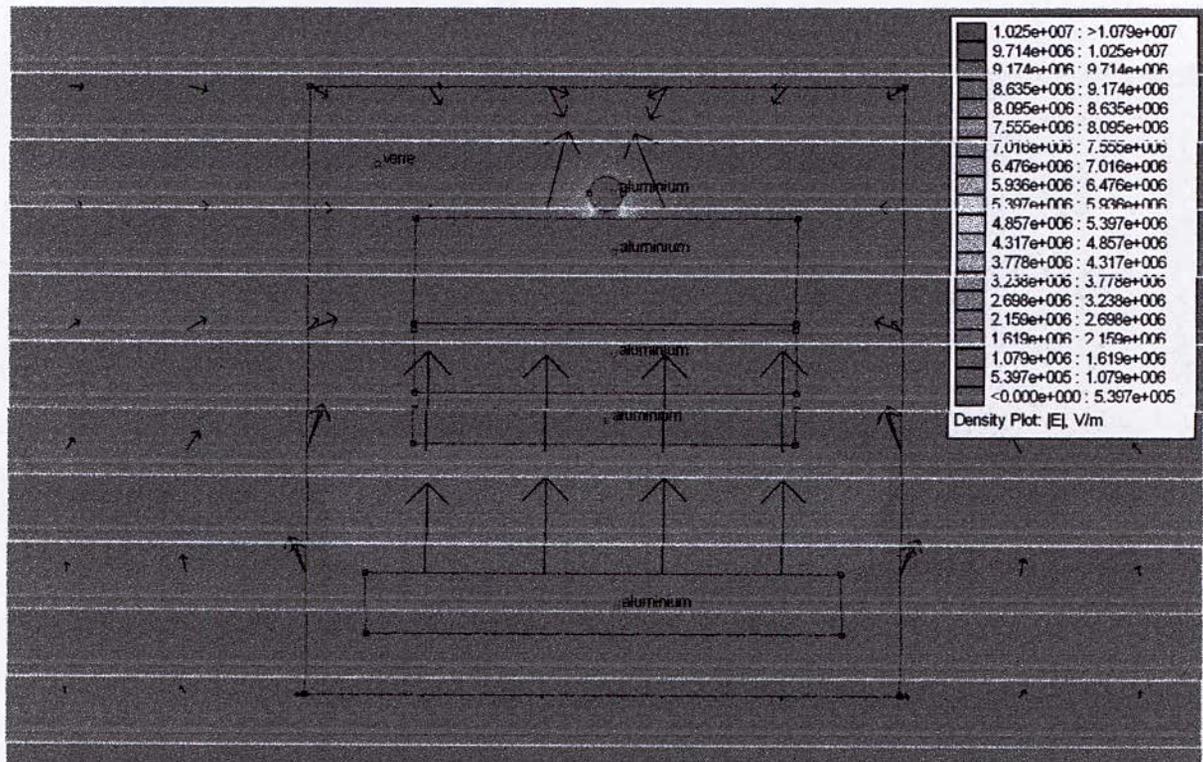


Polarité négative,  $U_{50\%}=157.6$  kV

Fig.V.22. Répartition du champ pour une largeur de la pollution de 24cm

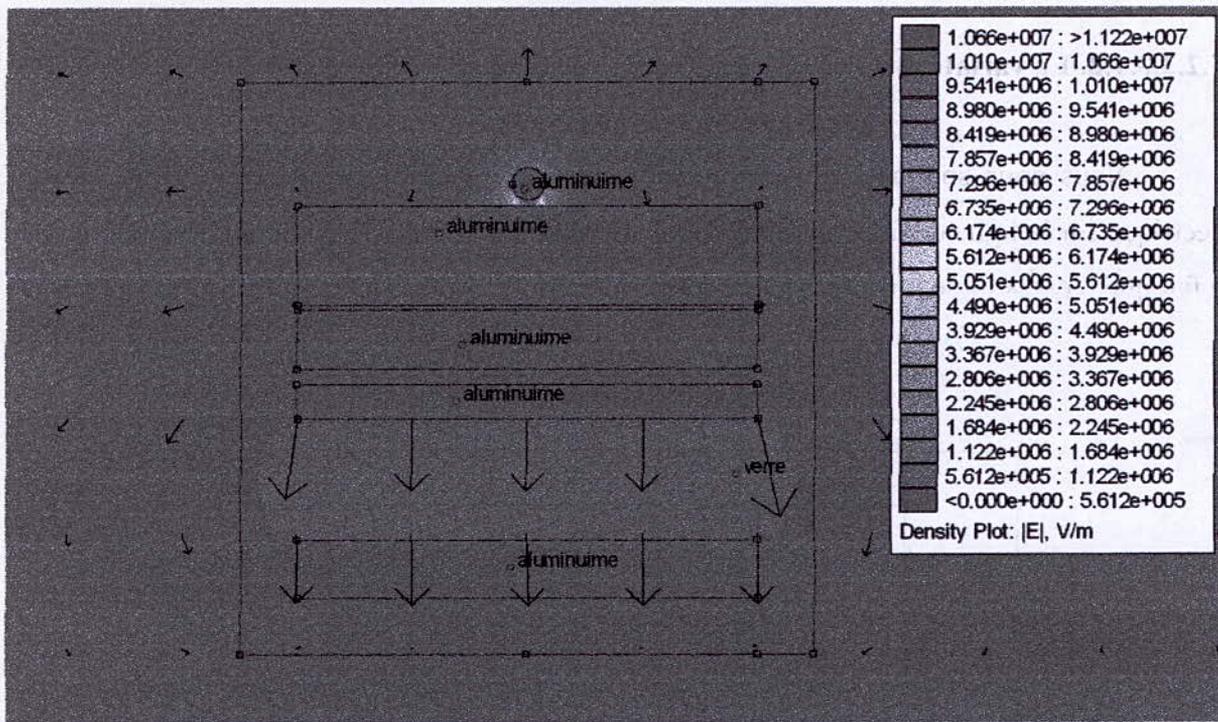


Polarité positive,  $U_{50\%} = 124.33$  kV

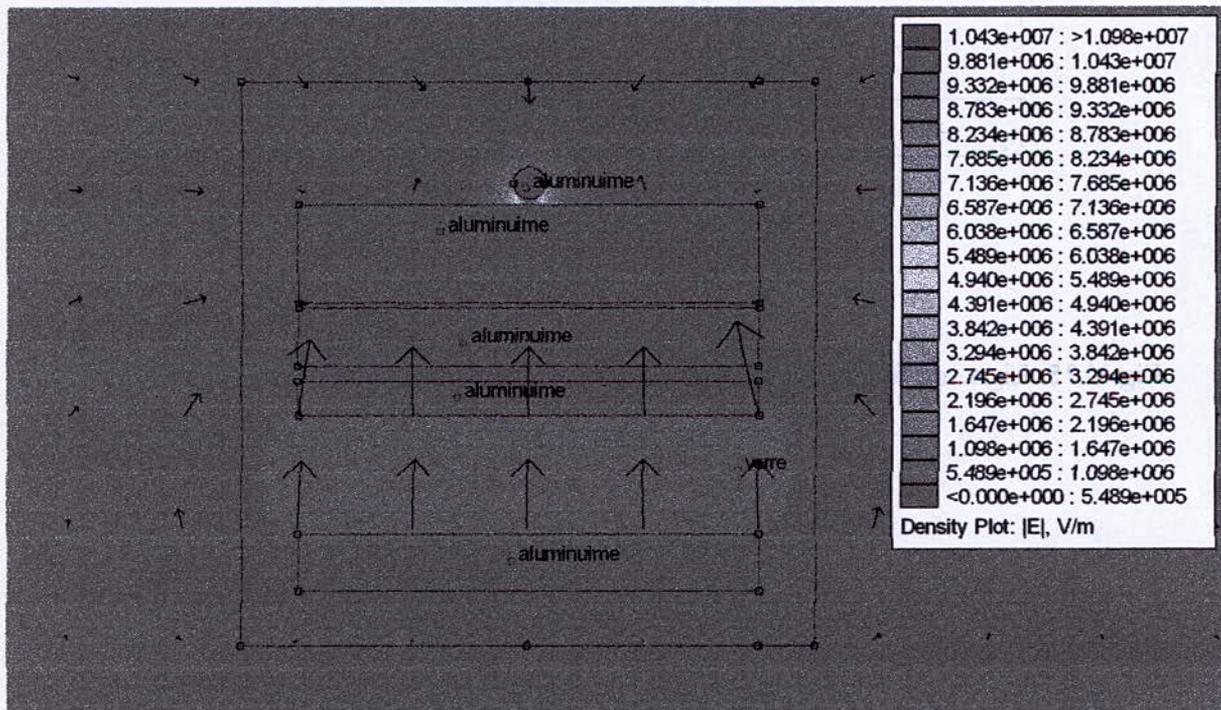


Polarité négative,  $U_{50\%} = 154.24$  kV

Fig.V.23. Répartition du champ pour une largeur de la pollution de 32cm



Polarité positive,  $U_{50\%}=124$  kV



Polarité négative,  $U_{50\%}=121.28$  kV

Fig.V.24. Répartition du champ pour une largeur de la pollution de 40cm

### V.2.3.3.1.2. La variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale :

Nous nous sommes, principalement, intéressé à l'étude de la variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, (ligne discontinue, Fig.V.25). Ce choix est justifié par le fait que c'est la ligne où le champ est intense.

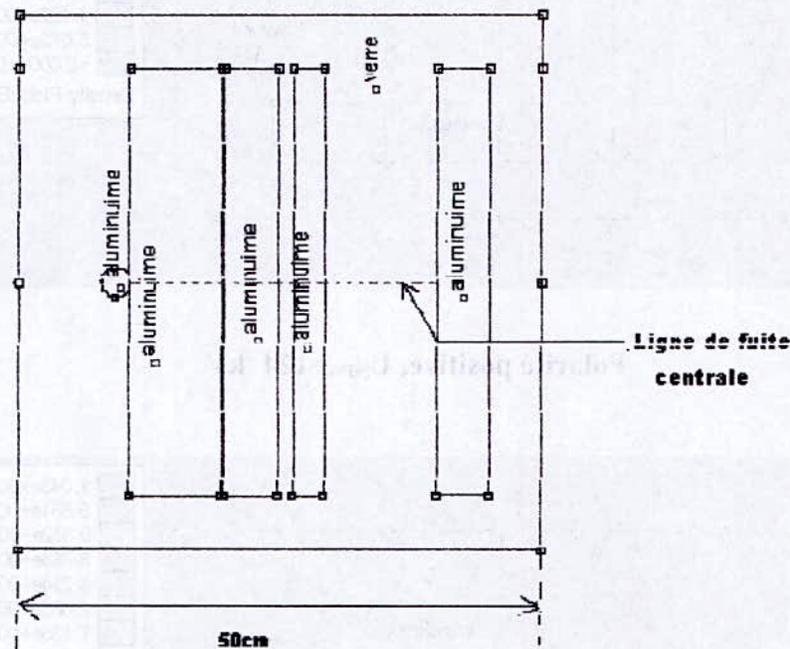
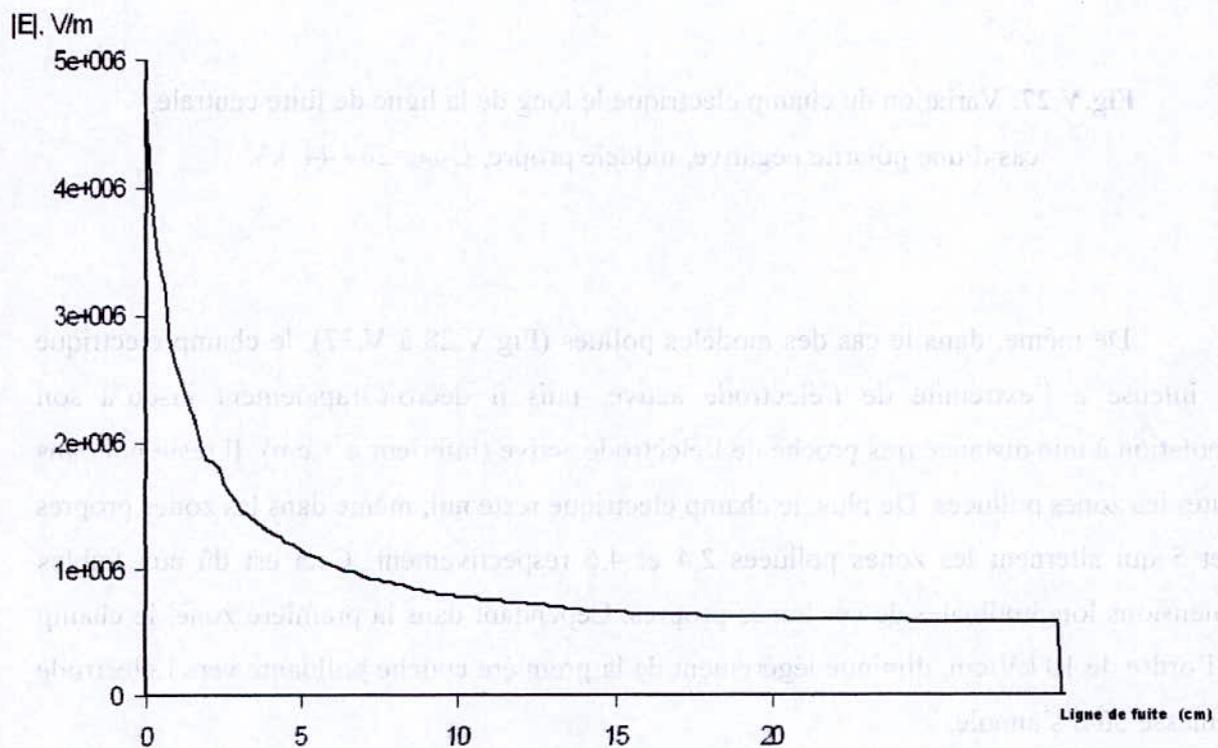
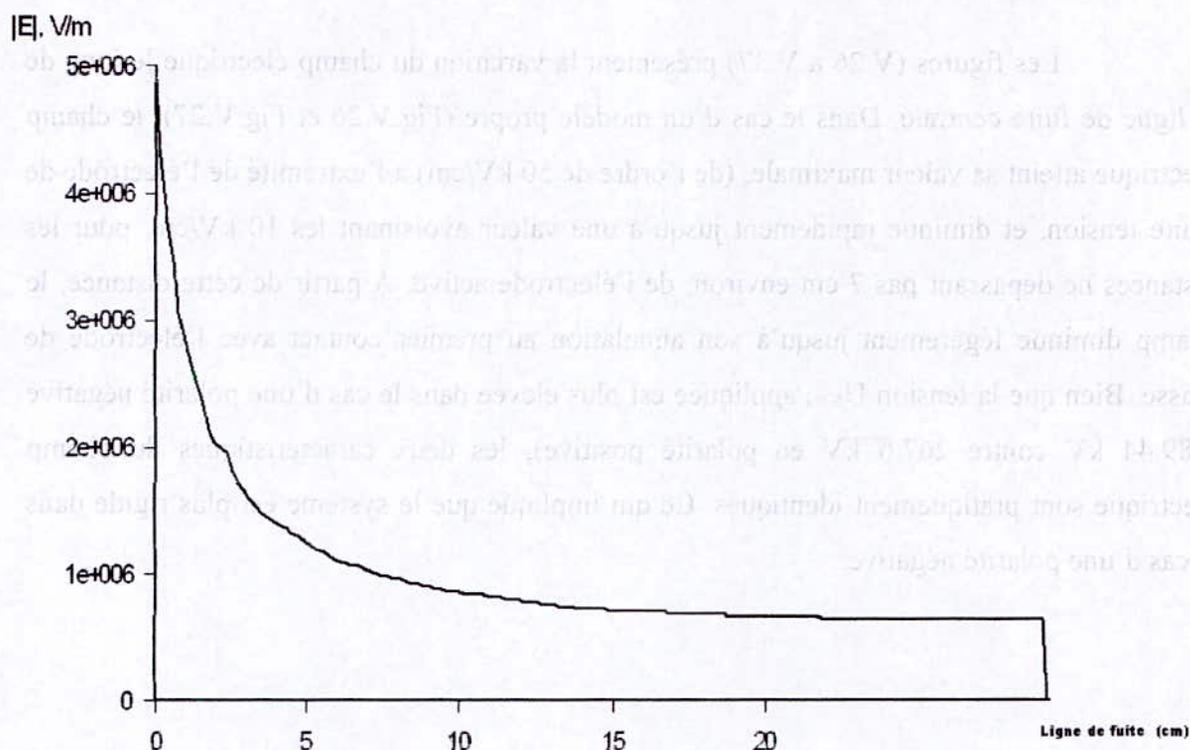


Fig.V.25. Ligne de fuite pour la détermination de la variation du champ électrique

Les figures (V.26 à V.37) présentent la variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale. Dans le cas d'un modèle propre (Fig.V.26 et Fig.V.27), le champ électrique atteint sa valeur maximale, (de l'ordre de 50 kV/cm) à l'extrémité de l'électrode de haute tension, et diminue rapidement jusqu'à une valeur avoisinant les 10 kV/cm, pour les distances ne dépassant pas 7 cm environ, de l'électrode active. A partir de cette distance, le champ diminue légèrement jusqu'à son annulation au premier contact avec l'électrode de masse. Bien que la tension  $U_{50\%}$  appliquée est plus élevée dans le cas d'une polarité négative (289.44 kV contre 267.6 kV en polarité positive), les deux caractéristiques du champ électrique sont pratiquement identiques. Ce qui implique que le système est plus rigide dans le cas d'une polarité négative.



**Fig.V.26.** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale, cas d'une polarité positive, modèle propre,  $U_{50\%}=267.6$  kV



**Fig.V.27.** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale, cas d'une polarité négative, modèle propre,  $U_{50\%}=289.44$  kV

De même, dans le cas des modèles pollués (Fig.V.28 à V.37), le champ électrique est intense à l'extrémité de l'électrode active, puis il décroît rapidement jusqu'à son annulation à une distance très proche de l'électrode active (inférieur à 1 cm). Il reste nul dans toutes les zones polluées. De plus, le champ électrique reste nul, même dans les zones propres 3 et 5 qui alternent les zones polluées 2,4 et 4,6 respectivement. Ceci est dû aux faibles dimensions longitudinales de ces zones propres. Cependant dans la première zone, le champ de l'ordre de 10 kV/cm, diminue légèrement de la première couche polluante vers l'électrode de masse où il s'annule.

Nous observons également que le champ électrique est réduit à l'intérieur des électrodes et des couches de pollution. Ceci est évident, car l'aluminium est un très bon conducteur.

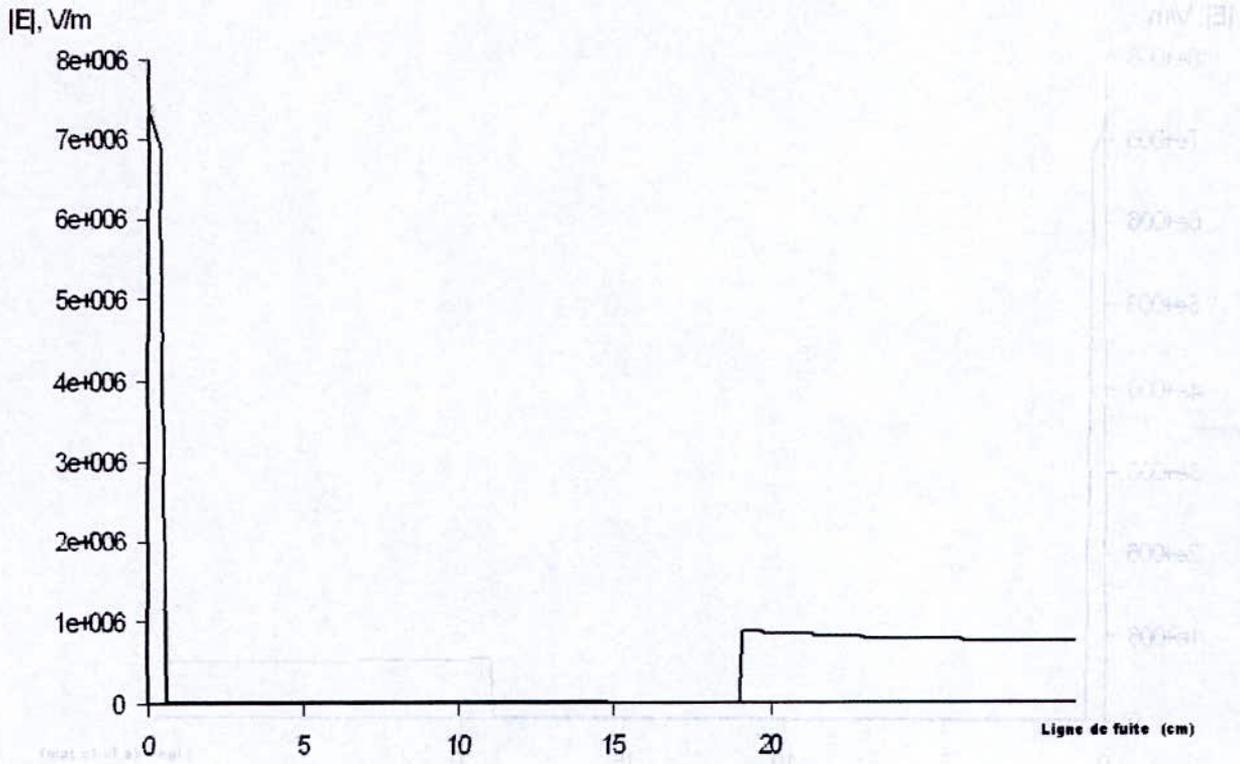


Fig.V.28. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle polluée,  $L=8\text{cm}$  cas d'une polarité positive,  $U_{50\%}=121.7\text{ kV}$

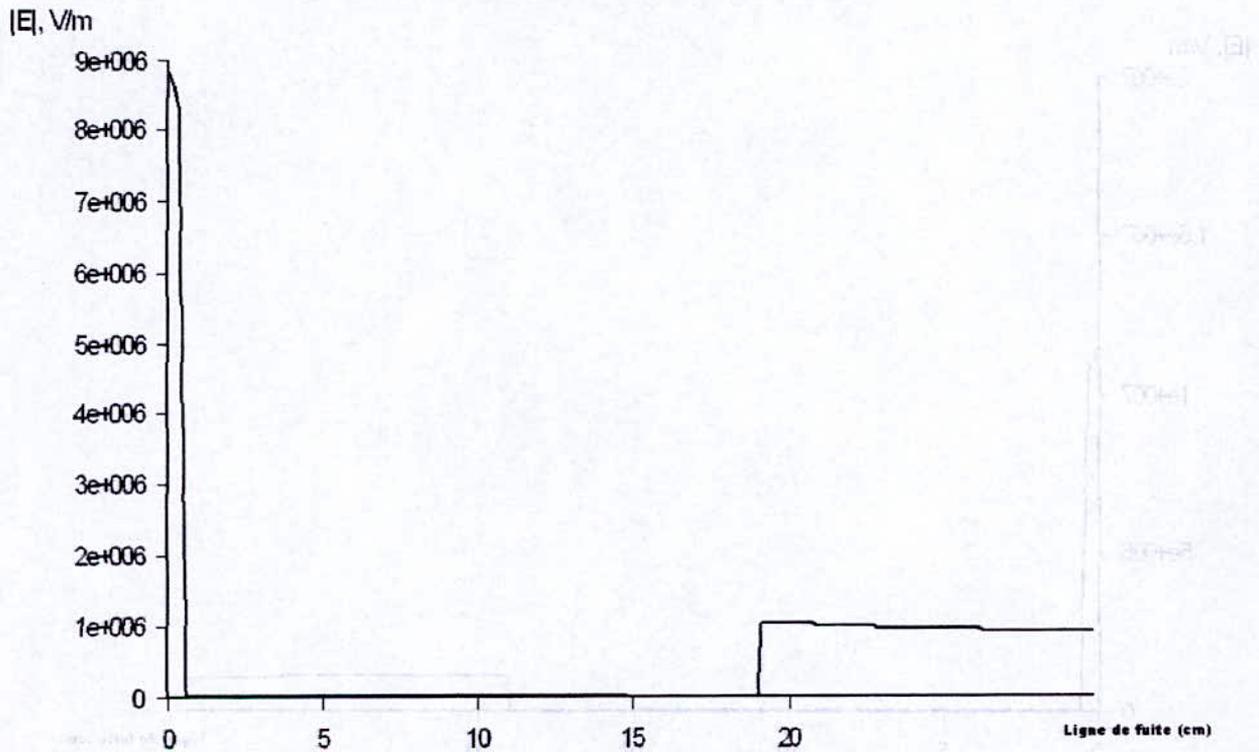


Fig.V.29. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué,  $L=8\text{cm}$  cas d'une polarité positive,  $U_{50\%}=147.04\text{ kV}$

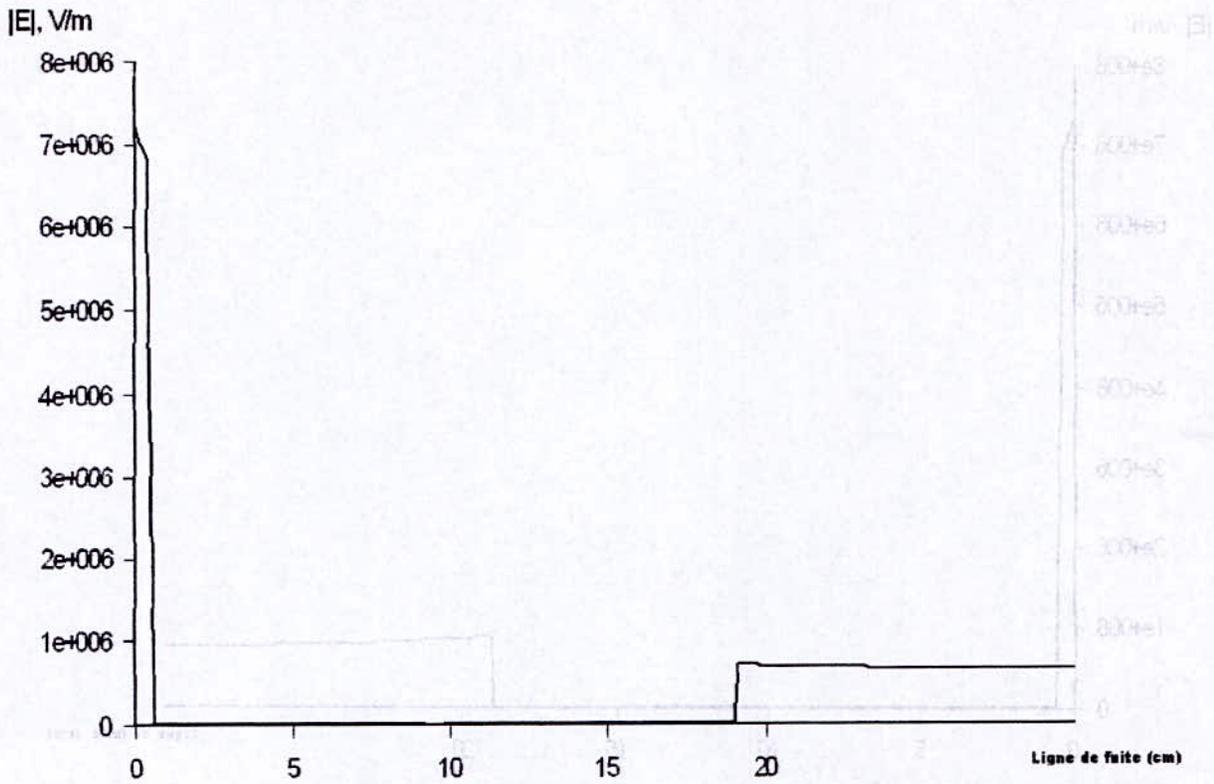


Fig.V.30. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué,  $L=16\text{cm}$  cas d'une polarité positive,  $U_{50\%}=108\text{ kV}$

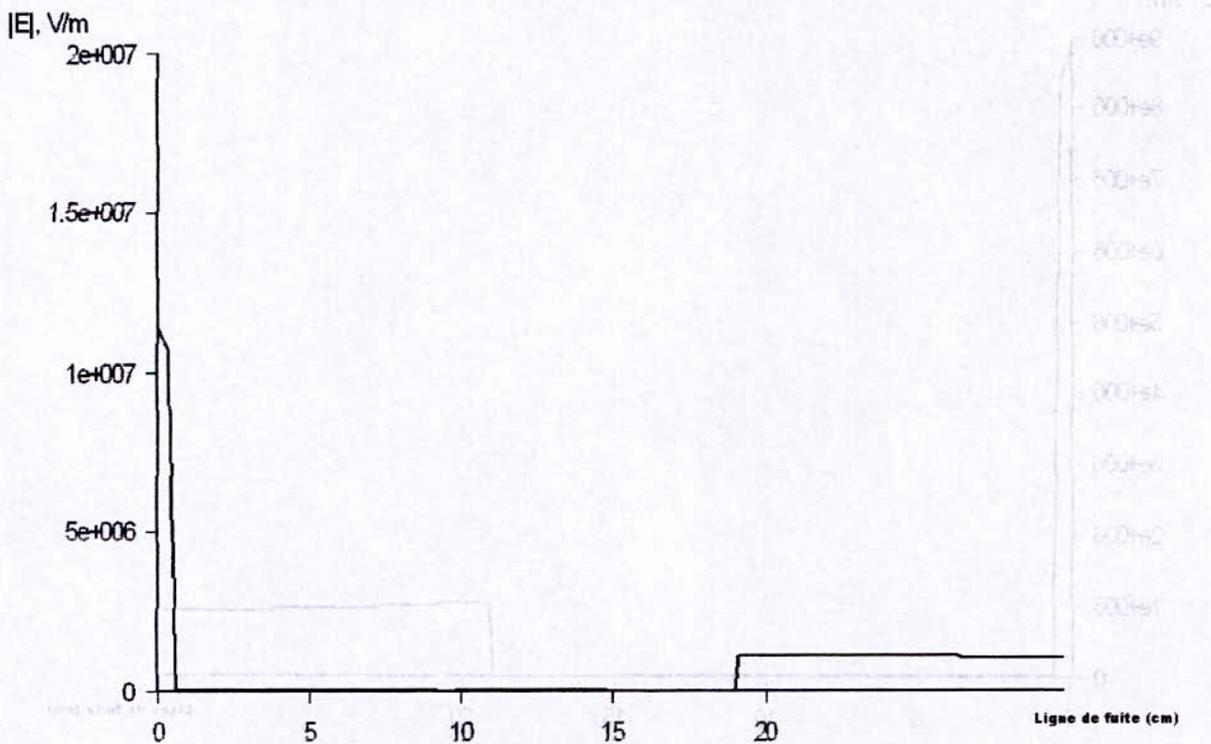


Fig.V.31. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué,  $L=16\text{cm}$  cas d'une polarité négative,  $U_{50\%}=170.15\text{ kV}$

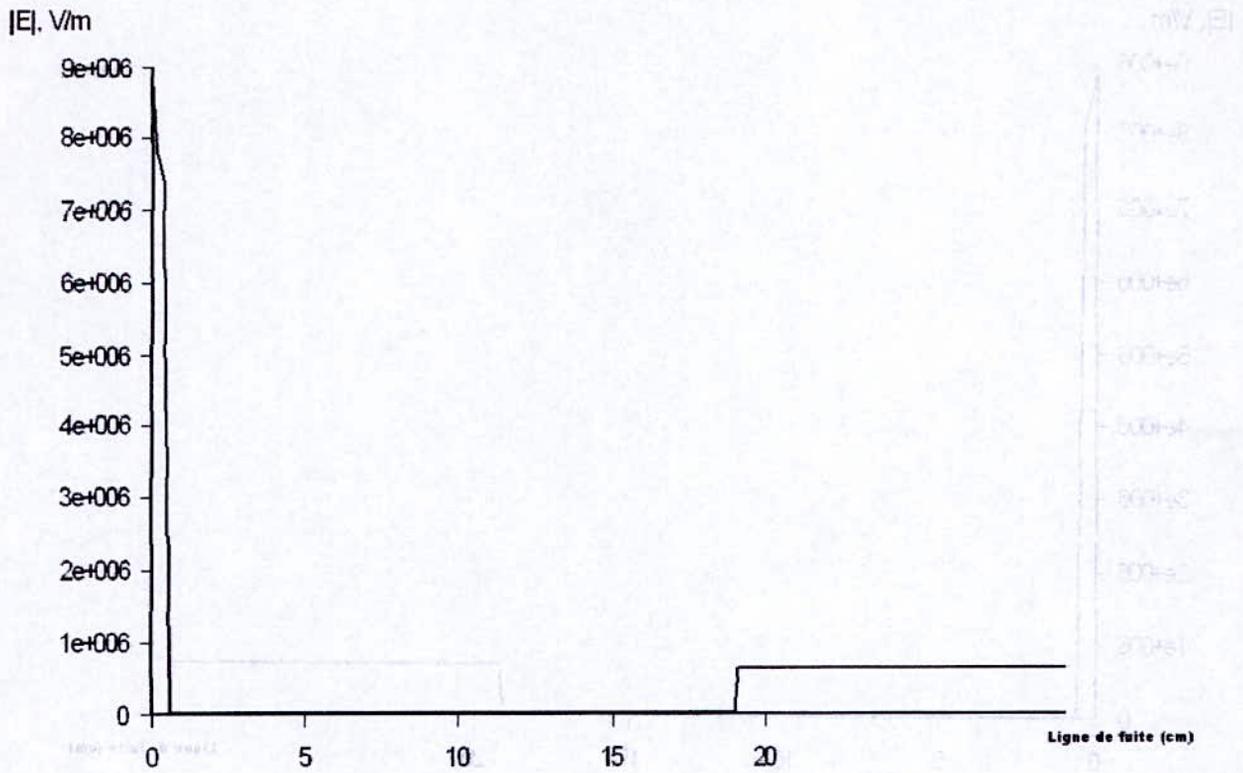


Fig.V.32.Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué,  $L=24\text{cm}$  cas d'une polarité positive,  $U_{50\%}=105.6 \text{ kV}$

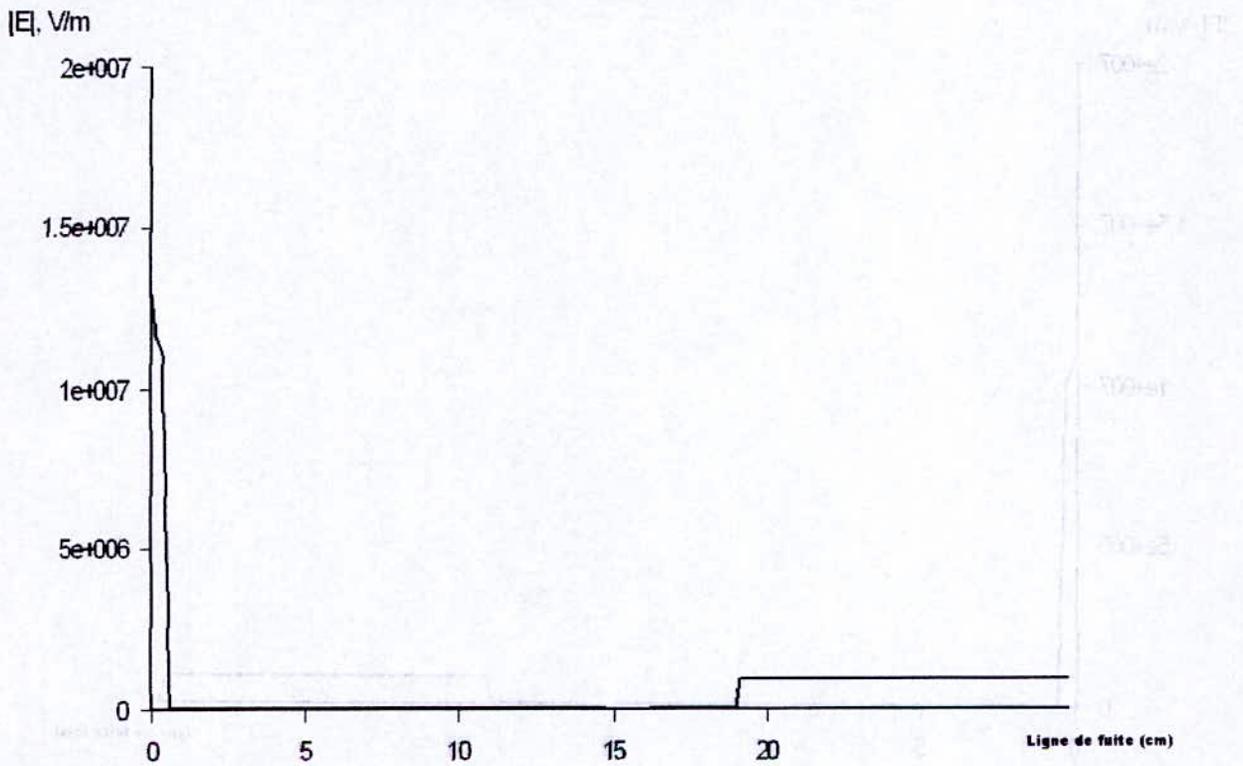


Fig.V.33.Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué,  $L=24\text{cm}$  cas d'une polarité négative,  $U_{50\%}=157.6 \text{ kV}$

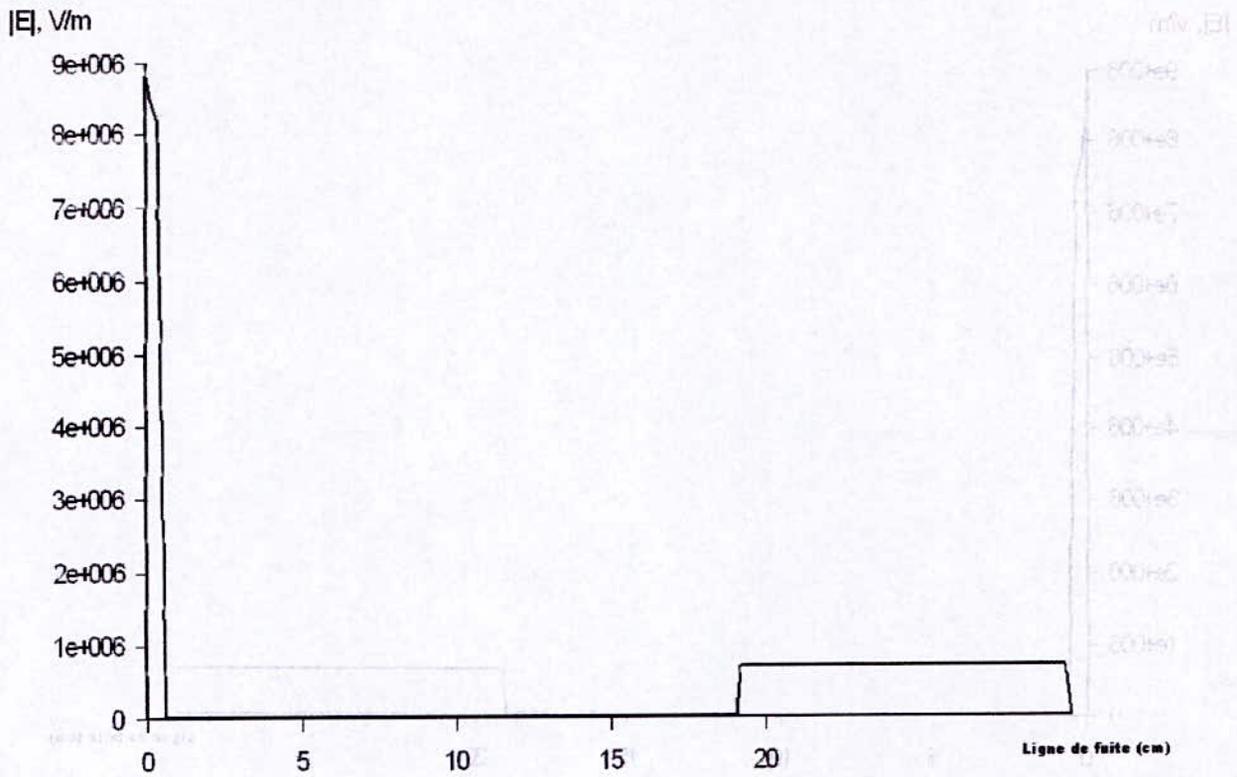


Fig.V.34. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué, L=32cm cas d'une polarité positive,  $U_{50\%}=124.33$  kV

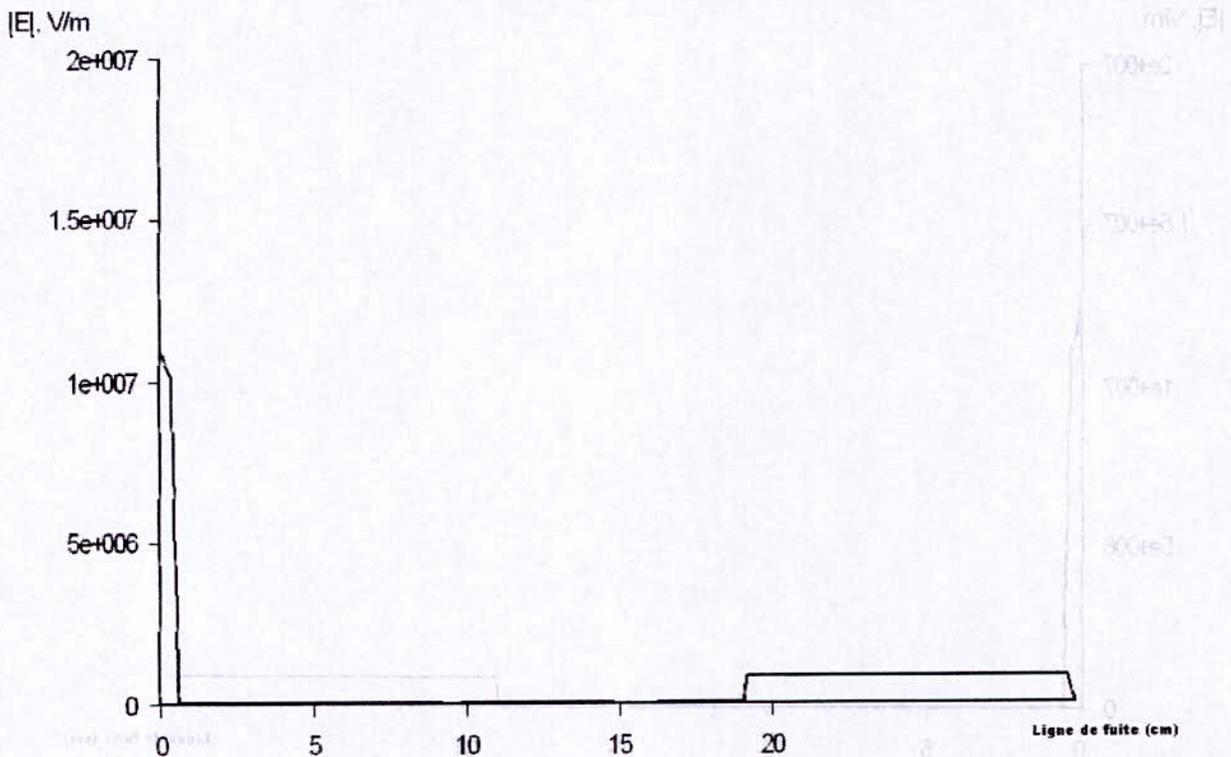


Fig.V.35. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué, L=32cm cas d'une polarité négative,  $U_{50\%}=154.24$  kV

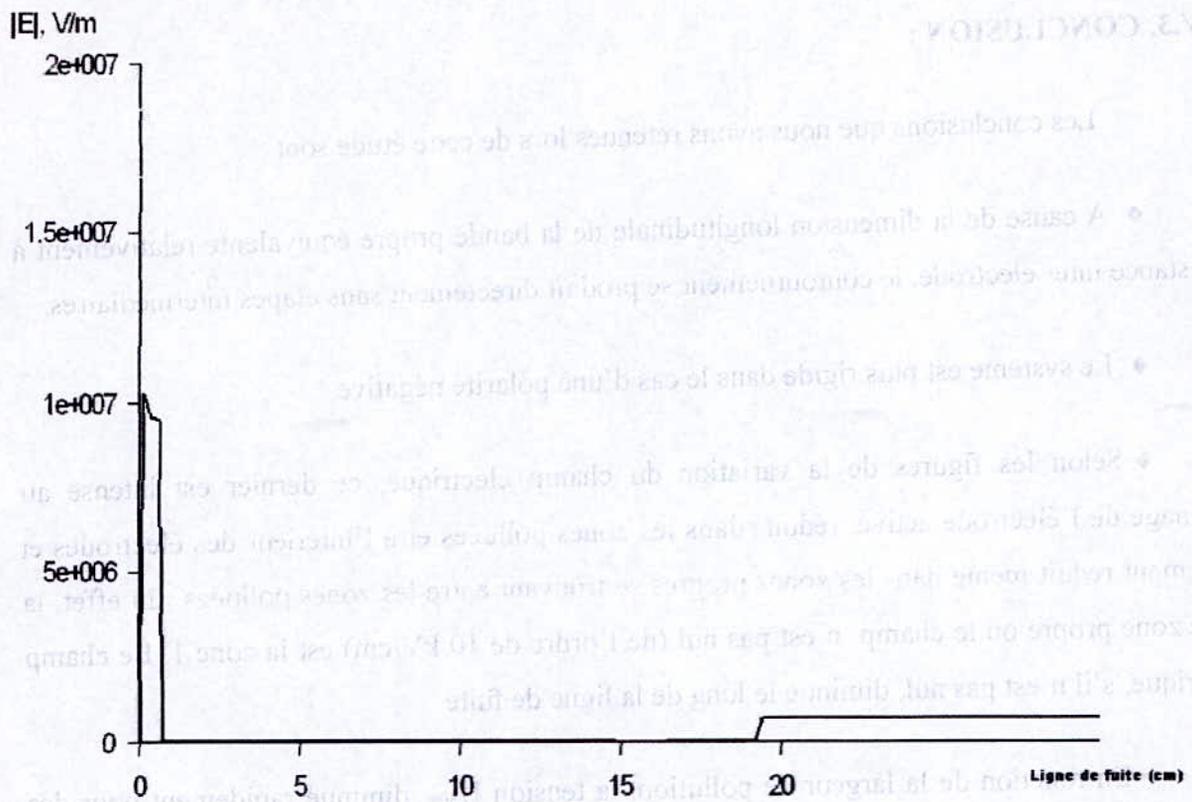


Fig. V.36. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué, L=40cm cas d'une polarité positive,  $U_{50\%}=124$  kV

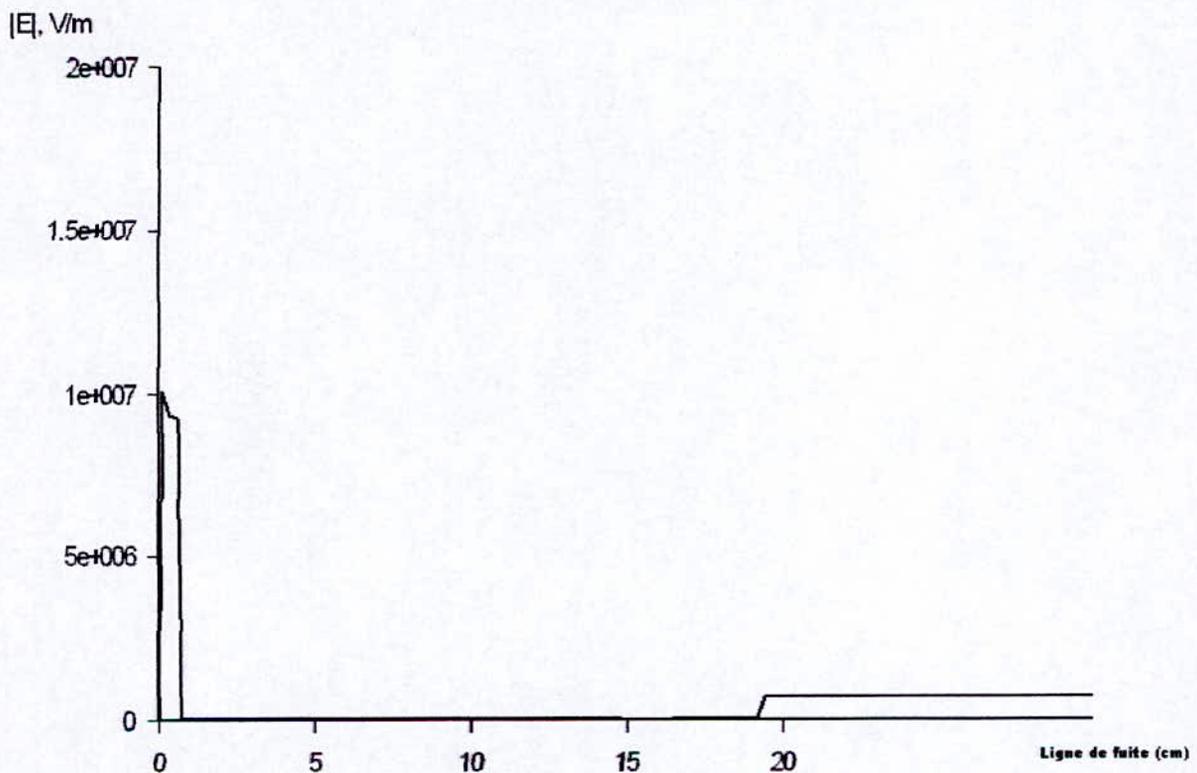


Fig. V.37. Variation du champ électrique sur la ligne de fuite centrale, modèle pollué, L=40cm cas d'une polarité négative,  $U_{50\%}=121.28$  kV

### V.3. CONCLUSION :

Les conclusions que nous avons retenues lors de cette étude sont :

- ◆ A cause de la dimension longitudinale de la bande propre équivalente relativement à la distance inter électrode, le contournement se produit directement sans étapes intermédiaires.
- ◆ Le système est plus rigide dans le cas d'une polarité négative.
- ◆ Selon les figures de la variation du champ électrique, ce dernier est intense au voisinage de l'électrode active, réduit dans les zones polluées et à l'intérieur des électrodes et également réduit même dans les zones propres se trouvant entre les zones polluées. En effet, la seule zone propre où le champ, n'est pas nul (de l'ordre de 10 kV/cm) est la zone 1. Le champ électrique, s'il n'est pas nul, diminue le long de la ligne de fuite
- ◆ En fonction de la largeur de pollution, la tension  $U_{50\%}$  diminue rapidement pour des largeurs comprises entre 0 et 8 cm de pollution, et reste pratiquement constante ailleurs. Par ailleurs, le temps entre impulsions n'a pratiquement pas d'effet sur la tension  $U_{50\%}$ .

# ***CONCLUSION GENERALE***

## CONCLUSION GENERALE

Il ressort de notre travail, consistant à l'étude du phénomène de contournement des isolateurs soumis à une pollution discontinue sous tension impulsionnelle, les conclusions suivantes :

- ◆ A cause de la nature de l'agent polluant utilisé et de la dimension longitudinale de la bande propre équivalente relativement à la distance inter électrodes, le contournement se produit directement sans décharges électriques partielles.
- ◆ L'augmentation de la largeur de pollution engendre la diminution du champ électrique et la tension  $U_{50\%}$ .
- ◆ Le champ est intense au voisinage de l'électrode active, se réduit partout sauf dans la zone 1. En général, il diminue le long de la ligne de fuite du modèle expérimental.
- ◆ Le système est plus rigide dans le cas d'une polarité négative.
- ◆ Le temps entre deux impulsions successives n'a pratiquement pas d'influence sur le comportement du modèle de laboratoire.

***ANNEXE***

**I. Détermination de la tension  $U_{50\%}$  (kV) et  $\sigma$  :**

**I.1.méthode des paliers multiples constants :**

**I.1.1.polarité positive :**

Largeurs de la pollution (cm)	0	8	16	24	32	40
$U_{50\%}$ (kV)	248	107.2	114	107.2	124	128
$\sigma$ (kV)	17.8	4	8	8	8	8

**I.1.2.polarité négative :**

Largeurs de la pollution (cm)	0	8	16	24	32	40
$U_{50\%}$ (kV)	299.2	144	168	160	148	144
$\sigma$ (kV)	8	8	8	24	24	16

**I.2.méthode Up and Down:**

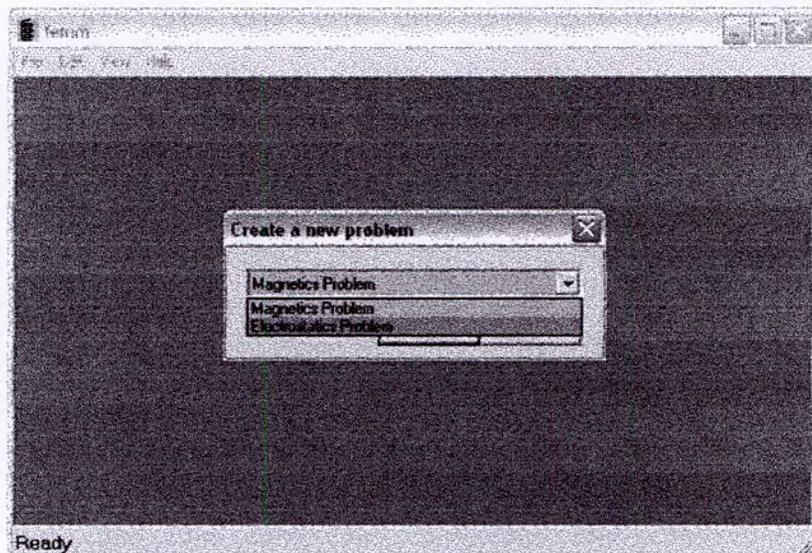
Largeurs (cm)	Polarité positive			Polarité négative		
	30s	60s	180s	30s	60s	180s
0	256,4	267,6	271,5	291,33	289,44	306
8	117,2	121,7	124,6	145,23	147,04	149
16	114,4	108	114	168,48	170,15	172,96
24	101,92	105,6	103,66	148,96	157,6	148
32	126	124,33	123,33	148,48	154,24	157,12
40	125,6	124	125,28	134,72	121,28	143,68

## II. Application de FEMM:

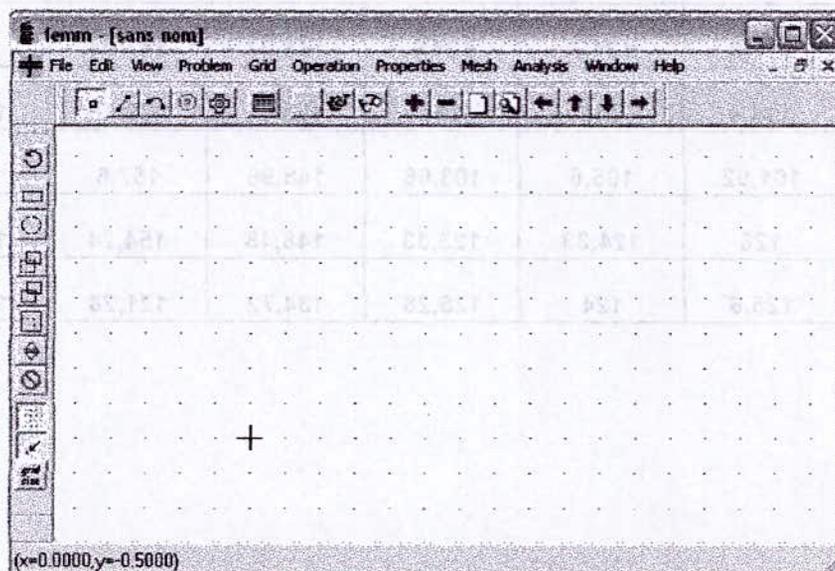
Ce logiciel nous donne la possibilité de simuler notre modèle expérimental, le modèle de laboratoire et obtenir les caractéristiques du champ électrique sur la plaque, pour les différents modèles. Donc, on peut faire tous les calculs rien qu'avec ce logiciel.

### Technique de simulation :

Après avoir choisi l'icône femm, on clique sur « File » et choisir problème d'électrostatique « Electrostatics Problem » :



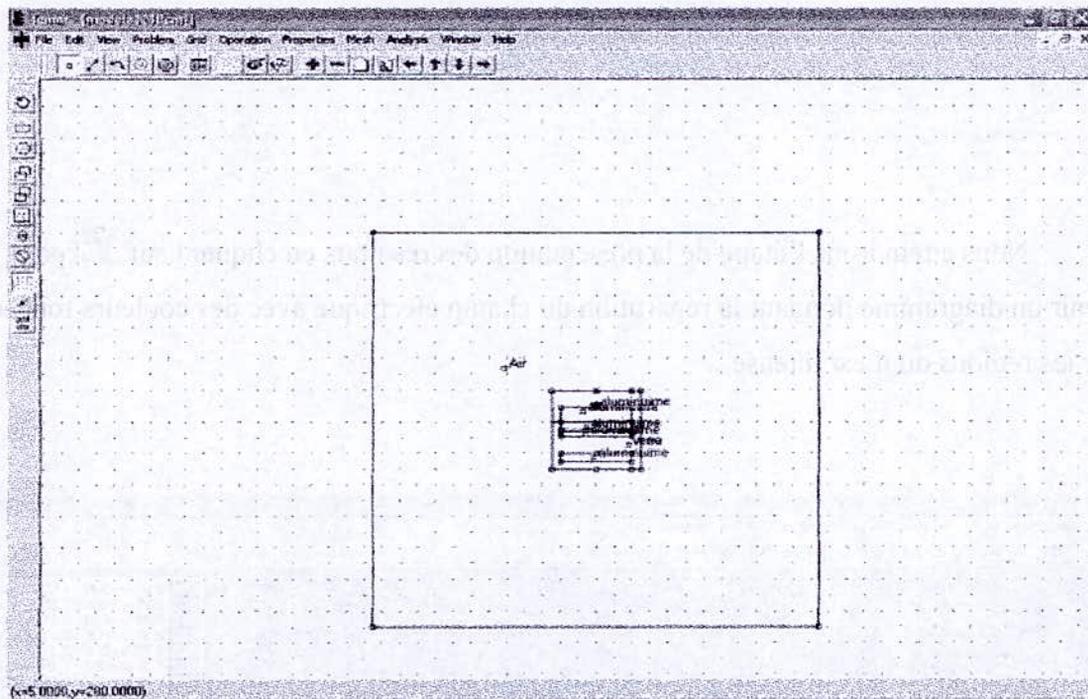
Par suite, on obtient la fenêtre suivante qui permet de schématiser le modèle du laboratoire



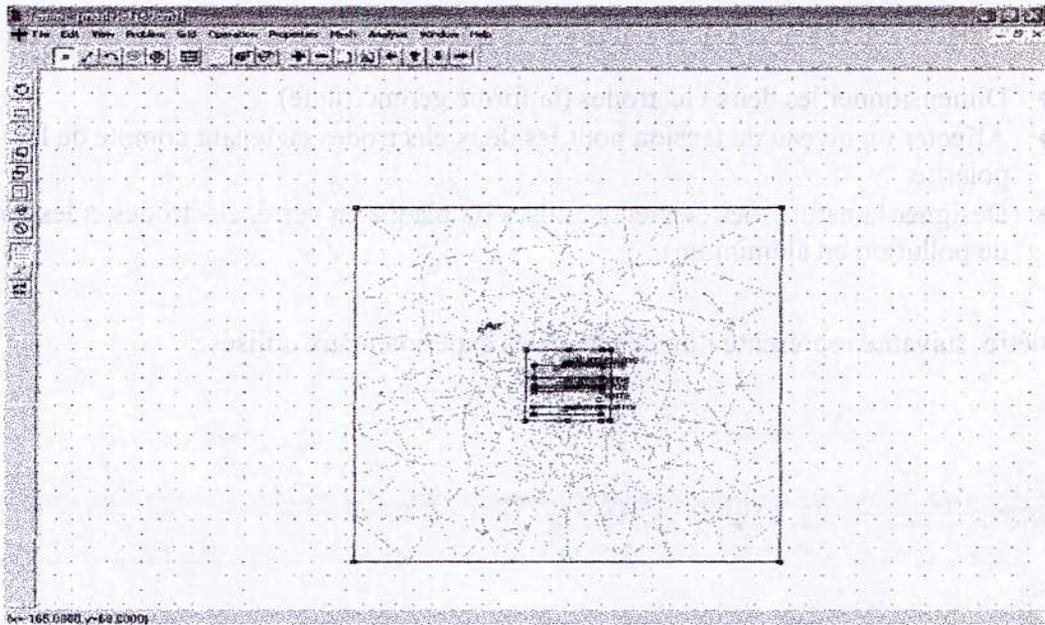
En procédant comme suit :

- ◆ Dimensionner les deux électrodes (la forme géométrique).
- ◆ Affecter un niveau de tension pour les deux électrodes en tenant compte de la polarité.
- ◆ Designer la nature des éléments utilisés (la plaque en verre, électrodes et les couches de pollution en aluminium).

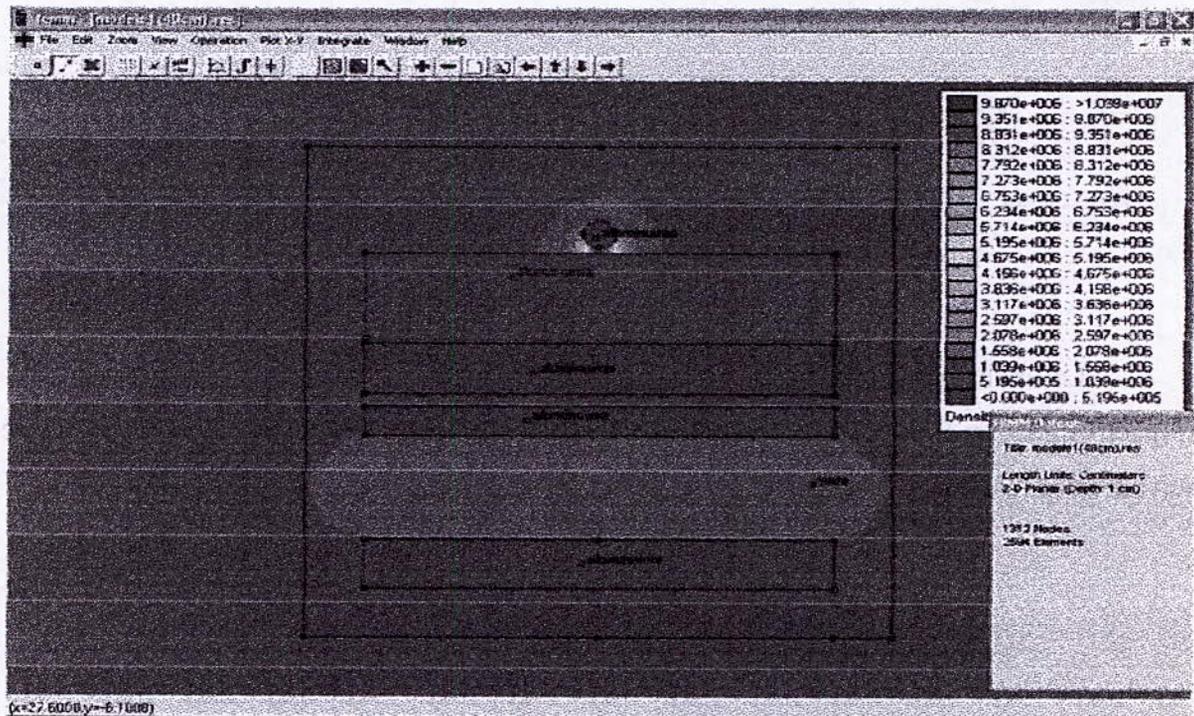
La fenêtre suivante représente l'un des modèles expérimentaux utilisés :



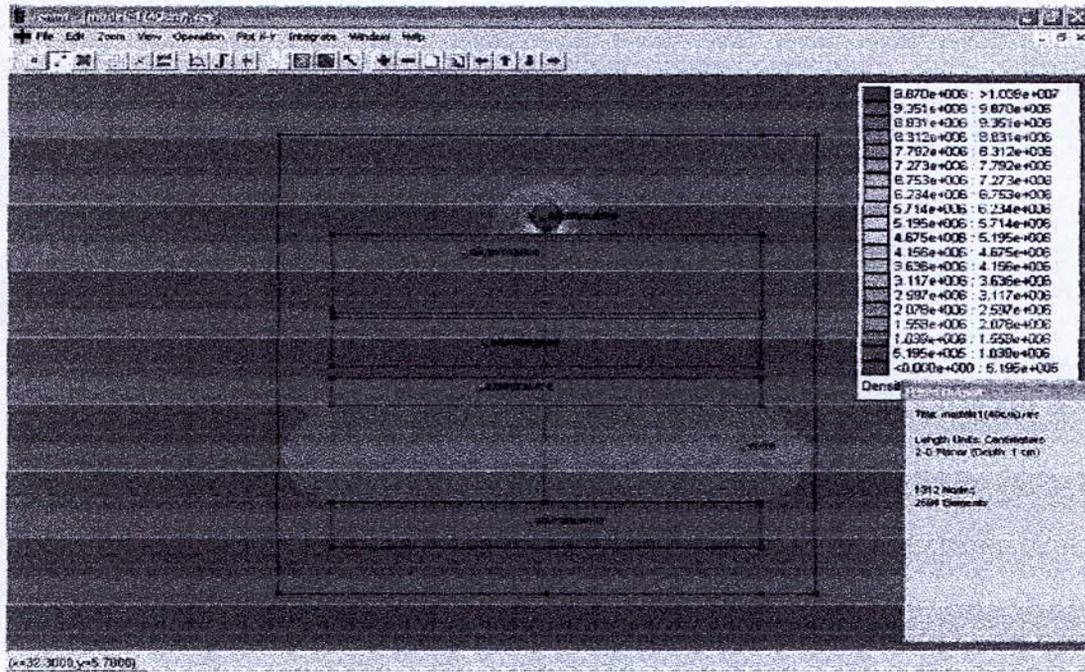
Le maillage et le calcul se fait par un simple clic sur  ensuite sur  respectivement, et l'instruction est exécutée en nous donnant le nombre de noeuds, la figure suivante explicite résultat :



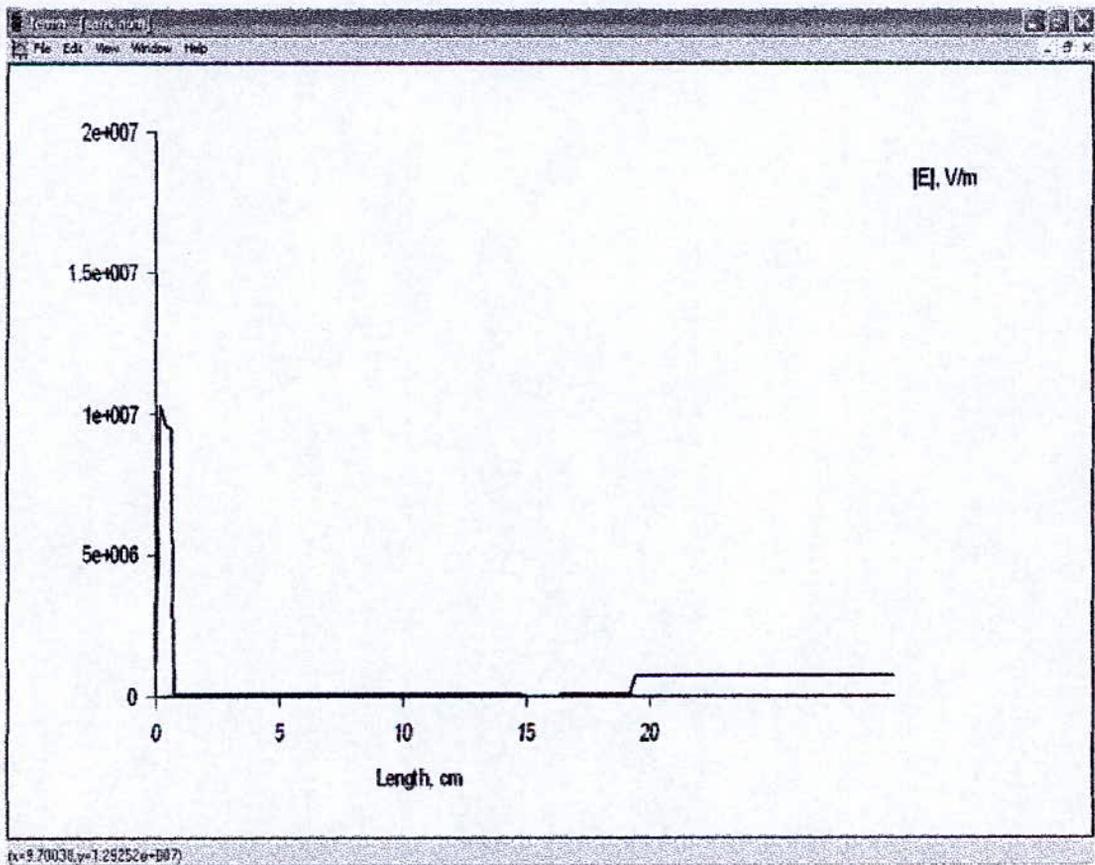
Nous atteindrons l'étape de la présentation des résultats en cliquant sur  pour obtenir un diagramme donnant la répartition du champ électrique avec des couleurs foncées pour les régions où il est intense :



Enfin, nous avons la possibilité de tracer les variations du champ électrique, suivant une ligne de notre choix :



Le résultat apparaîtra sur la fenêtre suivante :



**BIBLIOGRAPHIE**

- [ALS 63] L. L. Alston, S. Zoledziowski, « Growth of discharges on polluted insulators », IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N° 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
- [AMI 98] F. Amidi, k. Ouerdane, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.
- [BOU 01] A. Boubakeur, M. Tegar, A. Abimouloud, A. Mekhaldi, « Simulation expérimentale sous tension alternative 50 Hz du comportement d'un isolateur de haute tension naturellement pollué », Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol 2, pp. 271-278, 19-21 Mars 2001, Tripoli, Libye.
- [BOU 88] S. Bouazabia, T. Chikhaoui, « Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1988.
- [CEI 89] CEI 60 - 1, « Techniques des essais à haute tension », Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [CIM 90] A. Cimador, S. Vitet, « La pollution des isolateurs », EDF-Epure, N° 27, Juillet 1990.
- [CLA 73] P. Claverie, Y. Porcheron, « Les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées », RGE, Tome 82, No. 3, pp. 166-194, Mars 1973, Paris, France.
- [DAN 83] J. Danis, « A stochastic pollution flashover model », 4<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, 1983, Athènes, Grèce.
- [MEE 03] D. Meeker, « méthode des element finis FEMM », 2003.
- [DIX 48] W.j. Dixon, A. M. Mood, « Journal of America Statist Association ». Vol.43, 1948, pp.109-126
- [DOB 72] M. Dobarzic « Station d'essais de choc de laboratoire haute tension », Mémoire Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, juin 1972.
- [GUE 04] Y. Guehrar, « Elaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative ou impulsionnelle », Mémoire de Magistère, Laboratoire Haute tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004
- [GUE 96] M. Guenfoud D. Mida, « Influence de la largeur des écrans isolants sur l'amorçage des intervalles d'air, pointe - plan, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, juin 1996

- [HEI 82] W. Heise, G.F. Iuxa, G.Revrery, M. P. Verma, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [HEL 96] S. Helis, A. Meddour, « Etude du contournement d'un isolateur pollué », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique Septembre 1996.
- [HUR 75] C. Huraux, A. M. Rahal, « Le contournement des Isolateurs de haute tension approche à l'aide d'un modèle de laboratoire », RGE, Tome 84, N°. 6, pp. 425 - 429, Juin 1975.
- [KOS 70] M. A. B. EL Koshairy, F. A. M. Rizk, « Comportement des isolateurs des lignes de transport à très haute tension dans les conditions de pollution désertiques », CIGRE, Rapport 33 - 05, Paris, 1970.
- [LAM 72] P. J. Lambeth, H. Auxel, M. P. Verma, "Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension", Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [LER 84] G.Leroy, C.Gary, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Edition Ayrolles, Paris, France, 1984.
- [MEK 94] A. Mekhaldi, S. Bouzabia, « Etude de courant de fuite sur les isolateurs pollués » Spécial Issue of AJOT, Proceedings of 2<sup>nd</sup> CEA Alger, Nov. 29-30 1994 / vol 1.
- [MEK 90] A.Mekhaldi, « Modèle de contournement d'isolateurs pollués dans les conditions désertiques du Sahara Algérien », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1990.
- [MEK 96] A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Beroual, « Algorithm for pollution flashover calculations », Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, No. 4, pp. 385-397
- [MEK 99] A. Mekhaldi, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [NAM 98] D. Namane, « Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz », Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Février 1998.
- [NEU 59] G. Neumärker , « Verschmutzungszustand und Kriechweg », Monatsber. d. Deut. Akad. Wiss., Berlin, vol.1, pp.352 – 359, 1959.
- [RAY 91] M. N. Rayes, M. Zhirh, « Investigation about flashover performance of insulators under uniform and non uniform contamination », 7e International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 43-08, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [RIQ 98] G. Riquel, E. Span genberg, «De la céramique au synthétique », EDF-Epure, N° 58, Avril 1998.

[SAI 92] J.Y.Saison, « Etude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques », Thèse de Doctorat Es Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.

[STR 83] H.Streubel, « The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators » 4<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10,5-9 September 1983, Athens, Greece.

[TAI 02] W.Taibi, K.Abdeli, « Modèle d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Juin 2002, Alger, Algérie.

[TEG 00] M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Influence of discontinuous pollution width on the surface conduction frequency characteristics of the leakage current », 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 211-214, October 15-18, 2000, Victoria, British Columbia, Canada.

[TEG 93] M.Teguar, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juillet 1993.

[TEG 01.a] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Conduction phenomenon on HV Insulators with Discontinuous Pollution under ac Voltage », International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by Polish Electrical Society, pp. 267-270, September 17-19, 2001, Wroclaw, Poland.

[TEG 01.b] M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Effect of discontinuous pollution layer conductivity on the flashover and leakage current characteristics », CIGRE Symposium, Behaviour of Electrical Equipment and Components in Tropical Environment, Report No. 200-02, September 3-7, 2001, Cairns, Australia.

[WIL 69] R. Wilkins, « Flashover voltage of high voltage insulators with Unite en Surface pollution films », Proc. IEE, 116, No3, MARS 1969.

[WOO 70] H. H. Woodson, A. J. McElroy, « Insulators with contaminated surfaces part II: modelling of discharge mechanisms », IEEE Trans., Vol. Pas-89, N°. 8, November-December 1970. p. 858-867.

[ZAF 86] L.E.Zaffanella, H.M.Schneider, J.H.Dunlap, « Performances des Isolateurs Pollués pour les Lignes de haute tension », CIGRE, Rapport 33-05, 1986, Paris, France. , 1996.