

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار  
عنابة

Faculté des Sciences de l'ingénieur

Année : 2007

Département d' Electrotechnique

**THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT D'ETAT**

**THEME**

*Problèmes de contournement  
et perforation des isolateurs de haute tension*

**Option**

**Réseaux Electriques**

**Par**

**El Bahi AZZAG**

**DIRECTEUR DE THESE: Mr. K. CHAOUI** Prof. Université de Annaba

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT: Mr. H. LABAR** M.C Université de Annaba

**EXAMINATEURS:**  
**Mr. M. HOUABES** M.C Université de Annaba  
**Mr. A. LEMZADMI** M.C Université de Guelma  
**Mr. T. BAHI** M.C Université de Annaba

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement mon Directeur de recherches le Professeur Kamel Chaoui d'avoir accepté de diriger mes recherches et, sincèrement pour toute sapatience communicatrice et ses orientations.

Mes sincères remerciements vont aussi à Mr Hocine Labar, Maître de conférences de L'Université de ANNABA d'avoir accepté de présider ce Jury.

Je porte beaucoup d'admiration également à Mr Ahcène Lemzadmi , Maître de conférences de l'université de GUELMA , d'avoir accepté de faire parti de ce Jury.

Je remercie également Mr Mourad Houabès et Mr Tahar Bahi de l'Université de ANNABA, d'avoir accepté de porter des remarques instructives à cette thèse.

J'exprime ma très sincère reconnaissance pour tous les membres de ma famille pour les encouragements et le soutien qu'ils m'ont procurés.

*A la mémoire de ma chère Mère*

*A ma famille, mon père, ma femme, et mes quatre enfants.*

## ملخص:

إن ظاهرة التفاف العوازل الملوثة تنتج من تركيب عدة ضغوطات : ترسب المادة من طبقة الصلبة, ترطيب الرواسب وتواجد الشدة المستعملة .

أمكننا من أن نحدد تلك الكميات المتغيرة بواسطة الوظيفة الحسابية بجمع الكميات

مخطط Obenaus المتغيرة

الآتية : مقاومة التلوث و مدة التسرب والتزويد الفولطي.

العمل على إحدى الكميات المتغيرة تمكننا أن نحلل شدة الالتفاف .

فالطريقة النظرية تجعل المتغيرات متصلة بمثيلاتها من الظروف الطبيعية الموصوف أحيانا بالصيغ التجريبية .

تحليل شدة الضغط الداخلي والخارجي يمكننا من تنفيذ تسوية تقنية-اقتصادي بين تناسق العزل و مخطط الحماية.

أما تحليل الضغوط الداخلية (تأثير Ferranti - تأثير الاستبدال) والضغوط الجوية الخارجية تمكننا من أن نرى أن الضغوط الشديدة لديها تأثير مؤذ على العزل و الناتج من طول عمر المواد الكهربائية.

تخفيف الضغوط الجوية تحت تأثير ظاهرة couronne لديها نتيجة مفيدة على الالتفاف و لهذا بالنسبة لكل الحالات نأخذ بعين الاعتبار : موجة الضغط تخترق المركز الذي سيكون موصوفا عندما تكون مسافة تأثير المركز أعلى من 2-3 كم بواسطة الواجهة المسطحة, وبسعة أخفض من وضعية الصدمة للمواد المركزية .

كما نستنتج باستثناء حالة الصاعقة المباشرة القريبة جدا من المركز أن الضغوط الجوية تبدو غير مؤذية بشكل كامل عند وصولها إلى المركز والتي بالتالي تجعلها ممكنة لتنسيق العزل والحماية.

## **Abstract :**

The phenomenon of skirting of the polluted insulators results in fact from the combination from several constraints: deposit of a solid layer of material, humidification of this deposit and the existence of a tension applied.

The modeling of Obenaus enabled us to determine these various parameters by a mathematical function gathering the following parameters: resistance of pollution, length of escape and supply voltage.

The action on one of these parameters enables us to analyze the tension of skirting.

The theoretical approach makes it possible to connect these parameters with those of the natural conditions sometimes characterized by empirical formulas.

The analysis of internal and external overpressures enables us to carry out a technico-economic compromise between coordination of insulation and plan of protection.

The analysis of internal overpressures (Ferranti Effect, effect of commutation) and those external (atmospheric overpressures) enabled us to see that overpressures have a harmful effect on insulation and for consequent on longevity of the electric installations.

The atmospheric attenuation of overpressures under the influence of the effect crowns has a beneficial effect on skirting.

For this, and in all the cases that one can consider, the wave of overpressure penetrating in a station will be characterized dice that the distance from the impact of the station is higher than 2 or 3 km, by a very flattened face, and an amplitude definitely lower than the behaviour of shock of the material of the station. It is also noted that, except in the case of a direct thunderbolt very near to the station, atmospheric overpressures appear completely inoffensive when they reach the station, which makes it possible to coordinate the insulation and protection.

## **Résumé :**

Le phénomène de contournement des isolateurs pollués résulte en fait de la combinaison de plusieurs contraintes : dépôt d'une couche de matériau solide, humidification de ce dépôt et l'existence d'une tension appliquée.

La modélisation d'Obenaus nous a permis de cerner ces différents paramètres par une fonction mathématique regroupant les paramètres suivants : résistance de pollution, longueur de fuite et tension d'alimentation.

L'action sur l'un de ces paramètres nous permet d'analyser la tension de contournement.

L'approche théorique permet de relier ces paramètres avec celles des conditions naturelles parfois caractérisées par des formules empiriques.

L'analyse des surtensions internes et externes nous permet de réaliser un compromis technico-économique entre coordination d'isolement et plan de protection.

L'analyse des surtensions internes (Effet Ferranti, effet de commutation) et celles externes (surtensions atmosphériques) nous ont permis de voir que les surtensions ont un effet néfaste sur l'isolement et pour conséquent sur la longévité des installations électriques.

L'atténuation des surtensions atmosphérique sous l'influence de l'effet couronne a un effet bénéfique sur le contournement.

Pour ce, et dans tous les cas qu'on peut envisager, l'onde de surtension pénétrant dans un poste sera caractérisée dès que la distance de l'impact du poste est supérieure à 2 ou 3km, par un front très aplati, et par une amplitude nettement inférieure à la tenue de choc du matériel du poste.

On constate aussi que, sauf dans le cas d'un coup de foudre direct très proche du poste, les surtensions atmosphériques apparaissent totalement inoffensives lorsqu'elles atteignent le poste, ce qui permet de coordonner l'isolation et la protection.

Liste des tableaux:

II-1. Principales caractéristiques des coups de foudre.....	43
V-1 : Variation de l'amplitude maximale le long de la propagation.....	79
V-2:Variation du temps de raideur de l'onde le long de la propagation.....	80
VI-1. Equivalence entre pollution naturelle et méthodes de pollution artificielle.....	99
VI-2.Longueurs des lignes de fuite des chaînes d'isolateurs, en centimètres.....	100
A-1.Variation des paramètres A et n selon différents auteurs.....	118
A-2. Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques.....	118
A-3. Formes des surtensions représentatives selon la norme CEI 71.....	119
A-4.Tension de tenue de choc et distances d'isolement en BT selon la norme CEI 947-1.....	119

## LISTES DES FIGURES

Chapitre I:	
I-1. Circuit expérimental et équivalent du modèle d'Obenaus.....	6
I-2. Caractéristique V(i) pour différentes valeurs de X.....	8
I-3. Tension minimale aux bornes du modèle en fonction de la longueur de la décharge.....	9
I-4. Influence du profil sur le mécanisme de contournement.....	10
I-5. Définition du facteur de profil (F.P).....	11
I-6. Influence du profil sur la tension de contournement des isolateurs pollués.....	12
I-7 Etapes successives du contournement d'une couche polluante.....	13
I-8. Circuit électrique utilisé pour le développement de l'arc.....	16
I-9.Détermination de la fonction caractéristique R .....	18
I-10. Caractéristique courant - tension du modèle de la figure I.7.....	19
I-11.Caractéristiques tension- courant pour différentes longueurs de la zone sèche. Cas particulier d'une surface isolante de 10cm de long recouverte d'une solution présentant une résistance de $2000\Omega/\text{cm}$ de ligne de fuite.....	22
Chapitre II:	
II-1. Schéma équivalent ligne à paramètres distribués.....	27
II-2. Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte.....	28
II-3. Modèle (Matlab / Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribués lors de son enclenchement à vide.....	29
II- 4a.Surtension en extrémité d'une ligne lors de son enclenchement $L_1 = 100\text{Km}$	30
II-4b.Surtension en extrémité d'une ligne lors de son enclenchement $L_2 = 250\text{Km}$	31
II-4c. Surtension en extrémité d'une ligne lors de son enclenchement $L_3 = 500\text{Km}$	32
II-5a. Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte pour une tension de 60KV , 220KV.....	33
II-5b. Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte pour une tension de 380KV , 500KV.....	34
II-6. Surtension temporaire sur un neutre isolé.....	36
II.7 .Schéma d'étude des pertes de charge.....	37
II-8.Principe de la ferrorésonance.....	38

II-9. Onde de choc normalisée.....	40
II-10. Classification des coups de foudre selon K.Berger.....	42
II-11. Exemple de forme de courant de foudre (selon K.Berger).....	44
II-12. Foudroisement d'une ligne: chute sur un conducteur de phase.....	44
II-13. Foudroisement d'une ligne: chute sur un câble de garde.....	46
II-14. Schéma équivalent du générateur d'onde de choc.....	46
II-15. Allure de $U_{c1}(t)$ , $U_{c2}(t)$ et $U_c(t)$ .....	48
Chapitre III:	
III-1. Courant de fuite.....	51
III-2. Permittivité diélectrique et phénomène de polarisation.....	52
III-3. Schéma équivalent représentant un diélectrique. ....	54
Chapitre IV:	
IV-1. Caractéristique courant tension de décharge dans les gaz .....	65
IV-2. Processus de création de l'avalanche .....	67
IV-3-1. Avalanche de Townsend en direction de l'anode.....	70
IV-3-2. Front de photo - ionisation en avant de la masse d'ions positifs .....	70
IV-3-3.: Progression et ramification du streamer.....	70
IV- 4. Impulsions de Trichel.....	73
Chapitre V:	
V-1: Schéma d'injection et de mesure des ondes mobiles le long de la ligne 220kV.....	78
V-2 : Courbes de distorsion et de propagation d'une onde tension supérieure à la tension critique (polarité positive).....	79
V-3. Variation de $U_{max}$ en fonction de la distance de propagation.....	80
V-4. variation de $T_{max}$ en fonction de la distance de propagation.....	80
V-5 Aspect général d'un cycle de charge " q-v " obtenus pour un échantillon au laboratoire.....	81

V-6. Interprétation de la distorsion de propagation par le retard de propagation du front de l'onde.....	83
V-7. Interprétation de la distorsion de propagation par l'énergie dissipée.....	84
V-8. Modèle analogique proposé.....	85
V-9. Schéma électrique équivalent d'un tronçon de ligne.....	86
V-10 Organigramme de calcul Matlab d'une onde de choc normale 1.2/50µs.....	89
V-11 Courbe obtenue par simulation Matlab d'une onde de choc 1,2/50µs avec $v_{Cr}=850$ kV.....	90
V-12. Circuit de la simulation complète. ....	91
V-13. Schéma utilisé dans Simulink pour la représentation d'un tronçon de ligne avec effet couronne.....	91
V-14. Circuit de simulation de l'onde de choc de foudre.....	92
V-15. Circuit de simulation pour différentes valeurs de $C_c$ : $C_{C1}$ ; $C_{C2}$ ; $C_{C3}$ ; $C_{C4}$	92
V-16. Représentations de la surtension à la source (0km), et à des distances : 0,5km, 1km et 1,5km de la source. ....	93
V-17. Représentations de la surtension à la source (0km), et à des distances : 1km, 3km et 7km de la source.....	93
<b>Chapitre VI :</b>	
VI- 1. Représentation schématique des phénomènes précédant la décharge.....	101
VI-2. Organigramme de détermination des niveaux d'isolement assignés ou normalisés.....	103
<b>Annexes:</b>	
A-1. Organigramme de calcul des surtensions du à l'effet Ferranti.....	117

## Annotations :

- U : Tension appliquée.
- V<sub>d</sub> : Chute de tension totale dans la décharge.
- V<sub>p</sub> : Chute de tension dans la couche conductrice.
- R : Résistance électrique linéique de la pollution.
- L : Longueur de l'ensemble décharge électrolyte.
- U<sub>e</sub> : Chute de tension cumulée aux électrodes.
- A<sub>n</sub> : Constantes expérimentales du gradient de tension.
- X<sub>c</sub> : Longueur critique de la décharge.
- σ : Conductivité volumique.
- Z<sub>c</sub> : Impédance caractéristique.
- L, R, C, g : Paramètres linéique de la ligne.
- v : Vitesse de propagation de l'onde.
- μ : Mobilité.
- h : Constante de Planck.
- q : Charge électronique ( $1.6 \times 10^{-19}$  C).
- ε<sub>0</sub> : Constante diélectrique dans le vide ( $8.85 \times 10^{-19}$ ).
- η : Coefficient d'attachement.
- N : Nombre d'électrons.
- A<sup>+</sup>, B<sup>-</sup> : Ions positifs et négatifs.
- α : Coefficient d'ionisation.
- A\* : Atome excité.
- x : Variable de distance.
- γ : Coefficient secondaire d'ionisation.
- c : Vitesse de la lumière.
- hν : Energie d'un photon.
- n<sup>+</sup> : Nombre de charges positives.
- n<sup>-</sup> : Nombre de charges négatives.
- U<sub>i</sub> : Tension d'ionisation minimale.
- U<sub>0</sub> : Tension de première décharge.
- η : Coefficient d'attachement réduit.
- r : Rayon du conducteur.

$\delta$  : Densité relative.  
p : Pression de l'air en cm de Hg.  
t : Température Champ critique de claquage.  
 $E_0$  : Champ critique de claquage.  
K : Coefficient de Peek.  
 $C_{cor}$  : Capacité de couronne.  
 $C_{geom}$  : Capacité géométrique.  
 $C_{dyn}$  : Capacité dynamique.  
 $Q_P, Q_0$  : Charges de polarisation.  
 $P_A$  : Pertes diélectriques.  
 $\tau$  : Constante de temps électrique.  
 $\tau_f$  : Constante de temps de front.  
 $\tau_q$  : Constante de temps de queue.

## *Sommaire*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### **Chapitre 1**

#### **I- MODELISATION STATIQUE DU SYSTEME DECHARGE POLLUTION**

I -1. Introduction.....	5
I -2. Présentation du modèle.....	5
I-3. Application a la détermination de la tension de contournement.....	7
I-3-1. Conditions électriques critiques du modèle.....	7
I.4 .Influence de la forme et de la position des isolateurs.....	9
I.4.-1. Influence de la forme des isolateurs.....	9
I-4-2. Influence de la position des isolateurs.....	13
I-5. Le contournement des isolateurs sous pollution.....	13
I- 5-1. Approche qualitative .....	13
I-5-2. Approche théorique .....	15
a) Equations générales.....	15
b) Contournement sous tension continue.....	20
c) Contournement sous tension alternative.....	23
I-6. Conclusion.....	24

### **Chapitre II**

#### **II- ANALYSE DES SURTENSIONS**

II-1. Introduction.....	26
II-2. Surtensions internes temporaires .....	26
II-2-1. Surtension à l'extrémité d'une ligne ouverte (effet Ferranti).....	26
a)Modèle (Matlab/ Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribuées lors de son à enclenchement à vide.....	28
b) Analyse du comportement d'une ligne pour différents niveaux de tension..	33

c) Analyse des résultats de la simulation.....	35
II-2-2. Défaut monophasé à la terre.....	35
II-2-3. Perte de charge.....	36
II-2-4. Ferrorésonance.....	38
II-3.Surtensions internes transitoires de manœuvre .....	39
II- 4. Surtensions externes transitoires de foudre.....	40
II-4-1. Généralités.....	40
a)Formation des nuages .....	41
b) Formation des charges électriques .....	41
II-4-2Caractéristiques électriques de la foudre.....	42
II-4-3.Forme et amplitude des impulsions (décharges partielles) des coups de foudre	43
a) Forme des décharges négatives.....	43
b) Forme des charges positives.....	43
II-4-4 Contraintes appliquées a une ligne touchée par un coup de foudre.....	44
a- Coup de foudre sur conducteur de phase.....	44
b -Coup de foudre sur un pylône ou sur un câble de garde .....	45
II.4.5 Simulation de l'onde de choc de la surtension transitoire de foudre.....	46
II-5.Conclusion.....	48

## Chapitre III

### III-CONSTRAINTES DIELECTRIQUES

III-1. Généralités.....	50
III-2. Résistivité diélectrique .....	50
III-3. Permittivité.....	51
III- 4. Rigidité diélectrique .....	52
III- 5. Les pertes diélectriques .....	53
III-5-1. Identification des paramètres des schémas équivalents .....	53
III-6. Claquage diélectrique .....	55
III-6-1. Claquage électrique.....	56
III-6-2. Claquage électrochimique.....	56
III-6-3. Claquage thermique.....	56

## Chapitre IV

### IV-EFFET COURONNE

IV-1. Définition.....	59
IV-2. Présentation et origines des pertes par effet couronne .....	59
IV-3. Perturbations radio – électriques.....	60
IV- 4.Phenomenes d’ionisation dans les gaz.....	62
IV-4.1. Excitation atomique .....	62
IV-4-2.Ionisation par collision électronique.....	62
IV-4-3.Photo-ionisation .....	62
IV-4-4. Détachement .....	63
IV-4-5. La recombinaison .....	63
IV-4-6. Attachement .....	63
IV-4-7-Mouvement dans le champ électrique .....	63
IV-5. Les décharges électriques dans les gaz .....	64
IV-5-1.Caractéristique courant - tension des décharges dans les gaz .....	64
IV-5-2. Décharge couronne.....	66
IV-5-3.Décharges négatives « Avalanche de Townsend .....	66
IV-5-4. Décharges positives « Front de photo - ionisation ».....	69
IV-6. Différents types d’émission des charges en effet couronne.....	71
IV- 6-1. Petites aigrettes négatives (impulsions de Triche).....	72
IV-6-2. Zone de conductivité continue (Zone d’Hermstein).....	72
IV-6-3. Grandes aigrettes positives (Pre-breakdown Streamers).....	72
IV-7. Loi de Peek : seuil critique de l’effet couronne .....	73
IV-7-1. Définition .....	73
IV-7 -2. Obtention de la loi de Peek.....	74

## Chapitre V

### V. MINIMISATION DU CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION PAR L’ATTENUATION DES SURTENSIONS TRANSITOIRES.

V-1 Introduction .....	77
------------------------	----

V-2.Méthodes expérimentales .....	78
V- 3. La méthode des échantillons en laboratoire : Les cycles " q-u " .....	81
V-3-1. Principe de l'étude .....	81
a) 1 <sup>ère</sup> interprétation : Retard de propagation .....	82
b) 2 <sup>ème</sup> interprétation : Dissipation de l'énergie .....	83
V.4 Modélisation analogique de l'atténuation de l'onde de surtension par Simulink/ Matlab..	84
V-4-1. Etude du circuit analogique.....	84
V-4-2.Etude du circuit électrique équivalent du modèle.....	85
V-4-3. Simulation de la charge.....	88
V-4-4. Détermination de l'atténuation de la surtension.....	90
a). Présentation des éléments de la modélisation Simulink.....	90
b) Simulation pour une ligne avec pertes.....	92
V-5. Conclusion.....	94

## Chapitre VI

### VI . DISCUSSION GENERALE

VI-1. Introduction.....	96
VI-2. Mécanismes de contournement des isolateurs.....	96
VI-3. Mécanismes de contournement artificiels et naturels.....	98
VI-4.Influence des surtensions sur le contournement:.....	98
VI-4-1 .Dispositions normatives et coordination de l'isolement.....	101
VI-4-2. Dispositions complémentaires à la coordination de l'isolement.....	102
VI-4-3. Atténuation des surtensions.....	104
VI-5. Conclusion.....	105
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>106</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>109</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>116</b>

## INTRODUCTION GENERALE

La fiabilité des réseaux de transports et de distribution de l'énergie électrique passe par une chaîne d'isolateurs qui assure la fonction d'isolement. Ces éléments de chaînes d'isolateurs considérés, à juste titre, comme maillon faible de toute cette structure, ne représente qu'une faible proportion (estimé à moins de 10%) du coût kilométrique d'une ligne aérienne. Mais la maintenance de ces isolateurs représente 60% du coût total de la maintenance du réseau électrique sans oublier qu'ils sont à l'origine de plus de 70% des incidents sur le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique. Dans la gamme des très hautes tensions, le dimensionnement de l'isolation externe est déterminé principalement par les surtensions de manœuvre. Dans ces conditions, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Généralement elle est également suffisante pour supporter les surtensions temporaires. Cependant, en l'absence de surtensions de foudre ou de manœuvre, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes, particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine). Ces défauts sont dus à la pollution des isolateurs. Dans les ouvrages (lignes ou postes) installés en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolant y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux-mêmes, par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Au voisinage des usines métallurgiques, chimiques ou même abords des centrales thermiques, les isolateurs se recouvrent de poussières faiblement conductrices, mais hygroscopiques. Dans des conditions de forte humidité (brouillard, pluie, condensation matinale, etc.) la dissolution des sels contenus dans cette poussière provoque la formation d'un électrolyte. Les gaz présents dans les fumées, absorbés par la couche liquide, en augmentent encore la conductivité. Comme dans le cas de la pollution marine un courant de fuite circule alors dans la couche superficielle et le contournement peut parfois survenir. Si la pollution marine et la pollution industrielle constituent deux cas typiques de pollution ou la contamination des surfaces isolantes est poussée à l'extrême il serait erroné de penser que les autres régions son exemptes de pollution. La pollution domestique (appareils de chauffage des habitations, véhicules automobiles) et la pollution agricole (pollen, insectes, engrais) sont des réalités qui donnent au phénomène un caractère tout à fait général. A cet égard, on notera que les régions désertiques

sont caractérisées par un type de pollution extrêmement sévère. Comme on le voit, la nature et les caractéristiques des agents contaminants sont très variées. Généralement ils ne provoquent pas des dégradations de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs, cependant, l'humidification d'un dépôt solide - quelle que soit sa nature- accumulé progressivement à la surface des isolateurs provoque la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution.

Dans cette thèse les travaux ont été répartis ainsi:

Au chapitre I, on a défini une modélisation du système pollution. Sachant qu'il existe plusieurs modèles, nous avons choisi celui d'Obenaus car il est l'un des travaux les plus importants sur les bases quantitatives et qualitatives du phénomène de contournement. Suivant le modèle expérimental on déduit le circuit électrique équivalent, d'après ce circuit on trouve l'équation mathématique générale qui nous définit la tension de contournement. L'étude de cette équation nous a permis d'évaluer les différents paramètres qui ont une influence sur le contournement (tension d'alimentation, résistance de décharge, profil de contour de l'isolateur et les conditions d'expérience).

Au chapitre II et suivant l'équation caractéristique, on a remarqué que les paramètres les plus influents sont les surtensions (internes et externes). Après avoir passé en revue toutes les surtensions internes (effet Ferranti, défaut monophasé, perte de charge, ferrorésonance). On a procédé à deux simulations du comportement de la ligne (à vide ou perte de charge) en variant la tension d'alimentation et la distance de la ligne. Cette simulation nous a permis de caractériser l'effet Ferranti et ces effets nocifs sur l'isolation.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux surtensions externes (surtensions atmosphériques).

L'étude de ces surtensions nous interdit de prétendre à des solutions absolues mais nous permet de choisir le tracé de la ligne et le mode de protection électrique à installer.

Au chapitre III on a étudié les contraintes diélectriques (résistivité, permittivité, rigidité et pertes diélectriques), ces contraintes nous permettent de choisir l'isolation en fonction du milieu et du facteur économique.

Au chapitre IV on a étudié les décharges électriques, parmi ces décharges l'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. L'étude de ce chapitre est nécessaire pour la suite de ce travail. L'effet couronne prémédité pour ces pertes diélectriques et ces perturbations radioélectriques a un effet bénéfique sur l'atténuation des surtensions transitoires de la foudre.

Le chapitre V traite la minimisation du contournement des isolateurs par l'atténuation des surtensions transitoires. Les surtensions de foudre qui se propagent le long d'une ligne électrique subissent des déformations sous l'influence de l'effet couronne. L'injection d'une tension de 850 kV par un générateur de choc et la mesure de la tension à différentes distances (0,1km, 3km, 7km) et la simulation analogique confirment bien cette atténuation.

La dernière partie résume les différentes situations d'environnement en relation avec le niveau de pollution et l'équivalence avec une pollution artificielle pour les isolateurs de haute tension. En plus la discussion porte aussi sur les consignes de la norme pour la détermination des niveaux d'isolement en fonction des surtensions, de la nature de l'isolant, des dispositifs normatifs sur la coordination de l'isolement.

# CHAPITRE I

## **I- MODELISATION STATIQUE DU SYSTEME DECHARGE POLLUTION :**

### **I-1. Introduction :**

La bibliographie sur le comportement des isolateurs pollués présentée par IEEE et couvrant la période de 1903 à 1976, ne comptait pas moins de 900 références (1). Plus récemment, Rizk (2) a fait une analyse critique des principaux modèles mathématiques élaborés au cours des vingt-cinq dernières années pour décrire le phénomène de contournement des isolateurs sous atmosphère polluée. Parmi ceux-ci, l'étude des décharges qui s'établissent à la surface d'un électrolyte matérialisant la pollution humide, fait l'objet d'une attention spéciale justifiée par la possibilité de confronter les résultats du calcul aux mesures relevées sur un modèle de laboratoire simple à réaliser.

Cette étude chapitre ne se limite pas à l'examen critique des résultats antérieurs; elle apporte une synthèse sur ce type d'approche et présente certains résultats originaux.

### **1-2. Présentation du modèle :**

On doit à Obenaus (3) l'un des travaux les plus importants sur les premières bases quantitatives des phénomènes du contournement. Il a considéré le système simple d'une décharge qui se propage au-dessus de la surface d'un électrolyte dont la résistance représente dans le circuit équivalent la zone polluée. Ce modèle schématise l'état électrique statique du phénomène du contournement. La décharge, de longueur X, peut s'allonger, mais le modèle ne décrit pas ces modifications de longueur en fonction du temps. Les figures (I.1.a et I.1.b) montrent respectivement, le système expérimental correspondant à cette modélisation et le circuit électrique équivalent.

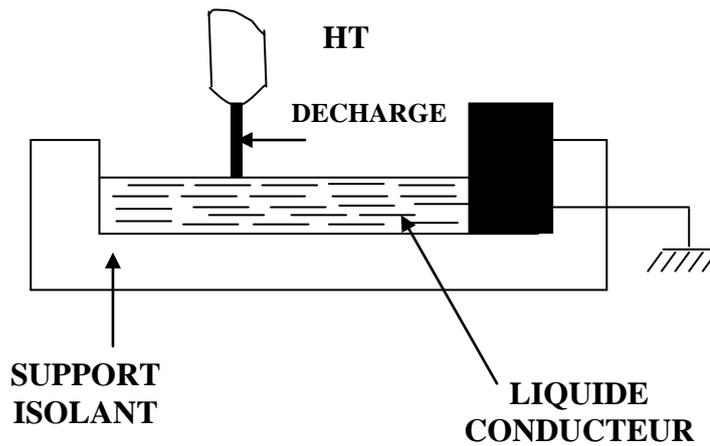
Pour un système unidimensionnel, les équations d'Obenaus sont les suivantes:

$$U = V_d + V_p \quad \text{I.1}$$

$$V_p = (L - x) ri \quad \text{I.2}$$

U étant la tension appliquée,  $V_d$  la chute de tension totale dans la décharge,  $V_p$  la chute de tension dans la couche conductrice et r la résistance linéique de la pollution.

$V_d$  qui est fonction du courant i, dépend de la nature de la décharge.



a) Système expérimental :

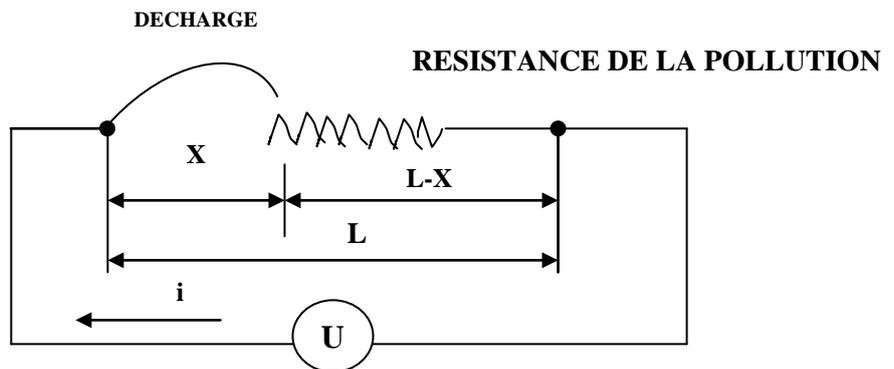


Figure I-1 : Circuit expérimental et équivalent du modèle d'Obenaus.

b) Circuit électrique équivalent :

Pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc, la différence de potentiel à ses bornes peut s'écrire.

$$V_d = x.E_a + U_e \tag{I.3}$$

$U_e$  représentant la chute de tension cumulée aux deux électrodes et comprenant la partie cathodique  $U_K$  et la partie anodique  $U_a$ .

Dans l'expression (I.3) apparaît le champ électrique de la colonne positive de la décharge que l'on peut écrire sous la forme suivante:

$$E_a = A i^{-n} \tag{I.4}$$

Où A et n sont deux constantes définies par les conditions expérimentales. Nous verrons par la suite que le graphe E (i) peut aussi être représenté par une expression différente de l'équation (I.4), mais qui conserve la même allure à la variation E(i) déterminée expérimentalement; dans la gamme des courants intéressant cette étude, lorsque le courant augmente, E diminue et  $U_e$  reste sensiblement constante.

L'équation complète du circuit devient alors:

$$U = x A i^{-n} + (L-x) r i + U_e \quad \text{I.5}$$

Ce schéma équivalent suppose une couche conductrice unidimensionnelle de longueur L- x uniforme sur la ligne de fuite de l'isolateur. On considère que les paramètres A et n sont des constantes dépendant essentiellement du milieu dans lequel brûle la décharge.

Dans notre système, la gamme des courants correspondant au phénomène s'étend entre 5mA et 1A.

Comme nous travaillons à la pression atmosphérique normale, nous en concluons que les décharges impliquées sont du type intermédiaire entre la luminescence et l'arc.

### **I-3. Application à la détermination de la tension de contournement. :**

La décharge ne peut s'allonger jusqu'au contournement que si l'équation (I.1) est valable quel que se soit  $X \in [ X_0, L ]$ ,  $X_0$  étant la longueur initiale de la décharge après son amorçage. La plus petite valeur de la tension U appliquée au système qui permet de remplir cette condition sera choisie comme tension de contournement.

Nous exposerons brièvement les principaux travaux (5), (8) qui ont mis en évidence les conditions électriques critiques du modèle: ce sont les valeurs limites qui, permettant le contournement, n'assurent plus au système sa stabilité.

#### **I-3-1. Conditions électriques critiques du modèle :**

Si l'on écrit l'équation (I.5) sous la forme suivante:

$$V = U - U_e = x A i^{-n} + (L - x) r i \quad \text{I.6}$$

Et le courant comme fonction de la variable  $x$ , on trouve que les coordonnées du minimum de la courbe  $V(i)$  à  $x$  constante (fig.I.2) sont:

$$I_m = [ n x A / r (L-x) ]^{1/n+1} \quad I.7$$

$$V_m = (n + 1) (A.x)^{1/n+1} [(L-x) r/n]^{n/n+1} \quad I.8$$

La figure I.3 reproduit un schéma proposé par Alston et Zoledziowski (4) qui met en évidence les valeurs critiques  $X_C$  et  $V_c$  de la décharge.

Pour une résistance par unité de longueur  $r$  donnée,  $V_m$  représente la tension minimale capable d'alimenter la décharge de longueur  $x$ . Supposons que la tension appliquée soit égale à  $V_{AB}$  et que la longueur de la décharge soit inférieure à  $x_c$ . La décharge pourra s'allonger jusqu'à la distance  $X_A$ ; au-delà de cette valeur, elle s'éteindra, car la tension est insuffisante pour alimenter la décharge jusqu'au contournement. Ce même raisonnement s'applique à toute tension inférieure aux valeurs critiques données ci-dessus. A partir de (I.7) et (I.8) on peut déduire les expressions de la longueur, du courant, et de la tension critique.

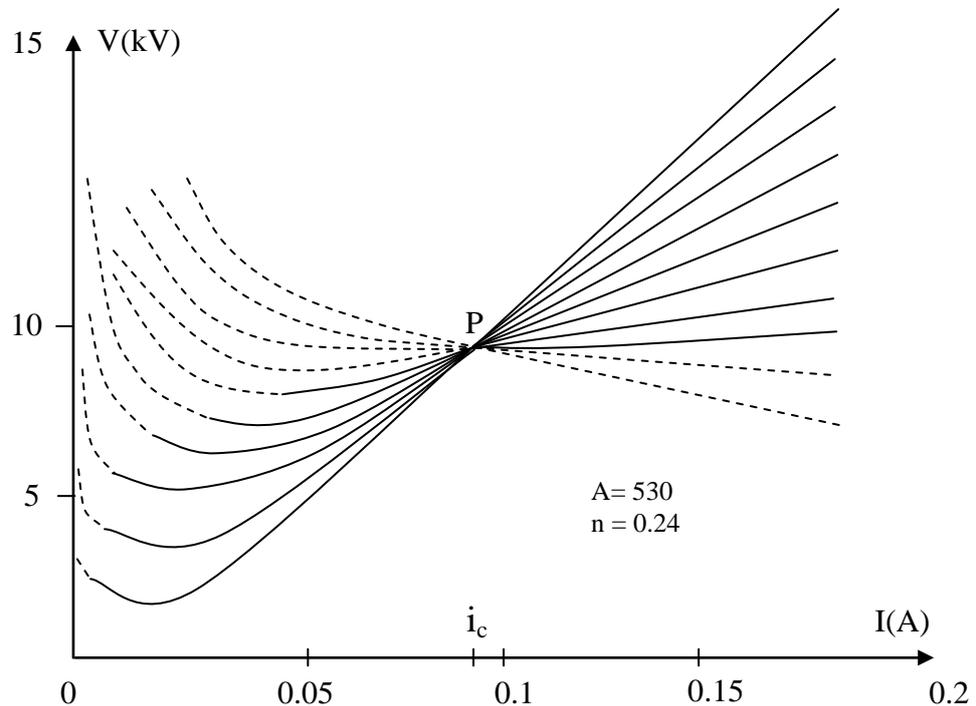
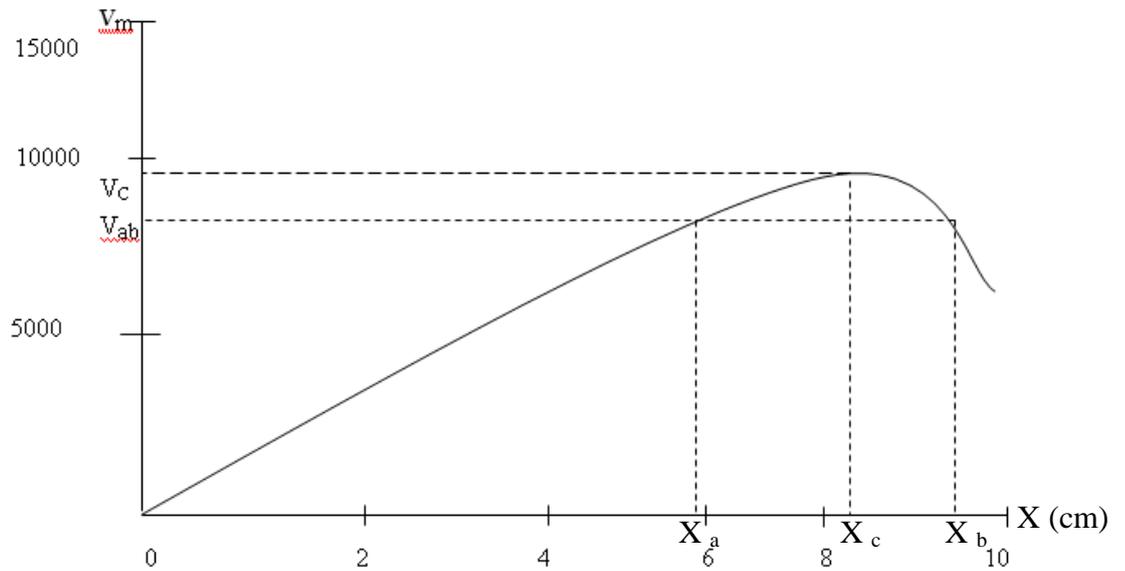


Figure I-2 : Caractéristique  $V(i)$  pour différentes valeurs de  $X$

- Points électriquement stables
- ..... Points électriquement instables



**Figure I-3 : Tension minimale aux bornes du modèle en fonction de la longueur de la décharge**

$$X_C = L / (1+n) \quad \text{I.9}$$

$$I_C = (A/r)^{1/n+1} \quad \text{I.10}$$

$$V_C = L.A^{1/n+1} . r^{n/n+1} \quad \text{I.11}$$

L'analyse de l'équation I.6 nous montre que le contournement dépend de la tension d'alimentation de la résistance de pollution et de la fonction décharge et de la longueur de fuite.

Parmi ces trois paramètres nous avons focalisé notre étude sur la forme du profil de l'isolateur.

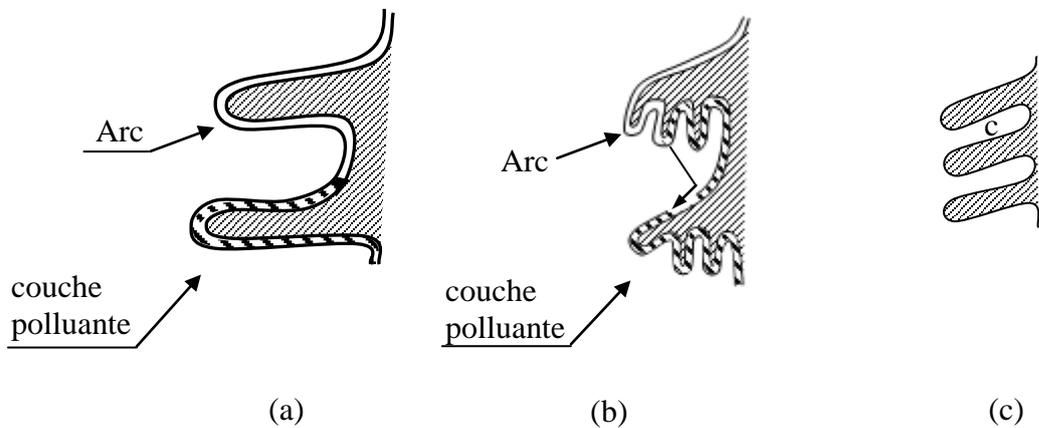
#### **I-4. Influence de la forme et de la position des isolateurs. :**

##### **I-4-1. Influence de la forme des isolateurs :**

La longueur de fuite est un important paramètre de la tenue des isolateurs sous pollution. Pour augmenter les performances d'un isolateur, on pourrait donc être tenté d'augmenter la longueur de fuite.

Ce raisonnement n'est pas fondamentalement faux mais des restrictions doivent être apportées.

En effet, considérons deux isolateurs type support a et b, l'un de profil simple (a) et l'autre (b) comportant des nervures de profil dit "anti-pollution".



**Figure I-4 : Influence du profil sur le mécanisme de contournement.**

Lorsque les isolateurs sont identiquement pollués, en admettant une couche uniformément répartie, et soumis à une même contrainte par unité de longueur de ligne de fuite, des arcs se développent. Si les arcs en développant restent en contact avec la surface isolante, la ligne de fuite est complètement utilisée figure (I-4a) et l'isolateur suit la loi générale de performances des isolateurs.

Si par contre, les arcs en se développant ne restent pas parfaitement en contact avec l'isolant mais adoptent un trajet court comme le montre la figure (I-4b) en amorçant dans l'air, une partie de la ligne de fuite n'est pas utilisée.

Il est clair que la tension de contournement de l'isolateur B sera inférieure à celle de l'isolateur A.

Il n'est pas possible à l'heure actuelle de déterminer d'une manière sûre les points le long de la ligne de fuite entre lesquels des amorçages dans l'air risquent de se produire, mais de toute évidence, pour un isolateur dont la distance  $c$  entre les ailettes est trop faible figure (I-4c) des claquages entre ailettes risquent de se produire en particulier sous pluie. Actuellement il semble raisonnable de poser  $c > 50\text{mm}$ .

Pour les isolateurs respectant cette condition il n'en reste pas vrai que deux paramètres non indépendants entrent en ligne de compte; d'une part là où les distances critiques dans l'air entre deux points le long du profil telles que l'arc soit susceptible d'amorcer d'une part, la conductivité de la couche polluante.

On peut admettre que lorsque la couche de pollution est très conductrice l'arc adopte un trajet préférentiel de la ligne de fuite.

En revanche, une mauvaise conductivité de la couche polluante favorise le claquage dans l'air entre nervures par exemple, par rapport au trajet sur la surface isolante.

L'approche théorique ne permettant pas de prendre en compte cet effet, on a été amené à rechercher un critère empirique appelé «facteur de profil» ou **FP**.

Le **FP** est, pour 1 «pas» de l'isolateur, le rapport entre la «ligne de fuite simplifiée» de l'isolateur et la ligne de fuite réelle. On veut exprimer par ligne de fuite simplifiée la ligne de fuite de longueur  $2p + s$  (voir figure I-5a)

$p$  : étant la profondeur horizontale maximale des ailettes

$s$  : étant le pas entre deux ailettes

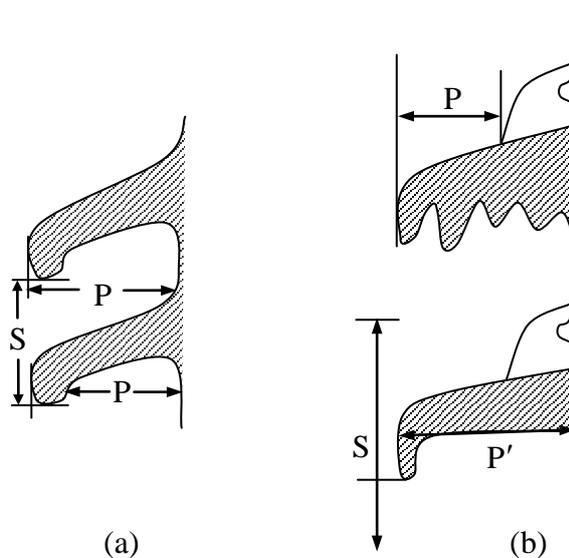
$ls$  : la ligne de fuite pour 1 pas de l'isolateur,

On écrira donc :

$$FP = \frac{2p + s}{ls} \quad I.12$$

Ou pour les isolateurs capot- tige ou à embase (figure I-5b)

$$FP = \frac{p + p' + s}{ls} \quad I.13$$

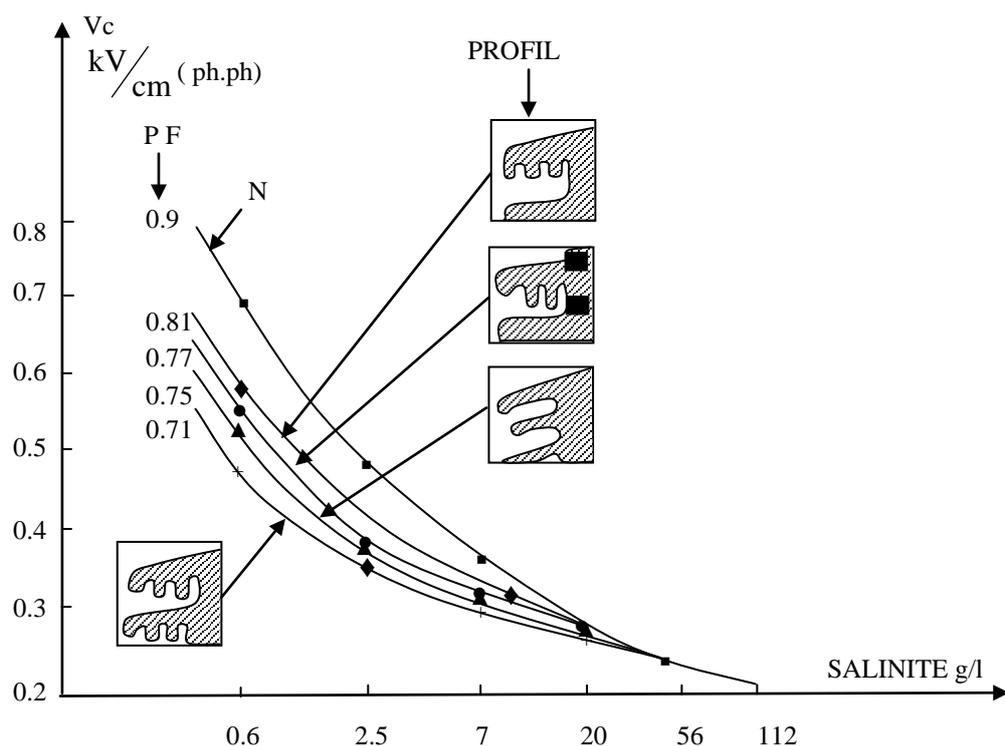


**Figure I-5 : Définition du facteur de profil (FP)**

Le **FP** est d'autant plus faible que le profil est compliqué. Il tend vers 1 et peut être supérieur à 1 pour des isolateurs de profil simple. L'influence du **FP** sur la performance des isolateurs est précisée sur la figure (I-6). La courbe de performance des isolateurs étant une courbe moyenne déterminée à partir de nombreux résultats expérimentaux on choisira ici l'enveloppe inférieure de l'ensemble des résultats comme courbe de référence. Cette courbe englobe en particulier un certain nombre de résultats expérimentaux sur des isolateurs capot-tige de profil type antipollution dont le **FP** est voisin de 0.9 et pour lesquels il est admis qu'ils suivent la loi générale de performance.

Les résultats de la figure (I-6) montrent que pour une salinité donnée la tension de contournement des isolateurs est d'autant plus faible que le **FP** est plus petit et qu'à **FP** constant, la chute de performance de l'isolateur est d'autant plus grande, par rapport à loi générale, que la salinité est plus faible.

On constate que pour les salinités supérieures à 40 kg/m<sup>3</sup> l'influence du **FP** devient négligeable, voir nulle.



**Figure I-6 : Influence du profil sur la tension de contournement des isolateurs pollués.**

N: courbe de performance de l'isolateur standard

#### **I-4-2. Influence de la position des isolateurs :**

Les résultats précédents sont relatifs à des isolateurs en position verticale. Lorsqu'ils sont utilisés en position horizontale ou inclinée (cas des chaînes d'ancrage et des chaînes en V des lignes aériennes) les isolateurs présentent généralement une meilleure tenue à la pollution. Compte tenu de la dispersion des résultats il est difficile de chiffrer cette amélioration de façon précise; 10% est un ordre de grandeur indicatif.

Ajoutons que, même en position verticale, les isolateurs peuvent présenter des variations de tenue selon qu'ils sont posés ou suspendus. Le phénomène pourrait provenir de l'effet combiné du ruissellement et de la réparation de tension le long de l'isolateur. D'une part le ruissellement est plus fort en bas de chaîne, d'autre part, la partie de l'isolateur supportant la plus forte contrainte est l'extrémité sollicitée par la tension (le bas pour une isolation suspendue, le haut pour une isolation posée).

Ainsi, lorsque ruissellement important et contrainte renforcée coïncident (isolateurs suspendus) une légère diminution de tenue est observée.

#### **I-5. LE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS SOUS POLLUTION :**

##### **I-5-1. Approche qualitative :**

Lorsque les conditions appropriées sont remplies (43), (49) le contournement d'une surface isolante polluée est le résultat d'une évolution que l'on peut schématiser comme suit :

- Dans une première phase, le courant de fuite s'écoule à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolant (plaque plane rectangulaire pour clarifier l'exposé). Il provoque un échauffement de l'électrolyte qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite le courant (figure.7 a).

- L'échauffement croissant provoque un assèchement local de la couche polluante. Une constriction des lignes de courant en résulte et par conséquent, la densité d'énergie fournie à l'électrolyte s'accroît au droit de la zone sèche. Celle-ci a donc tendance à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du courant (figure 7.1b).

La tension se trouve reportée aux «bornes» de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer. Au voisinage des pieds d'un arc local la constriction des lignes de courant conduit à un élargissement de la zone sèche (figure 7.1b).

A partir de ce stade, l'évolution de la décharge peut se faire de différentes façons :

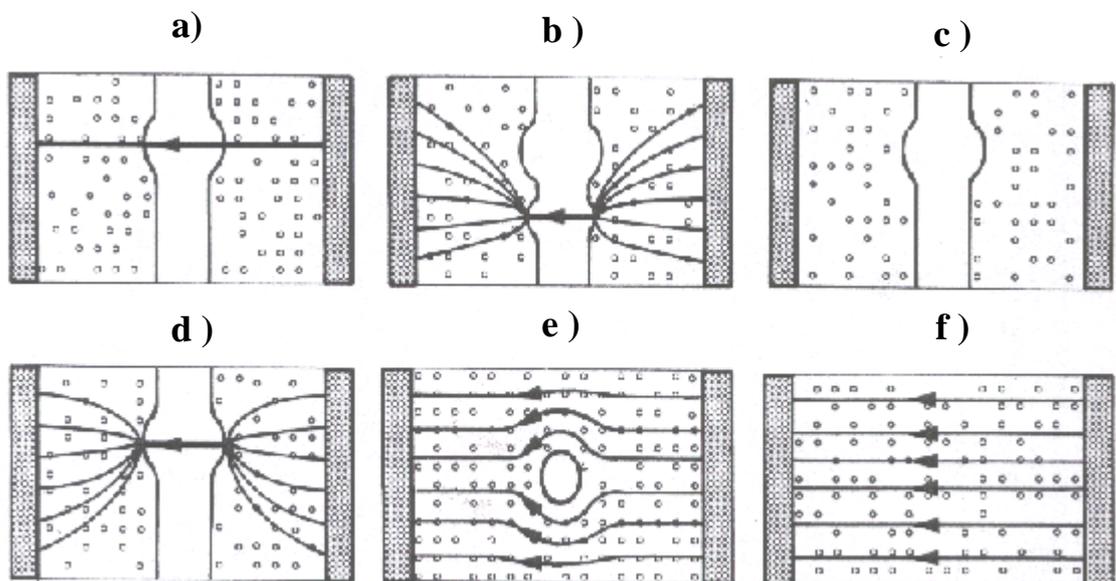
- Ou bien l'arc local peut s'éteindre (figure 7.1d)

- Ou bien il peut se déplacer latéralement pour retrouver une position plus stable correspondant plus faible longueur d'arc (figure 7.1e).

- Ou bien il peut s'allonger longitudinalement jusqu'à atteindre les électrodes et provoquer ainsi le contournement. Dans ce cas, l'allongement de l'arc se fait à la surface de l'électrolyte sans formation de zone sèche (figure 7.1f).

L'existence de ces phases dépend des nombreux paramètres caractérisant l'isolant pollué (51); tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, ...etc. Cette description schématique montre comment un arc qui a pris naissance le long d'un isolateur peut parfois s'allonger jusqu'à créer un contournement (56). Bien entendu, en pratique le phénomène commence et évolue en fonction de la forme des isolateurs, de l'hétérogénéité du dépôt solide, de l'humidification de telle ou telle partie plus ou moins protégée de l'isolateur. Il est aussi fréquent que plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne ou d'une colonne isolante. Enfin nous avons implicitement admis que la tension appliquée à l'isolant était constante (60), (91). La tension alternative présente à cet égard une différence importante du fait de son annulation périodique. Les arcs locaux s'éteignent à chaque passage par zéro et se réamorcent d'une façon aléatoire. Ce sont ces phénomènes qui sont responsables du fort niveau de perturbation radio caractéristique des isolateurs pollués (43).

Quoi qu'il en soit, la description de principe met en évidence les divers processus qu'il y a lieu de considérer pour parvenir à une modélisation complète du contournement des isolateurs : processus thermique qui gouvernent l'assèchement de l'électrolyte et processus d'ionisation qui déterminent l'amorçage ou le réamorçage des arcs locaux ainsi que leur élongation jusqu'au contournement.



**Figure I-7 : Etapes successives du contournement d'une couche polluante.**

## **I-5-2. Approche théorique :**

### **I-5-2-a) Equations générales :**

De nombreux auteurs ont imaginé de reproduire le phénomène de contournement sur des modèles simplifiés afin de pouvoir le décrire par des équations simples. Le modèle électrique de base a été proposé par Obenaus. Il est schématiquement représenté par la figure I.8 et se présente sous la forme d'une décharge de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R$  (m).

L'application de la loi d'Ohm nécessite en outre de tenir compte de la chute de tension aux électrodes. Sans entrer dans le détail, on posera que la chute de tension totale aux électrodes  $U_e$  (chute anodique  $U_a$  + chute cathodique  $U_k$ ) est indépendante du courant  $I$  qui traverse la décharge. Elle ne dépend que des conditions expérimentales que l'on désire représenter : forme des électrodes, nature de l'électrolyte etc.

$$U = U_e + U_{arc} + R(m)I \quad \text{I.14}$$

La décharge (50) est caractérisée par le champ électrique longitudinal  $E_a$  qui y règne. Il peut être mis sous la forme :

$$E_a = \frac{U_{arc}}{x} = AI^{-n} \quad \text{I.15}$$

$A$  et  $n$  sont des constantes liées aux conditions particulières sur l'isolateur.

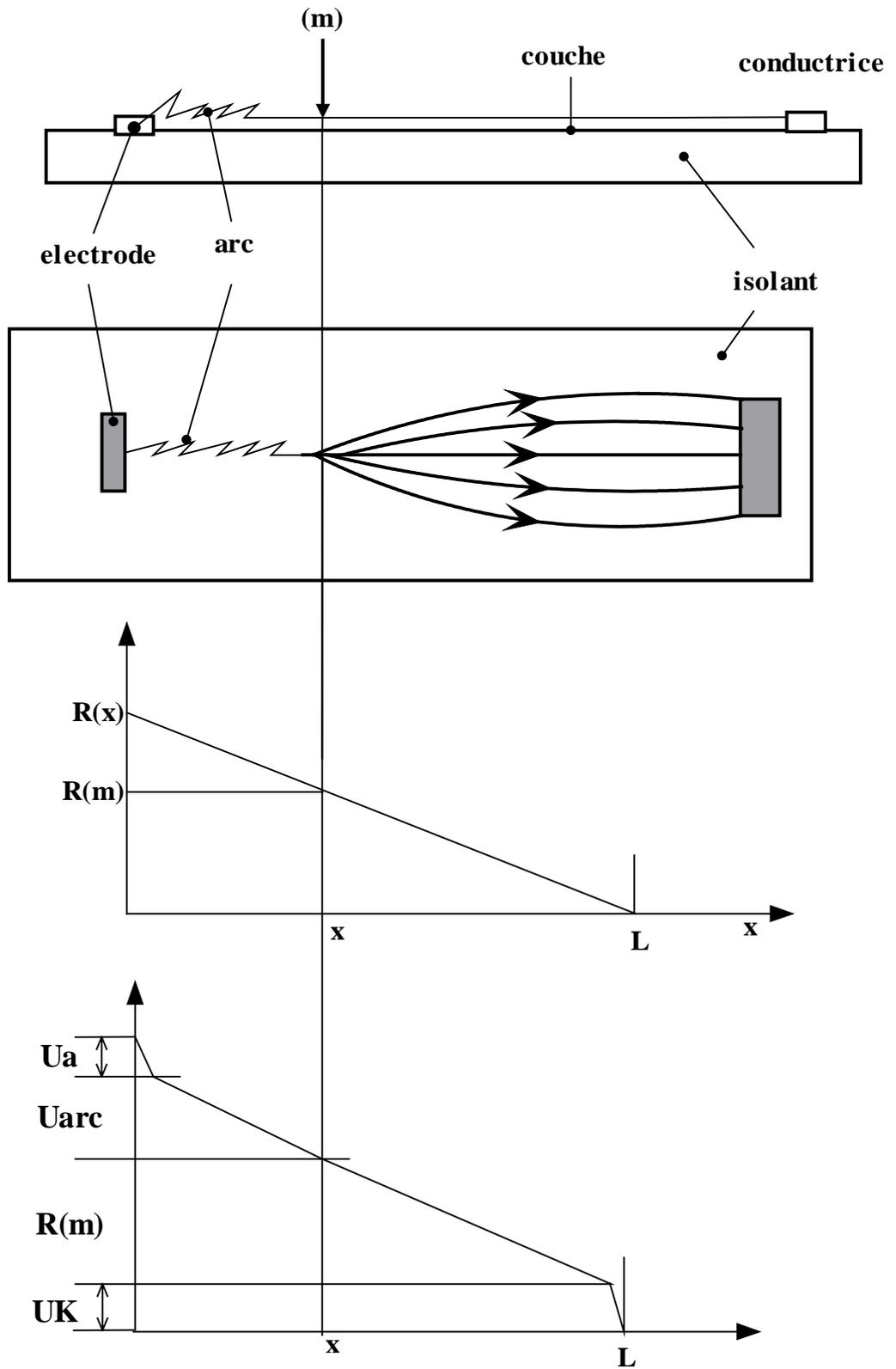


Figure I-8 : Circuit électrique utilisé pour le développement de l'arc.

L'application de la loi d'Ohm nécessite en outre de tenir compte de la chute de tension aux électrodes. Sans entrer dans le détail, on posera que la chute de tension totale aux électrodes  $U_e$  (chute anodique  $U_a$  + chute cathodique  $U_k$ ) est indépendante du courant  $I$  qui traverse la décharge. Elle ne dépend que des conditions expérimentales que l'on désire représenter : forme des électrodes, nature de l'électrolyte, ...etc.

$$U = U_e + U_{arc} + R(m)I \quad I.16$$

La décharge est caractérisée par le champ électrique longitudinal  $E_a$  qui y règne. Il peut être mis sous la forme :

$$E_a = \frac{U_{arc}}{x} = AI^{-n} \quad I.17$$

$A$  et  $n$  sont des constantes liées aux conditions particulières sur l'isolateur.

A titre d'exemple Wilkins choisit :

$$A = 63 \quad n = 0,76 \quad U_e = 840 \text{ V}$$

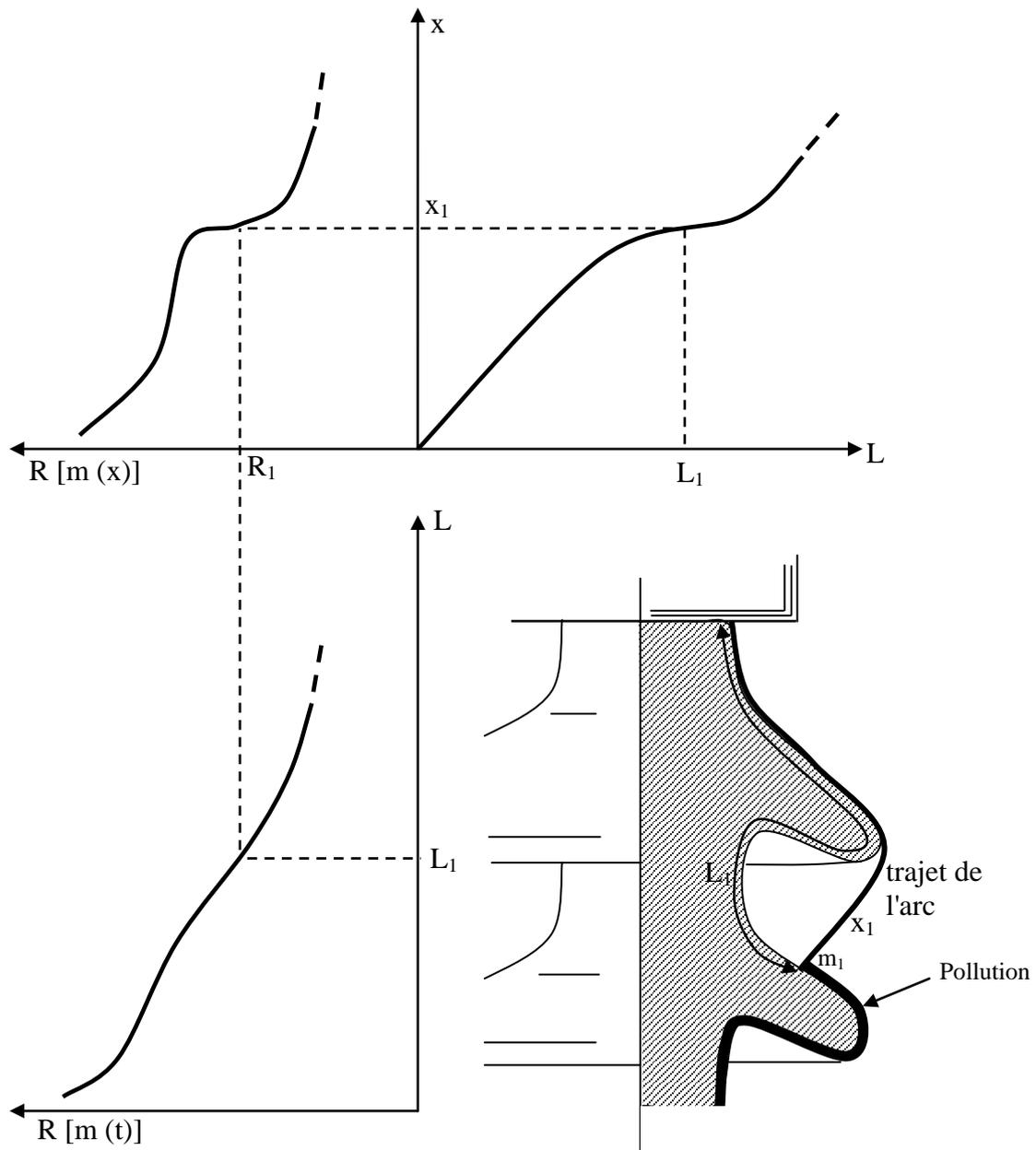
Tandis que Claverie utilise :

$$A = 100 \quad n = 0,5 \quad U_e = 0$$

$R(m)$  représente la résistance de la zone de la couche polluante parcourue par le courant de fuite. La valeur de cette résistance dépend évidemment de la position de la racine de l'arc à la surface de cette couche. Par exemple, pour un dispositif isolant de révolution tel qu'un isolateur capot et tige,  $R(m)$  s'exprime en fonction de la distance  $l$  du point  $m$  à l'une des électrodes (distance mesurée le long de la surface isolante) si évidemment on suppose une réparation concentrique de la pollution.

Lorsque l'arc qui s'établit entre une électrode et le point  $m$  se développe en demeurant au contact de l'isolant comme c'est d'ailleurs souvent le cas :

$X = l$  et  $R(m(l))$  est identique à  $R(m(x))$ .



**Figure I-9 : Détermination de la fonction caractéristique R.**

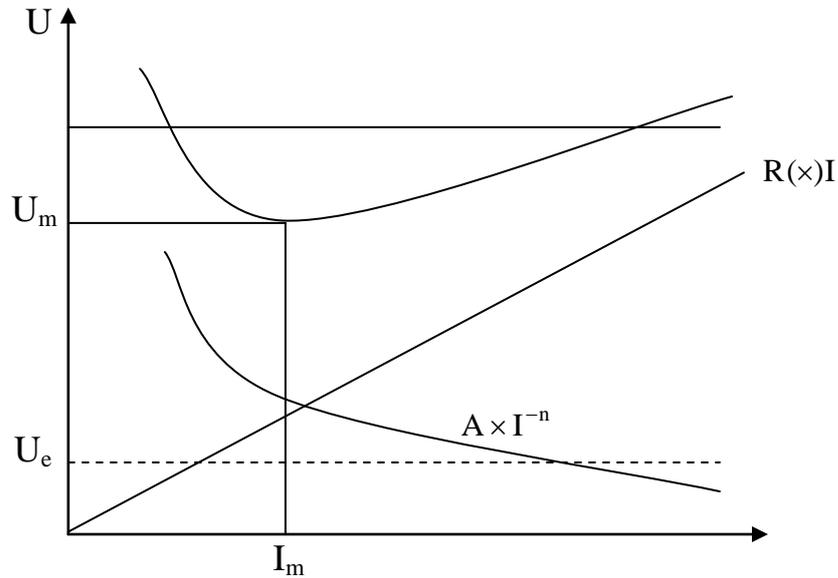
Si l'arc ne demeure pas au contact de l'isolant mais adopte un trajet plus court ( $L > x$ ), la fonction  $R(m(x))$  peut être déduite de  $R(m(l))$  à condition que l'on connaisse le trajet réel de l'arc, c'est-à-dire que l'on connaisse en fait les valeurs de  $x$  et  $l$  correspondant ou, autrement dit, la fonction  $x(l)$ . la figure I.9 donne un exemple de détermination de la fonction  $R(m(x))$  à partir de  $R(m(l))$  connaissant  $x(l)$ .

Par la suite  $R(m(x))$  sera simplement noté  $R(x)$ .

En résumé, l'équation électrique de base se met sous la forme :

$$U = U_e + x.AI^{-n} + R(x) I \quad \text{I.18}$$

Cette équation lie trois variables : la tension d'alimentation  $U$ , le courant  $I$  et la longueur  $x$  de l'arc. Elle décrit le fonctionnement statique de la décharge et a pour conséquence immédiate que pour une longueur donnée de la zone sèche, donc de l'arc, il existe une tension limite au-dessous de laquelle le courant ne peut plus circuler dans le circuit figure I.10.



**Figure I-10 : Caractéristique courant - tension du modèle de la figure I-7.**

Le courant  $I_m$  correspondant à cette tension limite  $U_m$  s'obtient par dérivation de  $U$  par rapport à  $I$  dans l'équation (I.18). On obtient successivement :

$$I_m = \left( \frac{nAx}{R(x)} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{I.19}$$

Et :

$$U_m = U_e + (1+n)(Ax)^{\frac{1}{n+1}} \left( \frac{R(x)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad \text{I.20}$$

Si la tension appliquée au système est supérieure à  $U_m$  (tension continue par exemple), la figure I-10 montre qu'il existe deux points de fonctionnement possibles. Sont-ils également stables ?

La réponse à cette question exige la connaissance du phénomène physique responsable de l'allongement de la décharge. A l'heure actuelle, ce processus n'a pas encore été éclairci. Cependant Hesketh (6), assez naturellement, a proposé d'admettre que la décharge s'allonge lorsque  $dI/dx > 0$  pour  $U$  constant. Cette condition a été reprise par la suite par de nombreux auteurs et ses conséquences ont pu être vérifiées expérimentalement. Bien qu'imposée a

priori, elle recouvre donc très probablement le mécanisme physique qui provoque l'extension de la décharge.

**I-5-2-b). Contournement sous tension continue.**

Pour expliquer les conséquences des équations précédentes, des hypothèses complémentaires sont nécessaires. Généralement, elle consiste à supposer que la résistance  $r$  par unité de longueur de couche polluante est indépendante de la position de  $m$  le long de la surface isolante. Dans ces conditions :

$$R(x) = r (L-x) \quad \text{I.21}$$

$L$  est la longueur totale de l'isolant et  $x$  la longueur de la zone sèche. Une telle couche n'est évidemment pas représentative de la réalité. C'est cependant la configuration que pour des raisons évidentes, la plupart des expérimentateurs ont cherché à reproduire (10). Elle permet, comme nous allons le voir, de dégager un certain nombre de conclusions importantes qui ne seront que quantitativement modifiées si la fonction  $R(x)$  présente une forme différente.

L'équation électrique de système s'écrit alors :

$$U = U_e + x A I^{-n} + r (L-x) I \quad \text{I.22}$$

Elle est illustrée graphiquement par la figure I.10 dans un cas particulier. On observe immédiatement l'existence d'un point multiple  $P$  dont les coordonnées s'évaluent très simplement :

$$I_p = \left( \frac{A}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{I.23}$$

$$U_p = U_e + rL \left( \frac{A}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{I.24}$$

La condition de stabilité énoncée par Hesketh à savoir:

$$\frac{dI}{dx} < 0 \quad \text{I.25}$$

On déduit très facilement de (I.22) on obtient :

$$\frac{dI}{dx} = \frac{AI^{-n} - rI}{nxAI^{-(N+1)} - r(L-x)} < 0 \quad \text{I.26}$$

En d'autres termes la décharge est stable si :

$$\left( \frac{nxA}{R(L-x)} \right)^{\frac{1}{n+1}} \leq I \leq \left( \frac{A}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{I.27}$$

La gamme de courant correspondant au fonctionnement stable est ainsi bornée inférieurement par  $I_m$  équation (I.19), et supérieurement par  $I_p$  équation (I.23) . Graphiquement cela signifie qu'aucune décharge stable ne peut être observée à droite du point P ou à gauche du minimum de la courbe  $V(I)$ . Si la longueur  $x$  de la zone sèche est faible, il est possible d'obtenir un fonctionnement stable. Par contre, si  $x$  est assez grand, la limite inférieure définie par I.27 est supérieure à la limite supérieure définie également par l'équation (I.27). Il en résulte qu'aucun fonctionnement stable n'est possible. La limite est obtenue lorsque la longueur  $X_L$  de la zone sèche est telle que le minimum de la courbe  $V(I)$  est en P. soit :

$$X_L = \frac{L}{1+n} \quad \text{I.28}$$

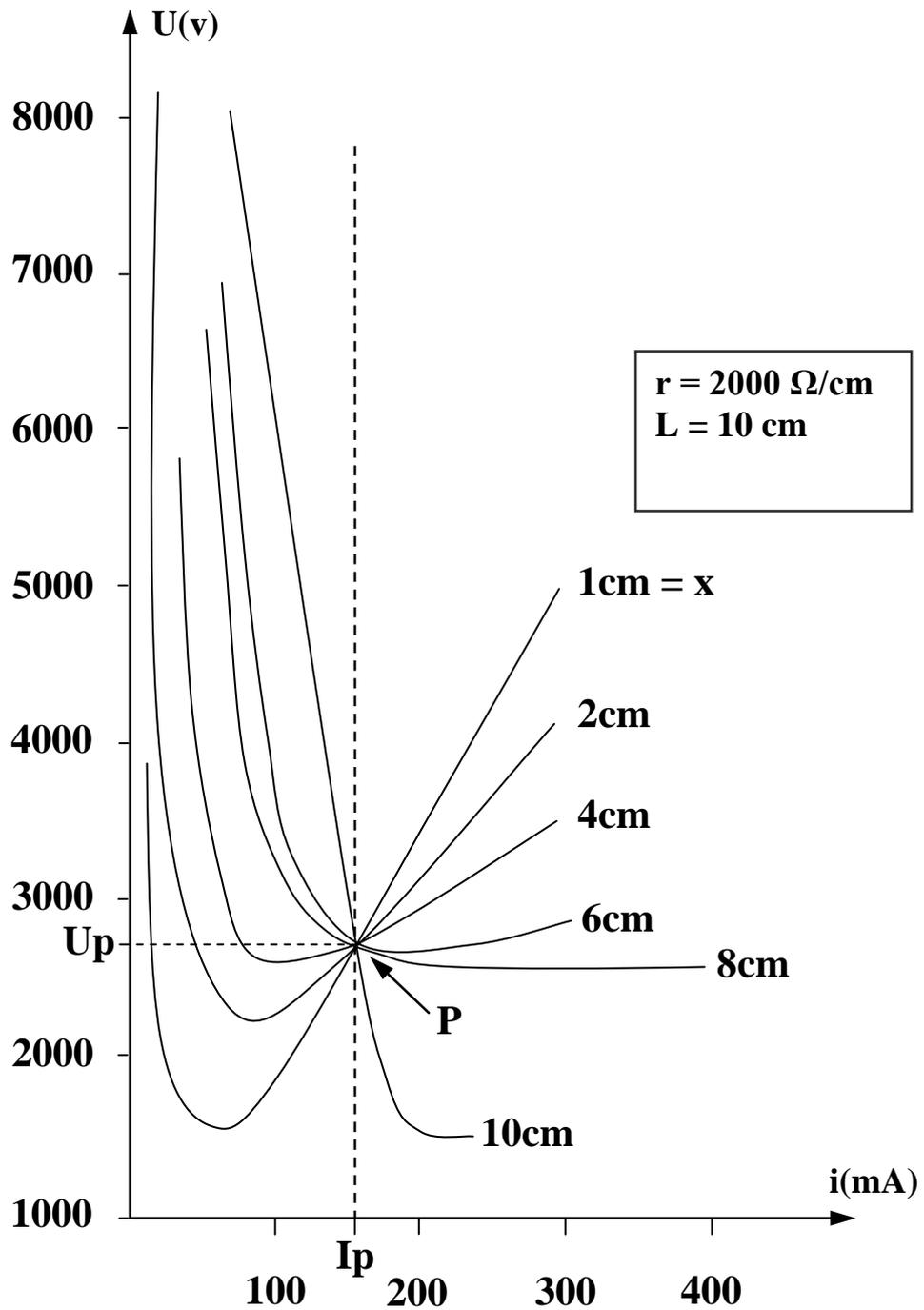


Figure I-10 : Caractéristiques tension- courant pour différentes longueurs de la zone sèche.

Cas particulier d'une surface isolante de 10cm de long recouverte d'une solution présentant une résistance de  $2000 \Omega/cm$  de ligne de fuite.

Si on prend  $n = 0,5$  suivant en cela Claverie (8) et d'autres voire (tableau 1) en annexe. On conclura qu'il est impossible d'observer un arc partiel stable dépassant le  $2/3$  de la longueur de l'isolant.

Il est important de remarquer que les deux bornes de la région stable n'ont pas la même signification. Si le courant est plus faible que la borne inférieure, la décharge évolue vers le point de fonctionnement stable correspondant à la même longueur de la zone sèche (s'il existe). Par contre, si le courant devient supérieur à la borne supérieure, la décharge évolue vers le contournement. Dans ce cas, le courant de contournement peut aussi être défini comme étant le courant pour lequel le champ électrique  $E_a$  dans l'arc devient égal au champ électrique  $rI$  dans la couche polluante. Les considérations précédentes visent essentiellement à déterminer les conditions dans lesquelles le contournement peut être déclenché. Ignorant les mécanismes physiques (9) qui concourent à allonger l'arc il est bien évidemment impossible de décrire la façon dont la décharge va évoluer entre l'état représenté par l'arc partiel le plus long possible ( $X_L$ ) et l'état final du contournement total. En particulier, il est impossible de déterminer la vitesse d'élongation et donc le temps nécessaire à l'accomplissement du processus.

Sous tension continue, si l'impédance de la source d'alimentation est assez faible, il y a tout lieu de croire que rien ne s'opposera à l'accomplissement du contournement une fois celui-ci déclenché. La tension de contournement peut donc être identifiée à  $U_p$ .

### **I-5-2-c). Contournement sous tension alternative :**

Sous tension alternative le problème se complique considérablement. En effet, on sait déjà qu'au-dessus d'une certaine tension (équation (I.20)) l'arc partiel s'éteint. Cet événement se produira donc vers la fin de chaque demi-période. Lors de l'alternance suivante, le réamorçage de l'arc partiel est une condition nécessaire du contournement qui n'est pas forcément implicitement remplie par la condition de contournement sous tension continue. On sait, en effet, que les décharges (7) dans les gaz sont caractérisées par des tensions d'amorçage et de désamorçage qui peuvent être très différentes l'une de l'autre. De plus, si l'arc partiel se réamorce, il dispose tout au plus de 10 ms pour évoluer vers le contournement complet. Cette nouvelle condition se superpose à la précédente et doit, en toute rigueur, tenir compte de la variation de tension inhérente à la tension alternative. Ignorant le mécanisme d'élongation de l'arc partiel il est malaisé de tenir compte de ces nouvelles conditions sur une base uniquement théorique. Pour tenter de contourner la difficulté, Claverie a utilisé un

dispositif expérimental permettant de formaliser les conditions précédentes de façon empirique.

## **I-6. Conclusion :**

En résumé ce chapitre traite les différentes modalités du contournement de l'isolateur et de la sévérité de la pollution. Par ailleurs la tension de contournement des isolateurs en fonction de leurs principales caractéristiques et du degré de pollution qu'ils subissent.

La confrontation de ces données permet donc en principe de dimensionner les isolateurs quel que soit le niveau de tension.

En pratique l'application de cette méthode peut poser quelques problèmes. Elle conduit en effet à proposer une longueur de fuite par site.

Lorsque les conditions locales de pollution augmentent (49), par exemple dans le cas d'extension des zones industrielles ou urbaines, l'isolement déjà en place d'un poste ou d'une ligne peut devenir insuffisant.

Le remplacement des isolateurs est une solution très onéreuse pour être envisagée.

On a alors recours aux techniques de lavage et de graissage, cette dernière technique étant plus particulièrement réservée aux isolateurs des postes.

Cependant, que les dispositifs utilisés soient fixes ou mobiles, le lavage peut avoir lieu lorsque l'installation est hors ou sous tension. Dans ce dernier cas des précautions doivent être prises pour éviter le contournement, que l'on souhaite éviter ne se produise pendant le lavage.

Le graissage est une autre technique couramment utilisée. Les graisses utilisées actuellement sont des composants siliconés qu'en plus de leur caractère hydrophobe à la propriété d'absorber les poussières.

En effet, l'huile exsudée enrobe chaque grain de poussière, processus plus ou moins lent selon la composition de la graisse. Les procédés de lavage et de graissage sont des moyens de dépannage devant les difficultés dues à la pollution.

Le niveau de la tension de service, le niveau de pollution et sans oublier le niveau isokéramique permettent de procéder à une isolation correcte.

# CHAPITRE II

## **II-1. Introduction :**

On qualifie de surtension toute tension fonction du temps entre un conducteur de phase et la terre ou entre deux conducteurs de phase, dont la ou les valeurs de crête dépassent la valeur de crête correspondant à la tension la plus élevée pour le matériel.

Si la surtension atteint plusieurs fois la tension nominale, les contraintes diélectriques risquent d'amener des claquages, des perforations et contournements d'isolants, et des amorçages phase terre ou phase et phase, ou entre les bobines dans les transformateurs et les alternateurs.

De plus, elles entraînent toujours un vieillissement accéléré des isolants et elles présentent un danger non négligeable d'électrocution.

La classification des contraintes diélectriques subies par le matériel peut être établie suivant divers critères tel que l'origine, la durée, la forme.

## **II-2. Surtensions internes temporaires :**

Nous considérons sous ce vocable tout phénomène à caractère semi permanent, soit parce que c'est un régime transitoire mais à constante de temps d'amortissement très lente, soit parce que c'est un régime stable mais anormale et dont la durée est limitée au temps de fonctionnement des dispositifs de contrôle et de protection du réseau (24), (26).

Elles sont en générale dues à :

- \* L'effet Ferranti.
- \* Un défaut monophasé à la terre.
- \* La perte de charge.
- \* La ferrorésonance.

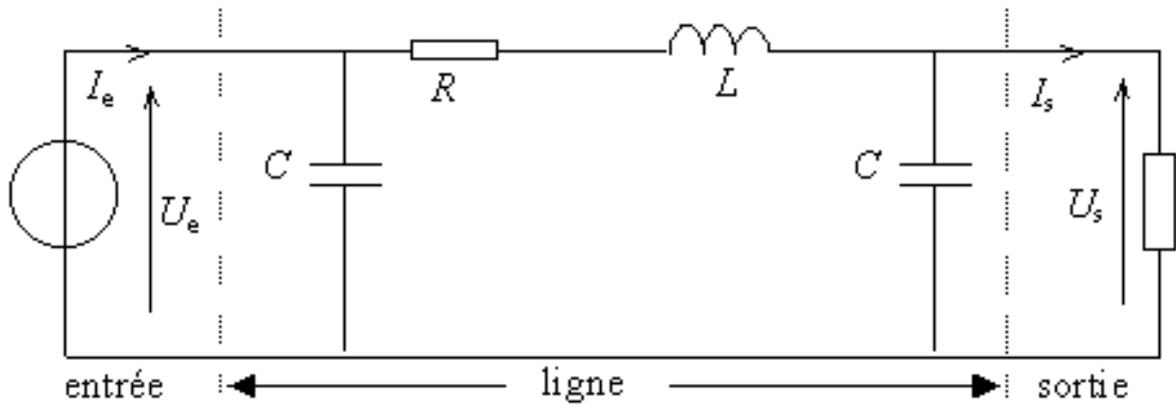
### **II-2-1. Surtension à l'extrémité d'une ligne ouverte (effet Ferranti)**

Une ligne est un élément à constantes réparties que nous pouvons imaginer comme constituée d'une échelle de cellules élémentaires : inductance série, capacité parallèle figure II-1.

Chaque cellule est constituée d'un circuit résonnant dont le gain est très légèrement supérieur à l'unité (43), (48). On conçoit donc bien que la tension sera plus élevée en extrémité de ligne et que cette augmentation sera donc d'autant plus importante que la ligne soit plus longue.

Chaque cellule est constituée d'un circuit résonnant dont le gain est très légèrement supérieur à l'unité (43), (48). On conçoit donc bien que la tension sera plus élevée en extrémité de

ligne et que cette augmentation sera donc d'autant plus importante que la ligne soit plus longue.



**Figure II-1 : Schéma équivalent : Ligne à paramètres distribués**

Ce résultat peut d'ailleurs se montrer rigoureusement à partir des équations de télégraphistes de la ligne considérée comme quadripôle (44) :

$$V(x) = V_0 \cdot \cosh \gamma x - Z_c \cdot I_0 \cdot \sinh \gamma x \quad \text{II.1}$$

$$I(x) = I_0 \cdot \cosh \gamma x - \frac{1}{Z_c} V_0 \sinh \gamma x \quad \text{II.2}$$

$V, I$  : tension et courant au point d'abscisse ( $x$ ).

$V_0, I_0$  : tension et courant à l'origine.

$Z_c$  : Impédance caractéristique, 
$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$\gamma$  : Coefficient de propagation, 
$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \text{ avec } \omega = 2\pi f$$

En extrémité de ligne ouverte ( $x = l$ ) ; le courant est nul ; donc on déduit de II.2 :

$$I_0 \cosh \gamma l = \frac{1}{Z_c} V_0 \sinh \gamma l \quad \text{II.3}$$

On a alors :

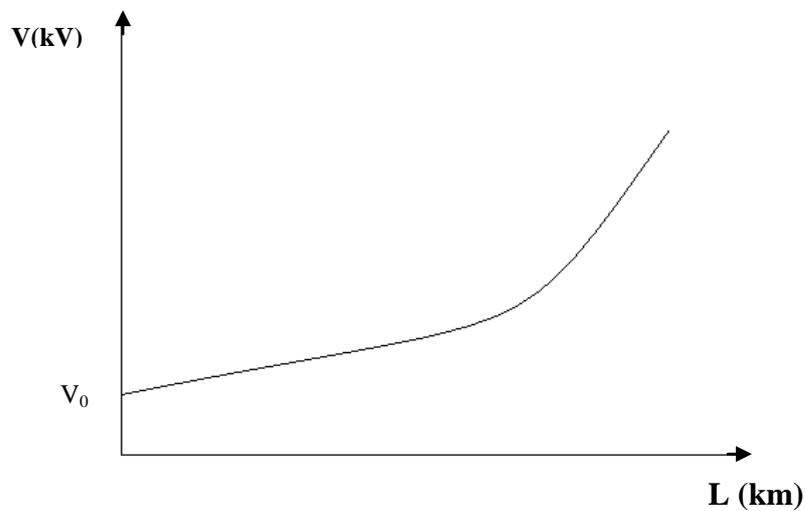
$$V(l) = V_0 \cosh \gamma l - V_0 \frac{\sinh^2 \gamma l}{\cosh \gamma l} = V_0 \frac{1}{\cosh \gamma l} \quad \text{II.4}$$

Tant que  $\gamma l$  est suffisamment petit ; l'équation II.4 peut se limiter à son développement au second ordre ; soit :

$$V(l) \approx V_0 \left(1 + \frac{\gamma^2 l^2}{2}\right) \quad \text{II.5}$$

En première approximation :  $G = 0$  et , R petite ; donc :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{R}{Z_c} + j\omega\sqrt{LC}$$



**Figure II-2 : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte.**

On déduit donc :

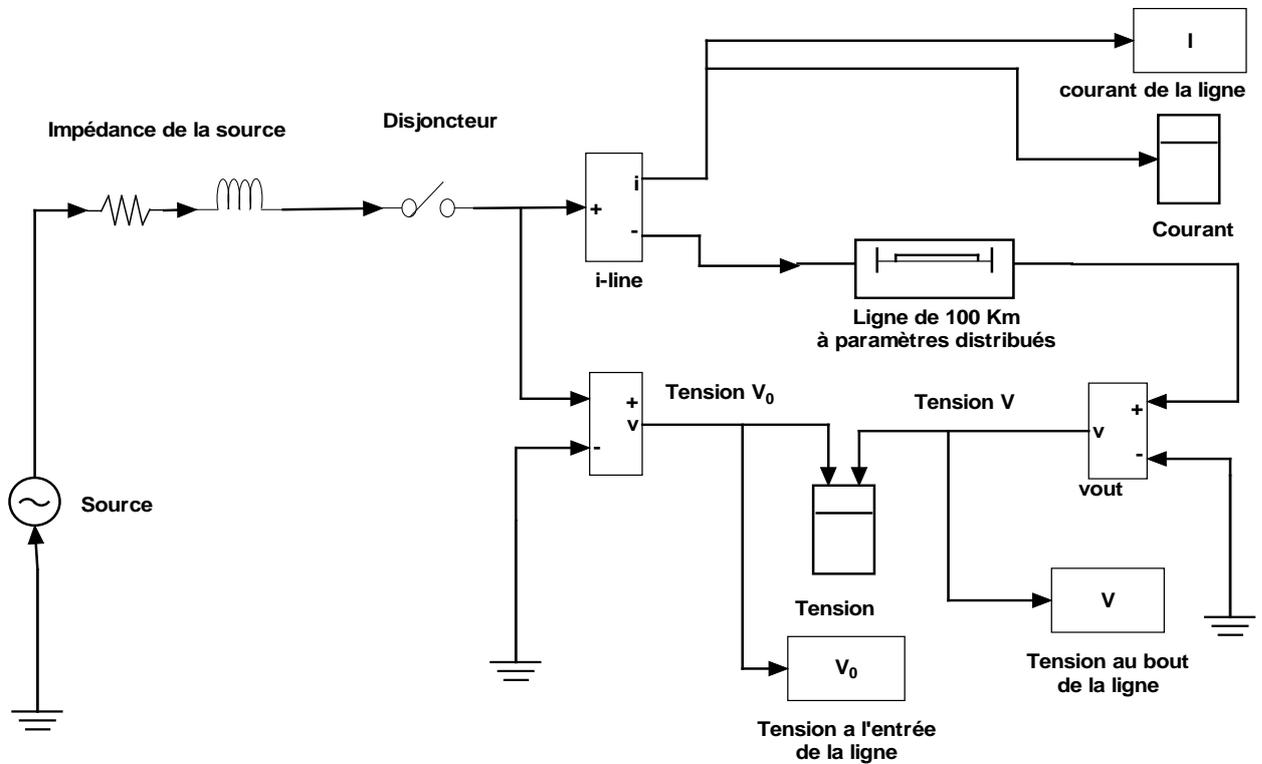
$$V = V_0 (1 + 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot L^2) \quad \text{II.6}$$

L'équation II.6 est illustrée par la figure II-2.

**II-2-1-a). Modèle (Matlab/ Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribués lors de son à enclenchement à vide :**

Le modèle de simulation a été construit par l'utilisation des éléments de la bibliothèque de Simulink 6.5 représenté sur la figure II-3. Afin d'étudier le comportement d'une ligne lors de son déclenchement à vide, on a procédé à une simulation numérique en adoptant un modèle d'une ligne à paramètres distribués figure II-3.

Etant donné que le déclenchement s'effectue en triphasé et afin d'alléger les calculs on a pris en considération une seule phase de la ligne.



**Figure II-3 : Modèle (Matlab / Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribués lors de son déclenchement à vide.**

Les données de la ligne prise dans le modèle sont:

$$U = 380 \text{ KV}$$

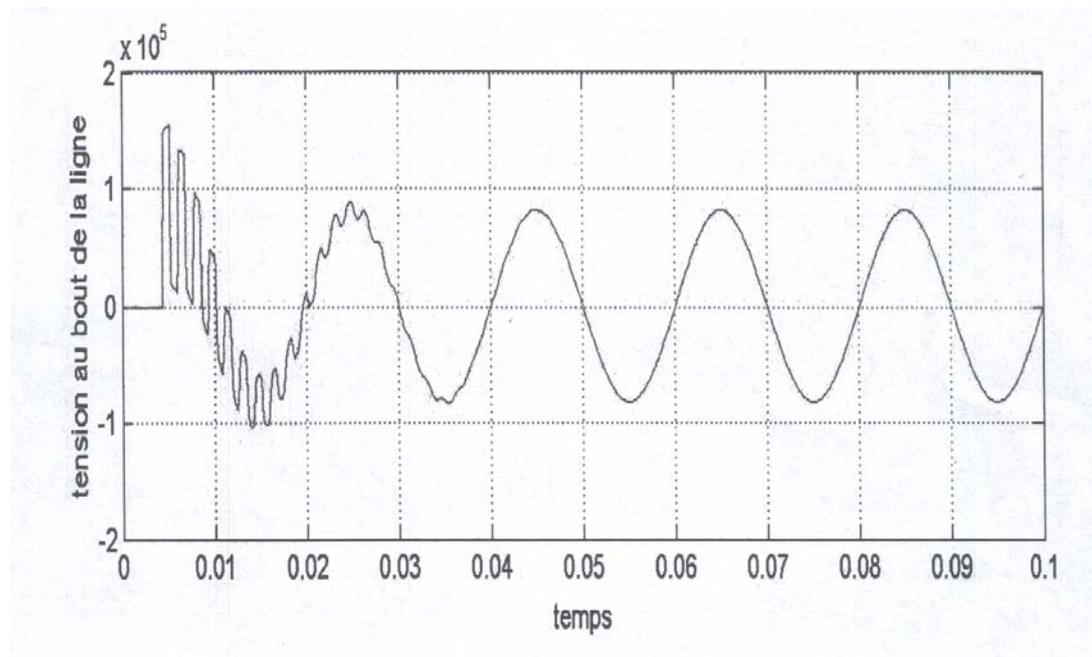
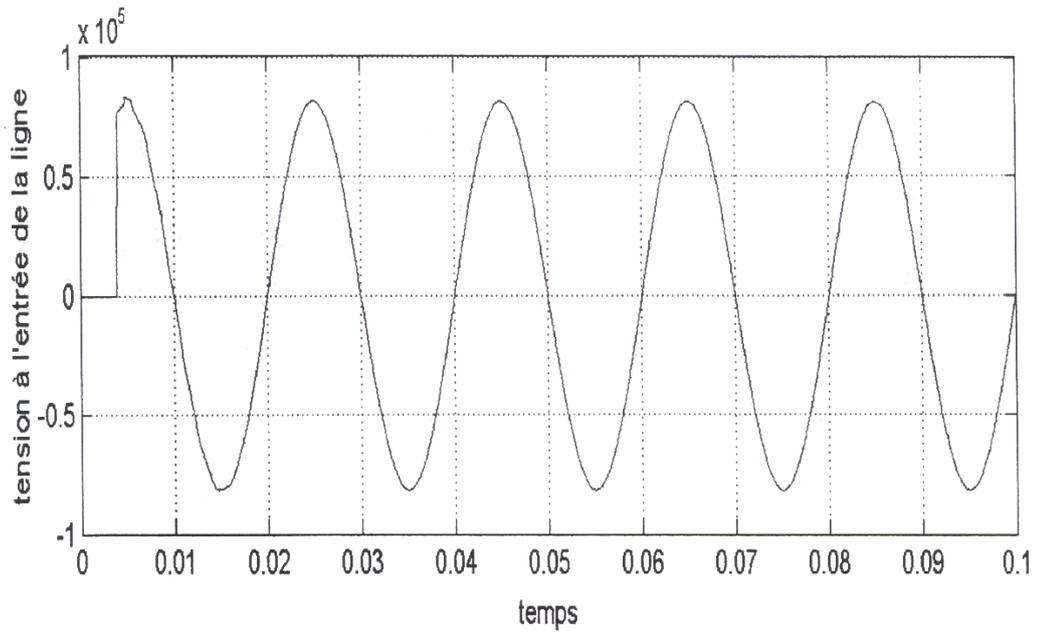
$$R_0 = 0.2568 \Omega / \text{Km}$$

$$L_0 = 2.0 \text{ mH} / \text{Km}$$

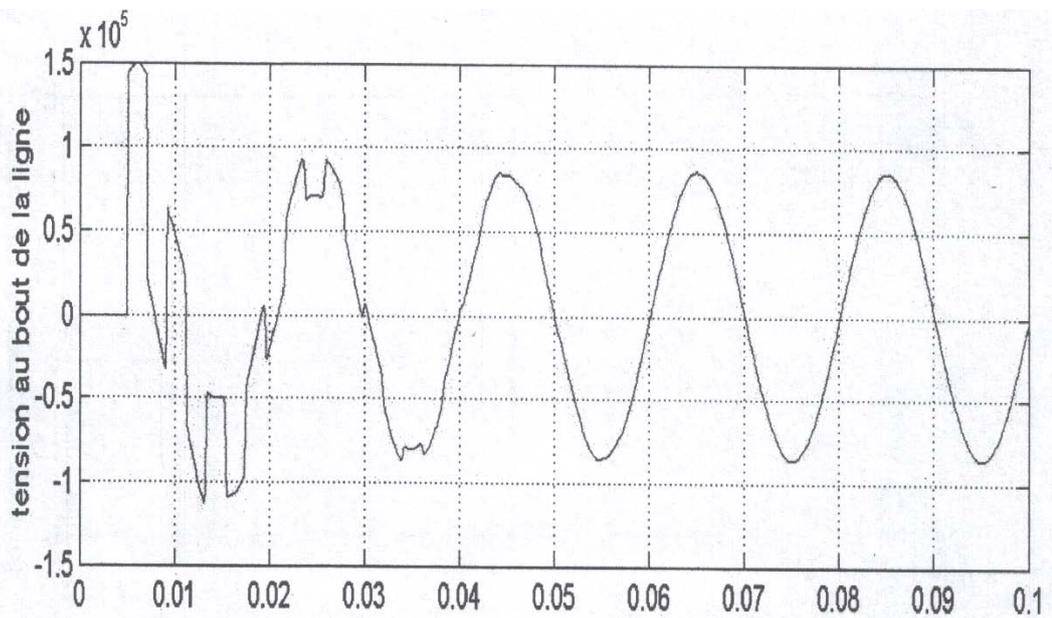
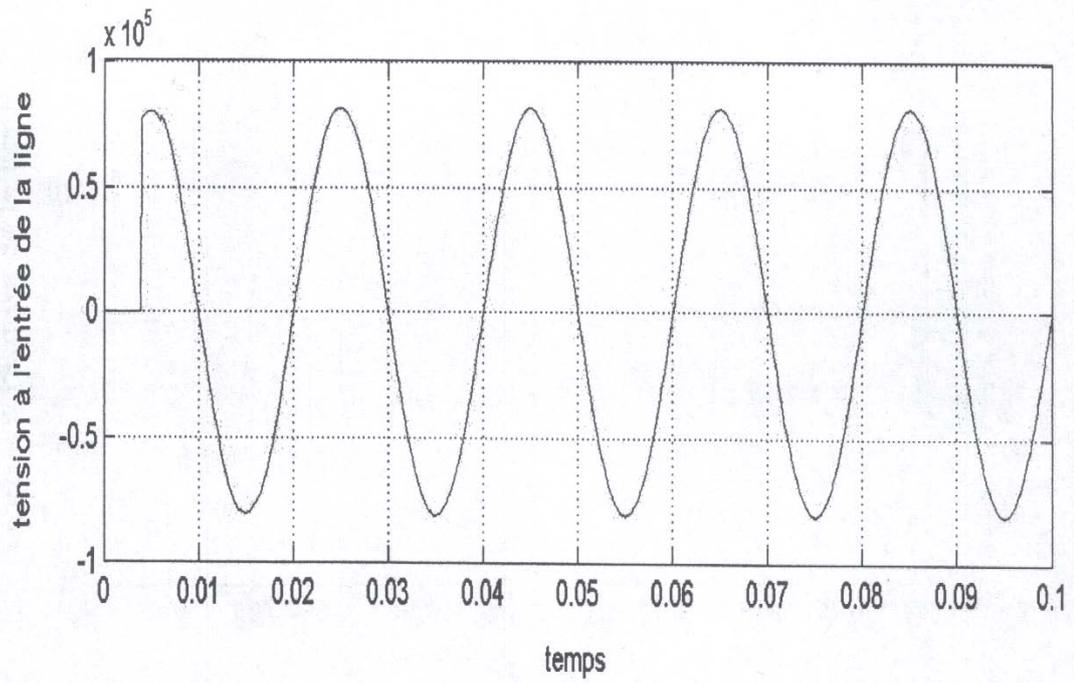
$$C_0 = 8.6 \text{ nF} / \text{Km}$$

Pour trois longueurs différentes :  $L_1 = 100\text{Km}$ ,  $L_2 = 250\text{Km}$ ,  $L_3 = 500\text{Km}$ .

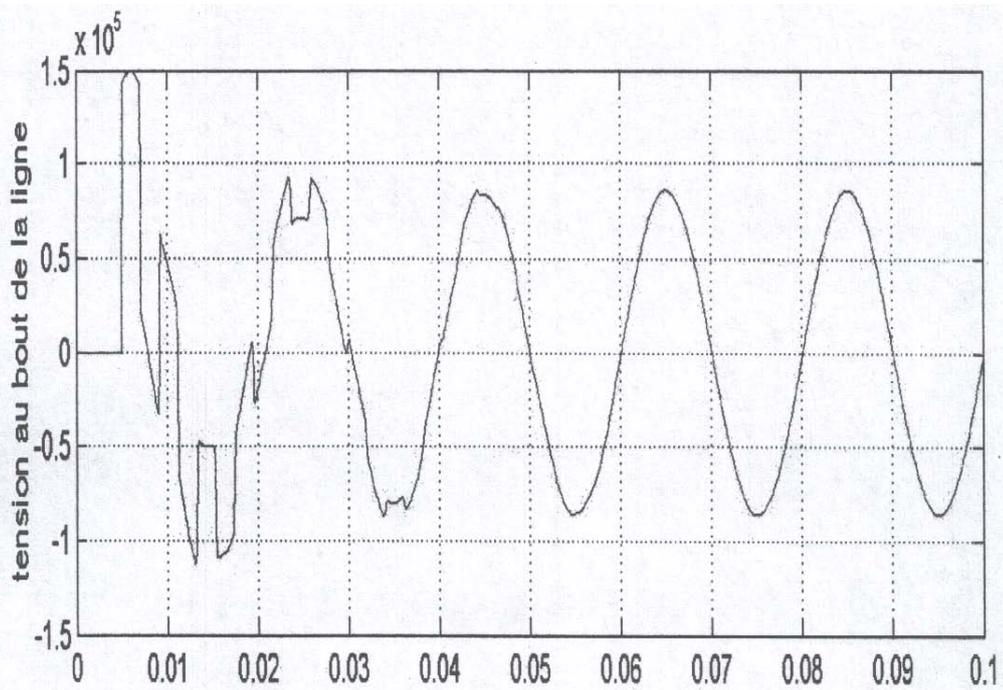
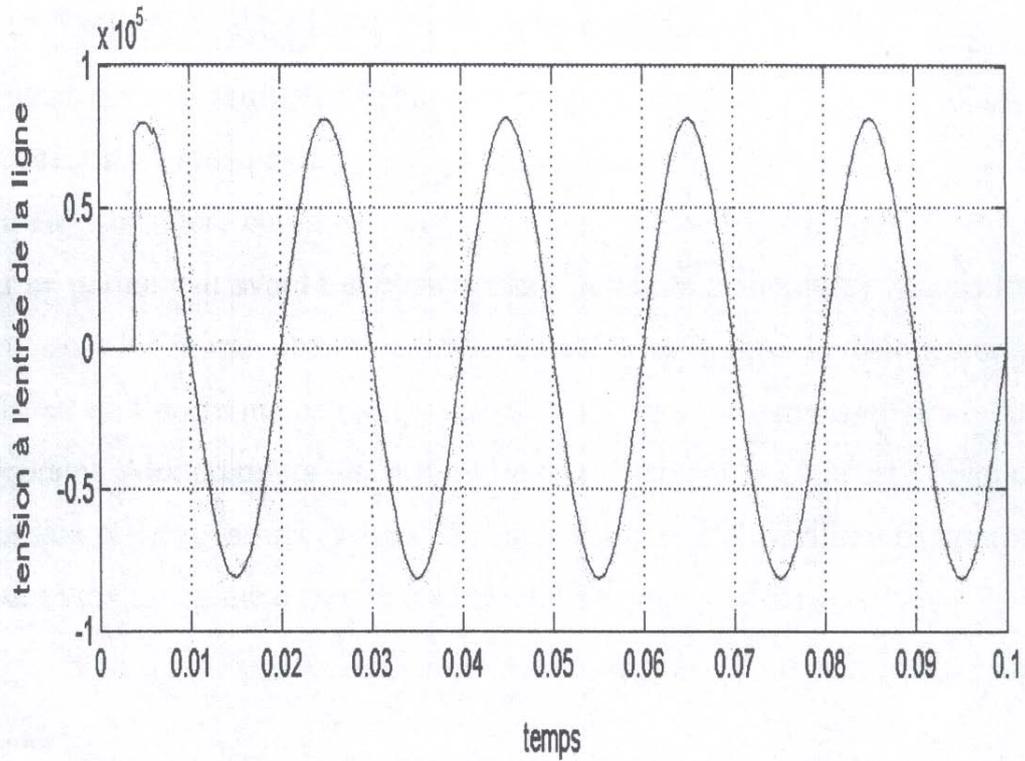
Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures (II-4a ,II- 4b, II-4c).



**Figure II-4-a : Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement  $L_1 = 100\text{Km}$ .**



**FigureII-4-b : Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement  $L_2$  =250Km.**



**Figure II-4-c : Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement  $L_3 = 500\text{Km}$**

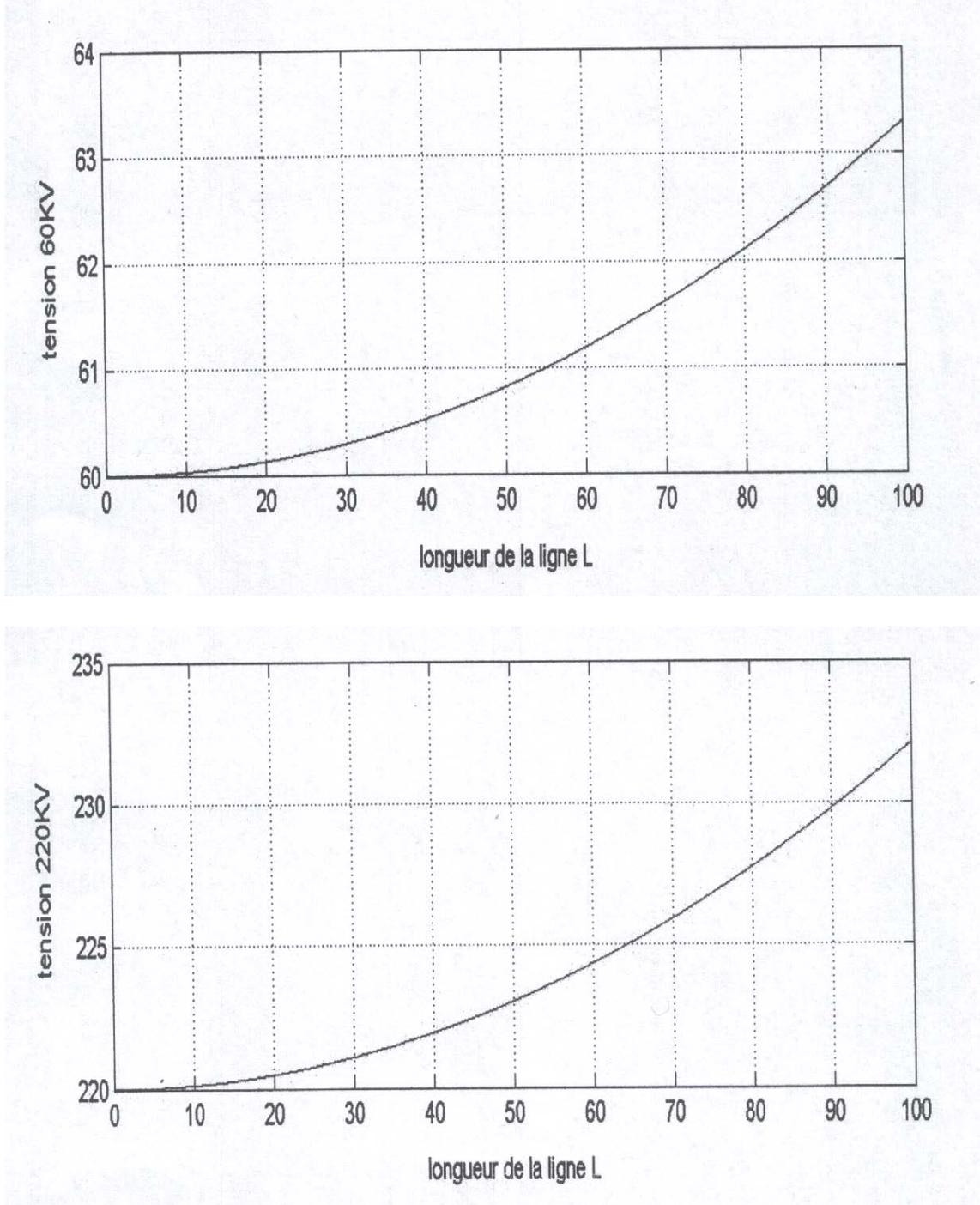
**II-2-1-b). Analyse du comportement d'une ligne pour différents niveaux de tension :**

L'analyse de la formule (II.16) nous permet de réaliser un programme informatique Matlab dont l'organigramme est en annexe.

Dans cette analyse on a pris une ligne de 100Km de longueur, pour les niveaux de tension suivants:

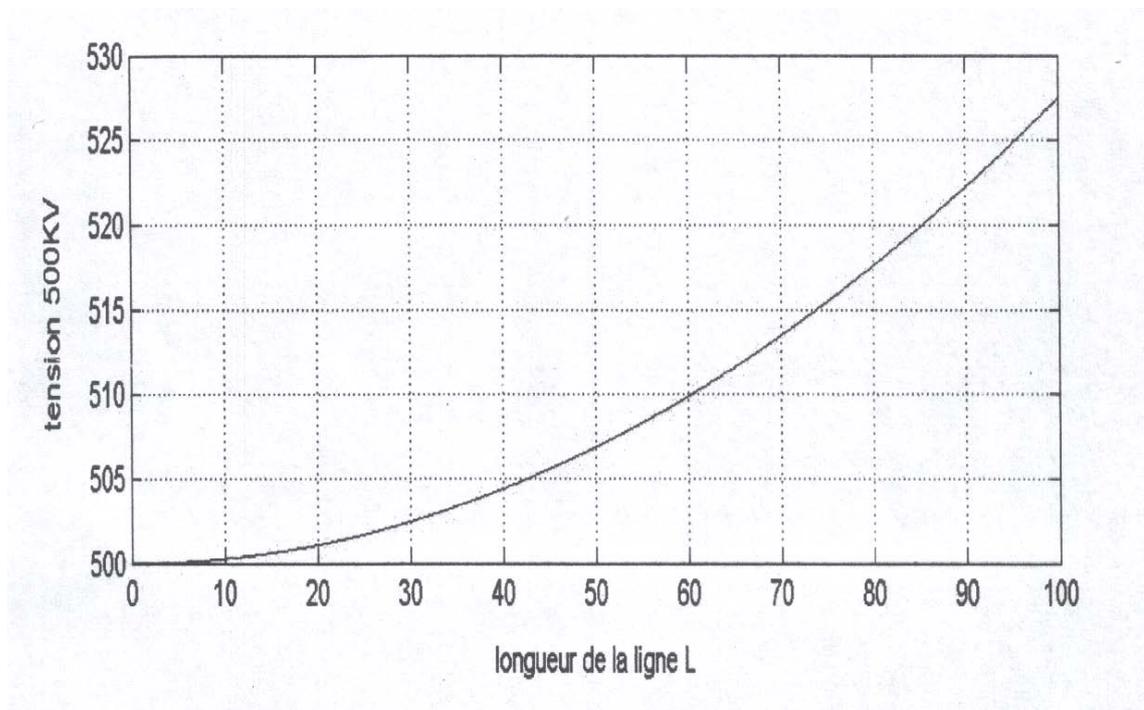
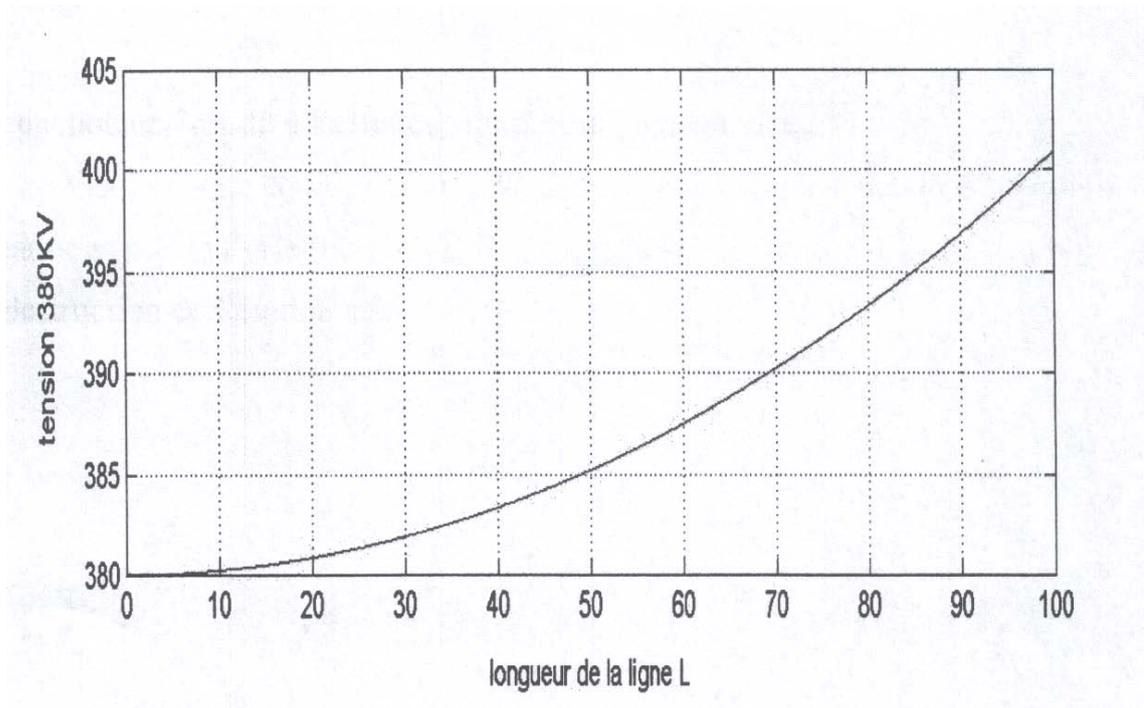
U = 60 kV, U = 220 kV, U = 380 kV, U = 500 kV.

Les résultats de ce programme sont interprétés par les courbes des figures (II-5a et II- 5b)



**Figure II-5-a : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne**

ouverte pour une tension de 60KV , 220KV.



**Figure II-5-b : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte pour une tension de 380KV, 500KV.**

### **II-2-1-c). Analyse des résultats de la simulation :**

Pour l'analyse de la simulation on remarque que la tension à l'extrémité passe par un régime transitoire qui est initialement nul puis prend brusquement le potentiel de la source d'alimentation. Le régime final peut être interpréter comme étant la superposition de deux régimes; l'un permanent et l'autre transitoire.

Aux premiers instants du déclenchement de la ligne, on remarque des oscillations dues à aux réflexions successives de l'onde injectée, ces oscillations vont s'amortir pour tendre vers le régime à fréquence industrielle imposée par la source.

L'analyse des courbes du programme informatique, pour une même longueur l'effet de la surtension à la fin de la ligne est plus importante avec l'augmentation de la tension.

Ceci est du à l'effet capacitif de la ligne (capacité entre la ligne et la terre et capacité entre les phases).

Pour les deux simulations la tension à la fin de la ligne est supérieure à la tension d'entrée de ce qui va influencer de façon négative sur l'isolation.

Ce phénomène peut sembler paradoxal: les lignes électriques sont habituellement connues pour leur "chute de tension" lorsqu'elles sont parcourues par un courant, mais lorsqu'elles ne sont pas parcourues par aucun courant, le phénomène est inversé.

L'extrémité ouverte de la ligne est à un potentiel plus élevé que celle connectée au réseau.

Ce phénomène est potentiellement destructeur pour les équipements du réseau (contournement perforation des isolateurs).

### **II-2-2. Défaut monophasé à la terre :**

Les réseaux de distribution sont constitués de lignes triphasées alimentées chacune d'elles par une source équivalente à la mise en série d'une impédance et une f.e.m imposant une différence de potentiel entre la phase considérée et un point de référence, dit point neutre.

Prenons le cas simple d'une alimentation en étoile comme l'indique la figure [II.6]. Que le neutre soit à la terre ou pas, en régime équilibré, son potentiel se fixe à celui de la terre.

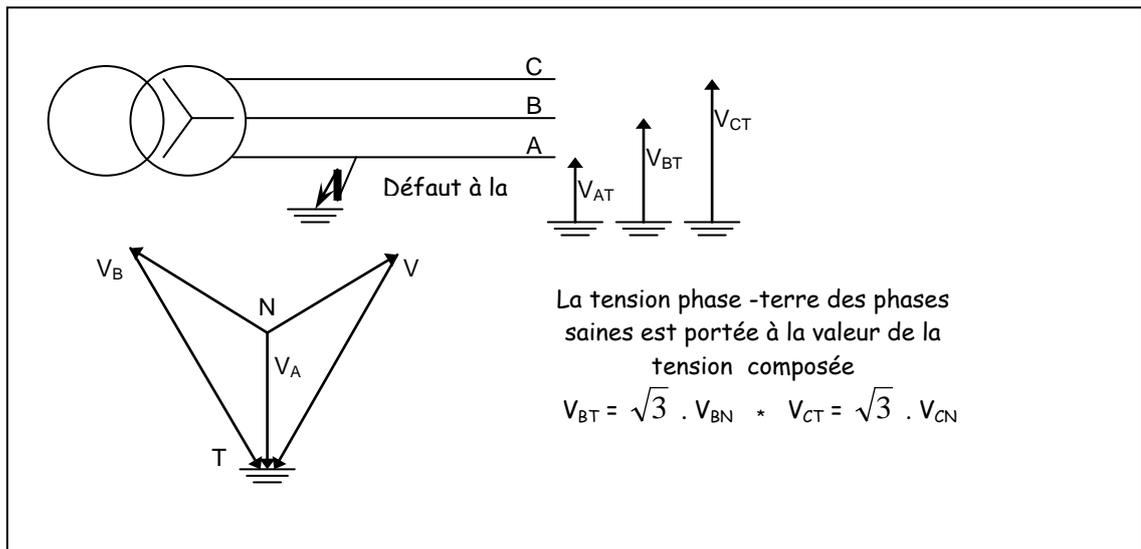
Dans le cas d'un défaut monophasé, au contraire, on voit immédiatement que le potentiel entre les phases saines et la terre reste à la tension simple (phase - neutre) lorsque le neutre de la source est directement connecté à la terre, alors il prend la valeur de la tension composée (phase - phase) lorsque ce neutre est isolé.

En pratique, le neutre des sources n'est jamais ni complètement isolé, ni complètement à la terre si bien qu'on se trouve dans un cas intermédiaire aux deux extrêmes cités.

Le réseau en tout point est alors caractérisé par son facteur de défaut ( $S_d$ ) qui par définition est le rapport entre la tension efficace la plus élevée entre une phase saine et la terre lors d'un défaut monophasé, et la tension entre phase et terre qui serait obtenue au même point sans défaut.

\* Si le réseau est à neutre parfaitement isolé,  $S_d = \sqrt{3}$ .

\* Si le réseau est à neutre parfaitement mis à la terre,  $S_d = 1$ .



**Figure II-6 : Surtension temporaire sur un neutre isolé.**

### II-2-3. Perte de charge :

Considérons le schéma de la figure [II.7]. Le transit d'énergie provoque dans les impédances du réseau des chutes de tension

$$\Delta V = Z_L i \quad \text{II.7}$$

$$S_{ch} = V_2 \cdot i^* \quad \text{II.8}$$

Donc :

$$I = \frac{S_{ch}^*}{V_2^*} = \frac{P - jQ}{V_2^*} \quad \text{II.9}$$

Alors :

$$\Delta V = (R + jX) \frac{P - jQ}{V_2^*} \approx \frac{P.R + Q.X}{V_2^*} \approx \frac{X.Q}{V_2^*} \quad \text{II.10}$$

Si on augmente la tension de source pour assurer une tension ( $V_2$ ) normalisée et si le disjoncteur ( $D_2$ ) s'ouvre (perte de la charge  $R_2$ ); il y aura apparition de l'effet Ferranti au point 3.

Supposons maintenant que ( $D_2$ ) est ouvert; la charge va donc disparaître, On aura alors une ligne qui est représentée par sa capacité. On peut écrire :

$$E = \Delta V + V_1 \quad \text{II.11}$$

$$E \approx j.X_s i + V_1 = j.X_s i - j \frac{1}{\omega C} i$$

$$E \approx j.(X_s - \frac{1}{\omega C})i \quad \text{II.12}$$

$$V_1 = \frac{-j}{\omega C} i \quad \text{II.13}$$

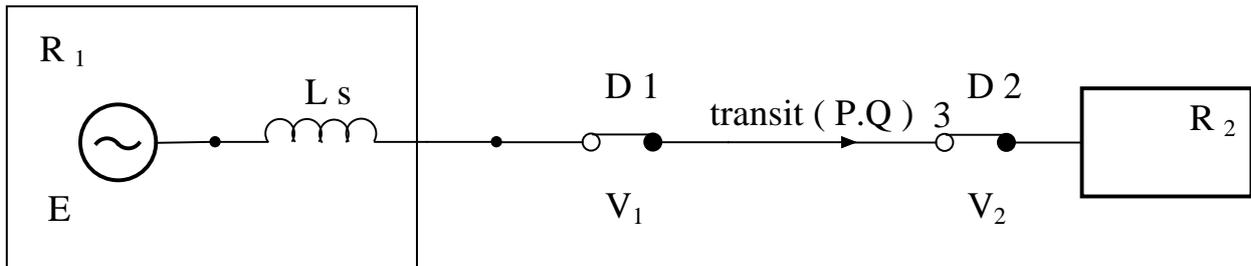
$$\frac{V_1}{E} = \frac{1}{1 - X_s \omega C_1} = \frac{1}{1 - L_s C_0 \omega^2 l} \quad \text{II.14}$$

Les différentes expressions données ci-dessous montrent clairement que les surtensions dues aux pertes de charge sont d'autant plus importantes :

Que le transit initial, en particulier sa composante réactive, est important.

Que la ligne est plus longue.

Que la source est moins puissante.



**Figure II-7 : Schéma d'étude de perte de charge**

#### II-2-4. Ferrorésonance :

A la saturation des matériaux magnétiques. Ce phénomène dynamique rare éprouve le matériel par des surintensités, donc des échauffements, parfois des surtensions, au point de causer de graves avaries.

Un phénomène de ferrorésonance peut apparaître dans un réseau lorsqu'une capacité (C) se trouve en série ou en parallèle avec une inductance équivalente (L) à caractère saturable (transformateur).

Dans le premier cas on parlera de ferrorésonance série; dans le deuxième cas de ferrorésonance parallèle. Le schéma caractérisé par le diagramme vectoriel est mis en évidence sur la figure II-8.

Le terme de ferrorésonance désigne des oscillations anormales; dans un réseau électrique; pouvant se stabiliser et dues ferrorésonance série.

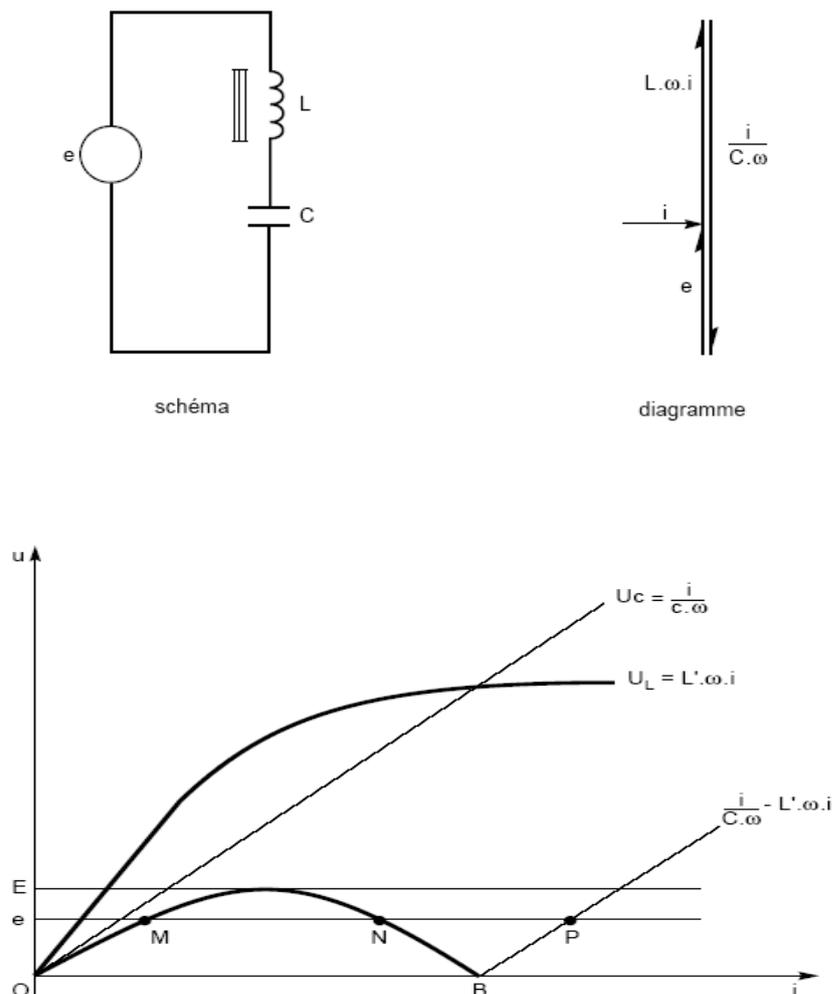


Figure II-8 : Principe de la ferrorésonance

En effet, ce circuit est représenté par une inductance série à noyau saturable L et la capacité du réseau C, ceci facilite la compréhension de ce phénomène grâce à la figure II-8.

Il est alors possible de représenter les trois courbes ainsi :

$$U_C = i / C \omega , \quad U_L = L \omega i , \quad U = i / C \omega - L \omega i \quad \text{II-15}$$

- La première est droite de pente  $1 / C \omega$ .
- La deuxième présente un coude de saturation.
- Et la dernière permet de visualiser deux points de fonctionnement (O et B) pour lesquels la tension aux bornes de l'ensemble L et C est nulle et de deux autres points de fonctionnement stable M et P; N est un point d'équilibre instable.

Les tensions aux bornes de L et C (point P) sont élevées. Le passage de M vers P ne peut être dû qu'à un transitoire qui augmente la tension à une valeur supérieure à E.

Ces surtensions font apparaître un risque de claquage diélectrique (76), ainsi qu'un danger pour les éventuels récepteurs en parallèle sur C. Mais généralement, les puissances mises en jeu sont assez réduites et ne sont susceptibles d'endommager que les matériaux fragiles.

C'est au concepteur de matériaux (78) d'évaluer et de limiter le risque. La ferrorésonance, dépendant de L variable, peut se produire pour une large bande de fréquence.

Une démonstration analogue peut être réalisée dans un cas de ferrorésonance parallèle.

Une charge connectée au circuit joue le rôle de résistance d'amortissement et empêche le maintien des conditions de résonance.

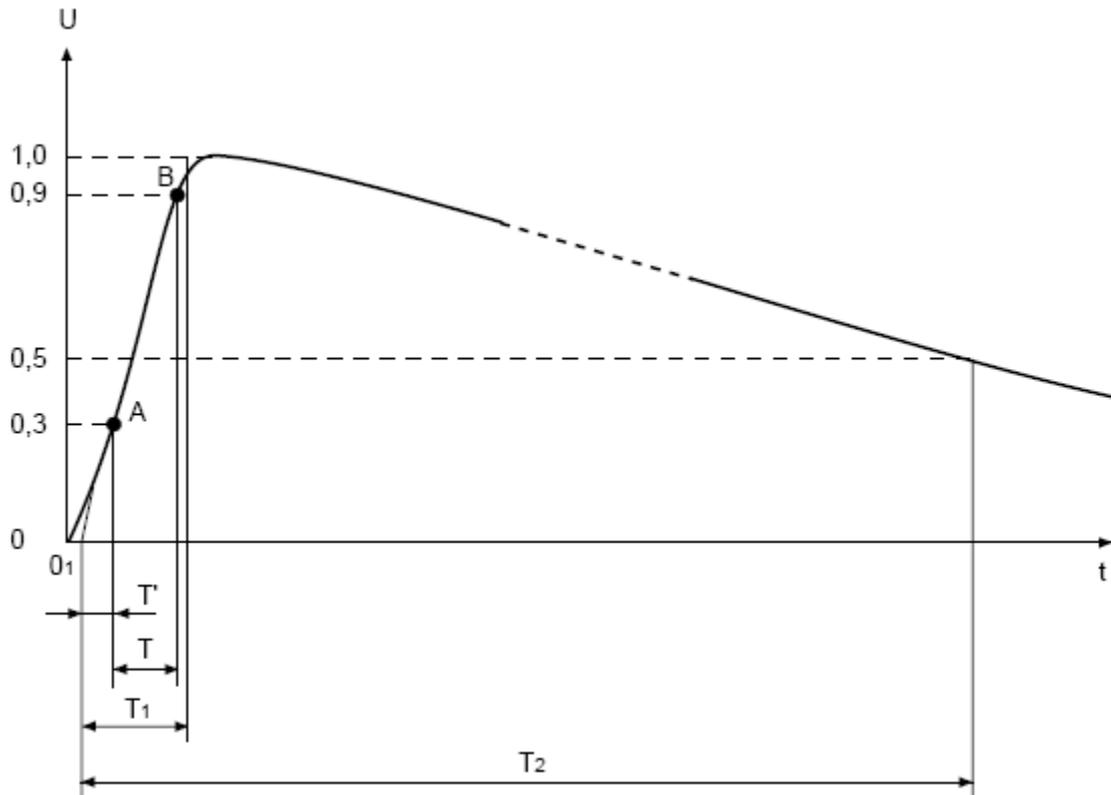
### **II-3. Surtensions internes transitoires de manœuvre :**

Elles dépendent uniquement des caractéristiques propres du réseau. En général, une manœuvre effectuée dans un réseau électrique modifie l'état du réseau en le faisant passer des conditions existantes avant la manœuvre à celles qui existent après l'exécution de celle-ci. Il en résulte des phénomènes transitoires. La tension peut avoir, avant et après la manœuvre des valeurs différentes par suite de la modification de l'état du réseau.

L'amplitude de la surtension de manœuvre se compose de deux parties : une composante transitoire à fréquence élevée et une autre permanente à fréquence industrielle. Ces surtensions apparaissent lors de l'enclenchement ou de réenclenchement d'une ligne, lors de la mise sous tension des batteries de condensateur, ou lors de l'élimination d'un défaut.

Elles se manifestent par des ondes de choc ou des oscillations amorties assimilées conventionnellement à l'onde de choc normalisée de la figure (II.9), dont la montée en tension (front d'onde) durant quelques centaines de microsecondes qui est la plus dangereuse

pour l'isolation. Les valeurs de crête de surtension d'origine interne peuvent atteindre 4 fois la tension nominale.



$$T_1 = 1,67 T$$

$$T' = 0,3 T \quad T_1 = 0,5 T$$

**Figure II-9 : Onde de choc normalisée.**

#### **II-4. Surtensions externes transitoires de foudre :**

##### **II-4-1. Généralités :**

On peut concevoir l'étude de la foudre soit du point de vue du physicien, soit du point de vue de l'ingénieur, dont l'objectif principal est l'établissement de moyen de protections efficaces. On peut considérer la terre comme un gigantesque condensateur sphérique, dont les deux armatures seraient constituées par le globe terrestre lui même et par l'électrosphère.

Entre les deux, troposphère et la stratosphère constituent le diélectrique dont l'épaisseur est de l'ordre de 50Km.

Des mesures montrent qu'il existe, par beau temps, un champ électrique faible permanent, dirigé vers le bas (c - à -d) : haute atmosphérique positive, terre négative) dont l'amplitude est de l'ordre de 100 à 150 V/m, le globe terrestre est donc chargé en permanence.

Sachant que l'air n'est pas un diélectrique parfait, il existe toujours un certain nombre d'ions positifs et négatifs créés par les radiations cosmiques ou par la radioactivité naturelle du sol.

Ces ions sont entraînés par le champ électrique dans un sens tel que les ions négatifs se dirigent vers le haut et les ions vers le bas. Il en résulte de ce mouvement un courant électrique atmosphérique qui a pour effet de décharger le condensateur terrestre.

Malgré le grand nombre de travaux consacrés à la foudre par des chercheurs de nombreux pays depuis plusieurs décennies, ce phénomène reste encore assez mal connu. Les connaissances que l'on a se résument à des données macroscopiques, insaisissable de la foudre, qui frappe ou elle veut et quand elle veut. Parmi les stations utilisant le foudroiement naturel de structures élevés, nous citerons en particulier le laboratoire de Mont San Salvador, au dessus du lac Lugano en Suisse, dont les équipements très complets, ont permis d'atteindre un grand nombre de caractéristiques électriques des courants de foudre telles que : la forme, l'amplitude et la charge écoulées.

Le processus de la formation des décharges se déroule ainsi :

#### **II-4-1-a). Formation des nuages :**

Les nuages orageux sont d'énormes masses occupant une surface de plusieurs dizaines de Km<sup>2</sup>, ayant une épaisseur de plusieurs Km et surplombant à une hauteur moyenne de 2Km. Leur volume peut dépasser 100 Km<sup>3</sup> et leur masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau.

#### **II-4-1-b). Formation des charges électriques :**

On observe une séparation des charges électriques au sein du nuage. Une fois les charges séparées, le transfert des charges peut avoir lieu parce que les porteurs sont de natures différentes : ceux qui portent les charges positives sont assez légers pour être entraînés par le courants ascendants, ceux qui portent les charges négatifs sont assez lourds pour tomber malgré ces courants.

On a constaté que la pulvérisation de l'eau par un courant d'air a pour effet de l'électrifier. Globalement, le nuage orageux constitue un véritable dipôle, et les charges de signes contraires créent entre elles des champs électriques intenses. Lorsque le gradient limite de claquage est atteint, il y a décharge; lorsque celle ci a lieu entre couches intérieures d'un nuage, on parle d'éclair intra - nuages et lorsqu'elle a lieu entre nuage et sol, c'est la foudre.

## II-4-2. Caractéristiques électriques de la foudre :

La première phase d'un coup de foudre est toujours une pré décharge peu lumineuse (ou traceur), qui progresse à travers l'air neutre avec une vitesse relativement faible. Cette pré décharge a son origine, soit le nuage et elle progresse alors en direction du sol, soit au niveau du sol et elle progresse vers le nuage. Dans les deux cas tout se passe comme si le canal ainsi formé, quoique faiblement ionisé, formait entre le sol et le nuage un pont suffisamment conducteur pour préparer la voie à un courant intense qui serait le courant de foudre proprement dit.

On classe donc tout d'abord les coups de foudre selon le sens de développement du traceur (leader) :

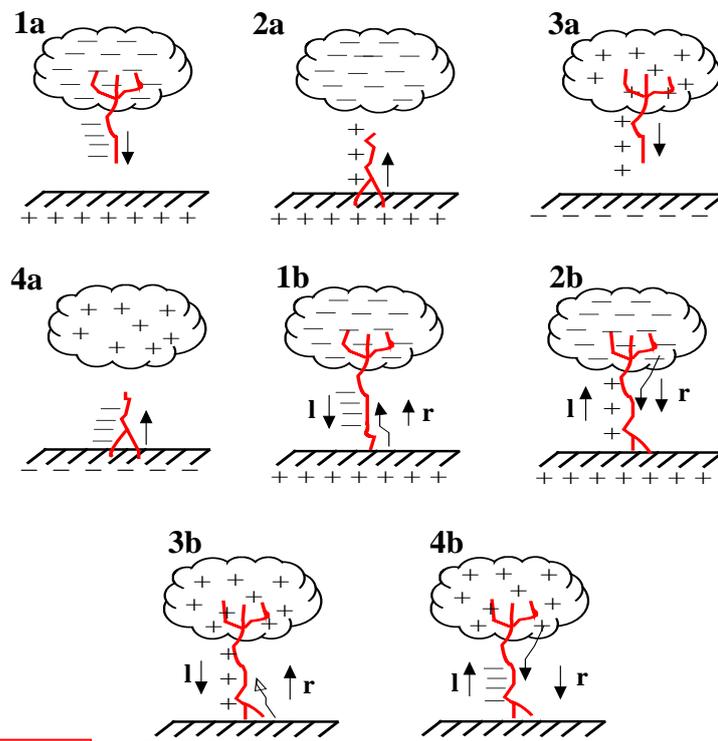
Les coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage).

Les coups de foudre ascendant (développement du traceur à partir du sol).

En second lieu, on classe les coups de foudre selon le sens d'écoulement du courant principal.

Les coups de foudre négatif, lorsque la partie négative d'un nuage se décharge.

Les coups de foudre positifs, lorsque la partie positive du nuage se décharge.



I : traceur ( leader )  
r : arc en retour  
(retour stocke)

Figure II-10 : Classification des coups de foudre selon K.Berger.

### II-4-3. Forme et amplitude des impulsions (décharges partielles) des coups de foudre :

#### II-4-3-a). Forme des décharges négatives :

Les coups de foudre négatifs offrent une très grande variété de courants impulsionnels et de courants persistants, chacun d'entre eux ayant des amplitudes et des durées diverses.

Les fronts des premières impulsions des coups de foudre présentent des formes très irrégulières, et ont des durées totales de zéro à la valeur de crête du courant de l'ordre de 10 à 20  $\mu$ s.

Toute fois la croissance du courant commence toujours lentement de sorte que la partie croissante ne dure que quelques micro - secondes. La durée de la queue est de l'ordre de la centaine de micro - secondes.

Pour les décharges secondaires, la durée de front est très courte, inférieure à la microseconde, mais la queue est bien plus régulière que la première décharge partielle.

#### II-4-3-b). Forme des charges positives :

Le coup de foudre positif est constitué d'une seule décharge durant de 0,1 à 0,2  $\mu$ s. La durée du front de l'onde est relativement longue, elle varie entre 20 et 50  $\mu$ s, mais l'amplitude du courant peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 100 KA la figure II-11 présente la forme d'un courant de foudre négative . Ces courants ont été enregistrés à la station d'étude de la foudre du Mont San Salvador en Suisse.

Pour terminer ce paragraphe relatif aux caractéristiques électriques de la foudre, on a rassemblé dans le tableau suivant les valeurs les plus significatives, polarités négatives et positives réunies.

probabilité de dépassement	crête de courant	charge	pente	$\int i^2 dt$	durée totale	nombre de déchargement
P (%)	I (kA)	Q (C)	S(kA / $\mu$ s)	( kA <sup>2</sup> .s )	T (s)	n
50	26	14	48	0.54	0.09	1.8
10	73	70	74	1.9	0.56	5
1	180	330	97	35	2.7	12

**Tableau II-1 : Principales caractéristiques des coups de foudre.**

La forme des courants de foudre en polarité négative aura l'allure suivante :

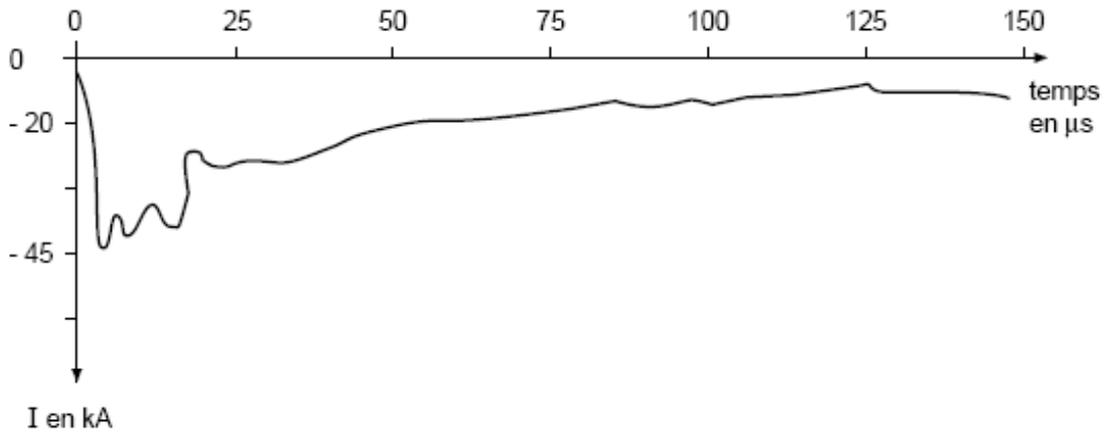


Figure II-11 : Exemple de forme de courant de foudre (selon K.Berger).

**II-4-4. Contraintes appliquées a une ligne touchée par un coup de foudre :**  
**II-4-4-a). Coup de foudre sur conducteur de phase :**

Lorsque le coup de foudre tombe sur les conducteurs de phase d'une ligne, le courant  $i(t)$  se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact et se propage le long des conducteurs. Il entraîne avec lui une onde de tension, dont la valeur en première approximation :

$$U(t) = \frac{Z}{2} i(t) \quad \text{II.16}$$

Avec :  $Z$ - impédance du conducteur touché.

La figure ci dessous illustre ce comportement.

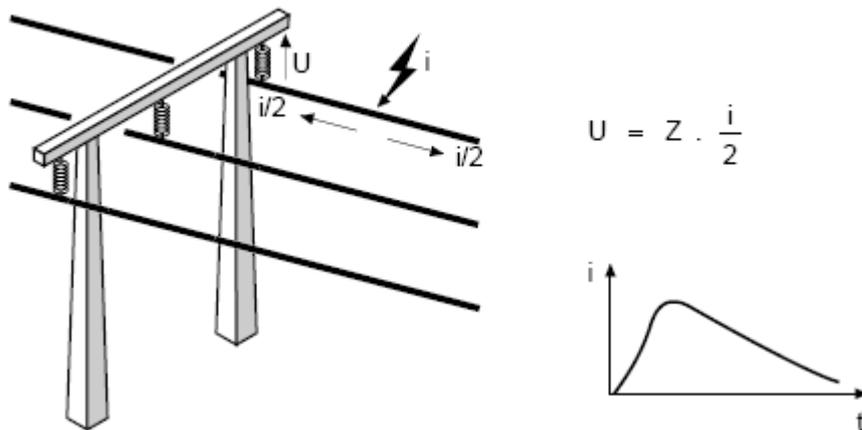


Figure II-12 : Foudroiement d'une ligne : chute sur un conducteur de phase.

En un point donné de la ligne, par exemple au premier pylône rencontré par l'onde, la tension croit jusqu'à ce que se produise l'amorçage de la distance d'isolement de la chaîne d'isolateurs et le courant va atteindre sa valeur maximale.

L'onde de tension qui continue la propagation sera donc :

Soit une onde pleine si :  $i \frac{Z}{2} < U_F$  à la tension d'amorçage au pylône  $U_F$ .

Soit une onde coupée si :  $i \frac{Z}{2} \geq U_F$  à la tension d'amorçage au pylône  $U_F$ .

#### **II-4-4-b). Coup de foudre sur un pylône ou sur un câble de garde :**

L'amorçage de la ligne lors d'un coup de foudre direct sur les conducteurs actifs pouvant être considéré comme certain, on cherche à s'en protéger en plaçant au dessus des ces conducteurs actifs des câbles de garde, reliés électriquement à la terre et qui ont pour fonction de drainer les coups de foudre vers eux.

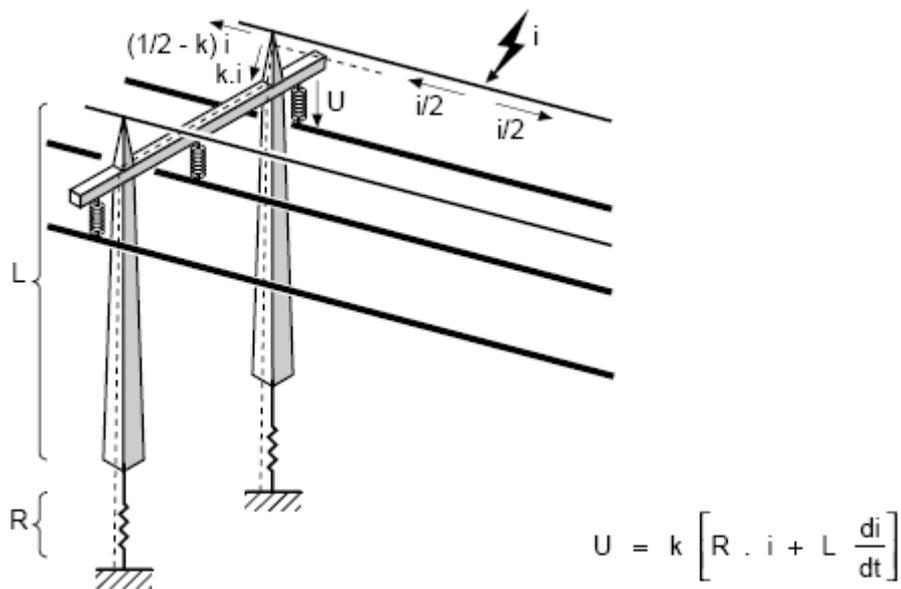
Lorsque la foudre tombe directement sur un support métallique, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation de potentiel des structures métalliques.

La tension apparaissant aux bornes de la chaîne d'isolateurs dépend alors de la résistance  $R$  de la prise de terre, et du couplage électromagnétique entre le circuit emprunté par le courant de foudre et le conducteur de phase considéré. On se contente souvent d'évaluer la montée en exponentiel de la tête de pylône, en exprimant le couplage de façon simple par la self-inductance  $L$  du pylône, de sorte que la contrainte appliquée à la chaîne s'écrira :

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} \quad \text{II.17}$$

Lorsque cette tension atteint la tension de disruption de l'isolement de la ligne il se produit un amorçage dit « en retour ». Si le courant de foudre est de polarité négative, comme c'est le cas le plus fréquent.

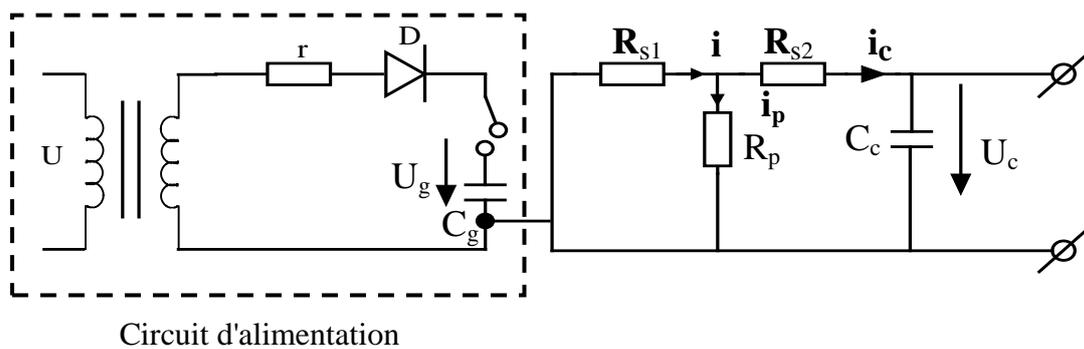
En présence des câbles de garde, que le coup de foudre touche ceux-ci ou le pylône, il s'instaurera entre câbles et pylônes adjacents un régime complexe de propagation- réflexions. On peut cependant prévoir que son effet sera globalement bénéfique, puisqu'il conduit à répartir l'écoulement du courant de foudre sur plusieurs pylônes, et par conséquent réduit les surtensions appliquées aux chaînes d'isolateurs. La figure II.13 illustre bien ce comportement.



**Figure II-13 : Foudroiement d'une ligne : chute sur un câble de garde.**

**II-4-5. Simulation de l'onde de choc de la surtension transitoire de foudre :**  
**II-4-5-a). Caractérisation de l'onde de choc de surtension :**

Le dispositif permettant de simuler l'onde choc est appelé générateur de choc. Le schéma électrique équivalent de ce générateur est présenté sur la figure II.14 :



**Figure II-14 : Schéma équivalent du générateur d'onde de choc.**

L'analyse de ce schéma nous permet d'écrire les lois de Kirchoff suivantes:  
 Sachant que : U est la tension d'alimentation et r la résistance de protection de la diode

U : tension d'alimentation du dispositif  
 r: résistance de protection de la diode

En utilisant les lois de Kirchoff :

$$\begin{cases} i = i_p + i_c \\ R_p i_p + R_{S1} i = -U_g \\ -R_p i_p + R_{S2} i_c = -U_c \end{cases} \quad \text{II.18}$$

Avec,

$$i_g = -C_g \frac{dU_g}{dt} \quad \text{et} \quad i_c = C_c \frac{dU_c}{dt} \quad \text{II.19}$$

En transformant ces équations, on aboutit à une équation différentielle du second ordre de la forme :

$$A\ddot{U}_c + B\dot{U}_c + CU_c = 0 \quad \text{II.20}$$

Cette équation possède comme équation caractéristique :

$$A\alpha^2 + B\alpha + C = 0 \quad \text{II.21}$$

La solution de cette équation nous donnera une équation qui est la somme de deux fonctions exponentielles de la forme :

$$U_c(t) = U_{C01} e^{\alpha_1 t} + U_{C02} e^{\alpha_2 t} \quad \text{II.22}$$

Avec  $U_{C01}$  et  $U_{C02}$  seront déterminées à l'aide des conditions aux limites.

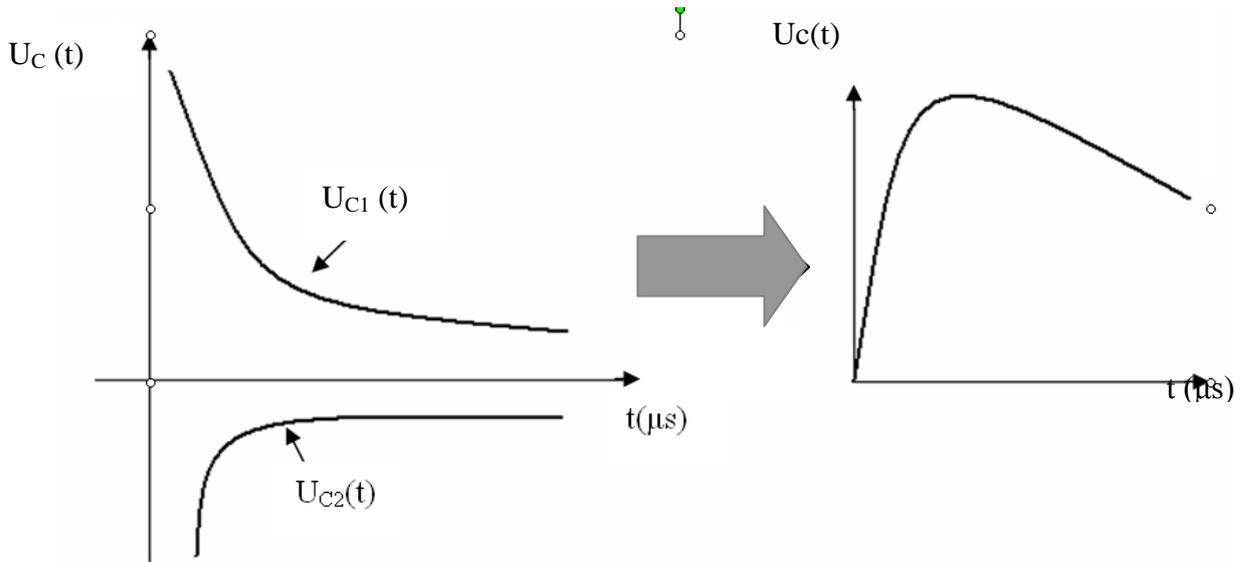
Alors après un choix convenable des valeurs des résistances et des capacités, on peut simuler une onde de choc positive avec différentes amplitudes et temps.

En donnant aux composants de ce schéma équivalent des valeurs de résistance et capacités on a obtenu la forme suivante :

$$U_c(t) = E(t) = 850 \left( e^{-t/67,26} - e^{-t/0,357} \right) \quad \text{II.23}$$

C'est une onde de foudre de 1,2/50  $\mu$ s

$U_C(t)$  est la somme de deux fonctions exponentielles comme est illustré sur la figure suivante :



**Figure II-15 : Allure de  $U_{c1}(t)$ ,  $U_{c2}(t)$  et  $U_c(t)$ .**

## II-5. Conclusion :

L'aspect statistique du comportement aux surtensions en général et aux surtensions transitoires de foudre interdit à prétendre à des solutions absolues. Les différentes surtensions qui peuvent affectés un réseau électrique sont présentés au tableau 2 en annexe.

La connaissance des isolements vise à trouver un juste équilibre entre la fiabilité des matériels et de leur dimensionnement.

Les modélisations retenues présentent toujours un caractère quelque peu arbitraire en première lecture, mais ont été validés par les différentes simulations.

La connaissance des différents types de surtensions internes et externes et le mode de leurs propagations, nous permet de prévoir des recommandations et d'assurer la continuité de services en ajoutant des moyens de protection adéquats.

# CHAPITRE III

### III-1. Généralités :

L'étude des matériaux diélectriques est née du besoin pratique d'isolants, puisque les premières expériences d'électrostatique étaient basées sur l'isolement des charges à l'aide des matériaux diélectriques possédant la propriété de ne pas les laisser s'échapper.

A l'état ordinaire, les charges élémentaires d'une molécule diélectrique se trouvent en mouvement désordonné. Si on place ce diélectrique dans un champ électrique ; ces charges se déplacent sous l'action du champ électrique. A l'intérieur du diélectrique, il existe deux catégories de charges.

\* Les charges libres, sont les électrons ou les ions libres dans la substance. Leur quantité est très faible car le diélectrique est un isolant avant tout.

\* Les charges liées, sont les électrons liés aux noyaux des atomes, et se sont les charges positives et négatives de la molécule polaire.

### III-2. Résistivité diélectrique :

Sous l'action du champ électrique, toutes les charges se mettent en mouvement. Dans un diélectrique ce mouvement est un courant électrique, le mouvement des charges libres bien que leur quantité est, très faible constituent un courant de fuite. Ce dernier a deux chemins possibles : il passe à travers le diélectrique lui-même ou bien il s'écoule par la surface du diélectrique. On aura donc un courant de fuite surfacique et un autre volumique. Chacun d'eux développe une résistance surfacique ( $R_S$ ) et une autre volumique ( $R_V$ ).

Ainsi la résistance d'une unité de surface et celle d'une unité de volume d'un diélectrique sont appelées respectivement résistivité surfacique ( $\rho_S$ ) et résistivité volumique ( $\rho_V$ ).

D'après le schéma de la figure III-1 ; on peut écrire les relations suivantes :

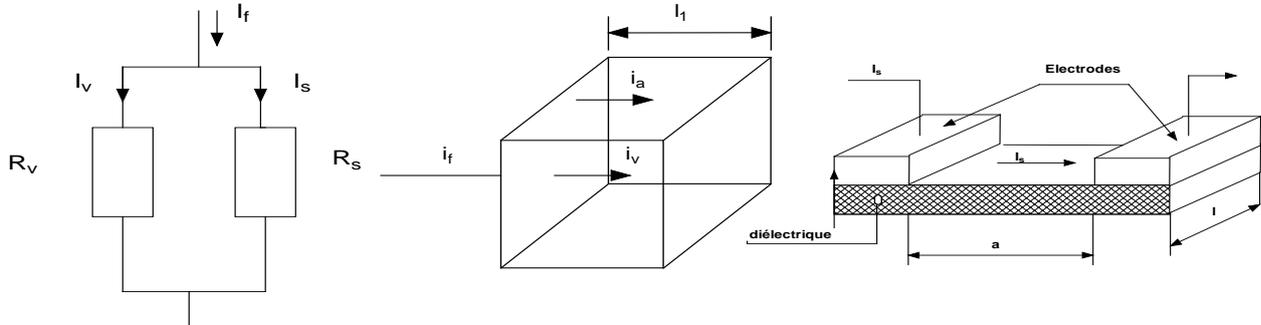
$$I_F = I_V + I_S \quad \text{III.1}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_S} \Rightarrow R_T = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S} \quad \text{III.2}$$

$$\rho_V = R_V \cdot \frac{S}{h} \quad \text{III.3}$$

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{a}{b}$$

III.4



**Figure III-1 : Courant de fuite.**

### III-3. Permittivité :

Considérons un condensateur dans lequel les deux armatures sont séparées par l'air figure III- 2.

Suite à la polarisation, les charges apparaissent sur les extrémités du diélectrique. Il existe des charges de polarisation ( $Q_p$ ) créent un champ de polarisation ( $E_p$ ), et il existe aussi des charges qui dépendent de la géométrie des armatures et de la distances entre-elles désignées par ( $Q_0$ ).

Si la quantité de charges totales se traduit par :  $Q = Q_p + Q_0$  , le rapport  $\frac{Q}{Q_0}$  est une

caractéristique très importante du diélectrique : c'est la permittivité relative

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C \cdot U}{C_0 \cdot U} = \frac{C}{C_0} \quad \text{III.5}$$

Comme :  $C = C_0 + C_p$

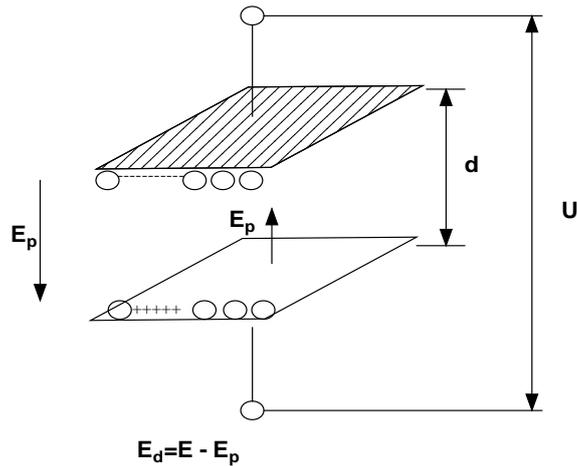
$$\epsilon_r = \frac{C_0 + C_p}{C_0} = 1 + \frac{C_p}{C_0} \quad \text{III.6}$$

$Q_p$  : quantité de charge de polarisation du diélectrique.

$Q_0$  : quantité de charge à vide entre les électrodes.

$C_0$  : capacité du condensateur (l'isolant est l'air).

$C$  : capacité du même condensateur dont l'air est remplacé par un autre isolant



**Figure III-2. Permittivité diélectrique et phénomène de polarisation.**

La permittivité relative est numériquement égale au rapport de la capacité (C) d'un condensateur doté d'un diélectrique à celle d'un condensateur vide ( $C_0$ ) de même dimension (sans diélectrique) (78), (80).

La permittivité relative caractérise le degré de polarisation du diélectrique.

On définit aussi la permittivité absolue  $\epsilon_A$  qui est le produit de la permittivité relative

$\epsilon_r$  par la constante électrique du vide  $\epsilon_0$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \quad (\text{F/m})$$

La permittivité relative peut être un moyen de mesure de la capacité d'un condensateur. Par exemple, pour un condensateur plan :

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (\text{F})$$

#### III-4. Rigidité diélectrique :

C'est la propriété d'un diélectrique de s'opposer à la décharge disruptive.

Si on augmente progressivement la tension entre les deux armatures de condensateur jusqu'à une certaine valeur (tension disruptive); il se produit une décharge entre ces deux armatures avec l'apparition d'une étincelle (arc électrique).

Numériquement, la rigidité diélectrique est le rapport entre le potentiel appliqué et la distance entre les électrodes au moment où la rupture s'effectue :

$$E_d = \frac{U_d}{h} \quad (\text{kV/cm ou kV/mm}) \quad \text{III.7.}$$

La rigidité d'un diélectrique solide diminue quand le degré de l'humidité augmente, elle diminue lentement avec le temps (vieillessement).

### III-5. Les pertes diélectriques :

Elles sont l'énergie qui se dissipe dans un diélectrique en unité de volume sous l'action d'un champ électrique. Ces pertes provoquent l'échauffement du diélectrique et peuvent mener à sa destruction thermique.

Si on applique une tension entre les armatures d'un condensateur à diélectrique parfait, on constate que le courant est déphasé de  $90^\circ$  par rapport à la tension. Si on remplace le diélectrique parfait par un isolant industriel, le courant et la tension seront déphasés d'un angle ( $\varphi$ ) inférieur à  $90^\circ$ . Il en résulte donc des pertes d'énergie qui sont proportionnelles à la tangente de l'angle ( $\delta$ ).

La différence entre  $90^\circ$  et l'angle de déphasage ( $\varphi$ ) entre le courant et la tension est appelée angle de pertes diélectriques

Pour déterminer les pertes, on considère un condensateur avec le diélectrique à étudier qui sera par la suite présenté sous forme d'un schéma équivalent. On peut présenter ce schéma sous deux formes : soit série ou parallèle, figure III-3, qui présente un condensateur idéal (C) connecté à une résistance active (R). Le plus souvent, on détermine la tangente de l'angle ( $\delta$ ) pour caractériser les pertes diélectriques. Pour cela, on utilise les diagrammes vectoriels des schémas équivalents de la figure III-3.

#### III-5-1. Identification des paramètres des schémas équivalents :

On a : 
$$P_A = U \cdot I \cos \varphi \quad \text{III.8}$$

D'après le schéma équivalent série, on peut écrire :

$$P_A = U \frac{U}{Z} \cdot \frac{R_s}{Z} = \frac{U^2 \cdot R_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad \text{III.9}$$

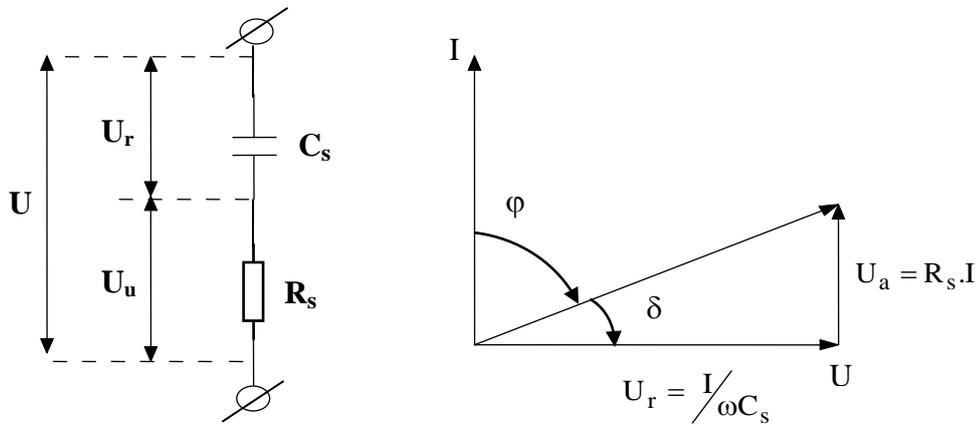
$$P_A = \frac{U^2 \cdot R_s}{X_s^2 \left( \frac{R_s^2}{X_s^2} + 1 \right)} = \frac{U^2 \frac{1}{X_s} \cdot \frac{R_s}{X_s}}{\frac{R_s^2}{X_s^2} + 1} \quad \text{III.10}$$

Sachant que :  $\text{tg } \delta = \frac{R_s}{X_s}$  et  $X_s = \frac{1}{C_s \omega}$

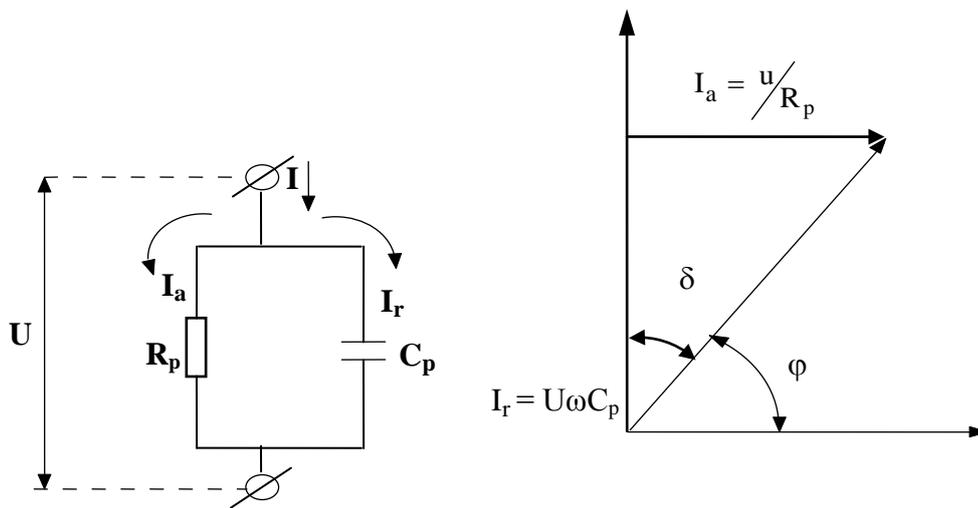
On a :

$$P_A = \frac{U^2 \cdot \omega \cdot C_s \cdot \text{tg} \delta}{\text{tg}^2 \delta + 1}$$

III.11



**Circuit équivalent série**



**Circuit équivalent parallèle**

**Figure III-3 :.Schéma équivalent représentant un diélectrique.**

D'après le schéma équivalent parallèle : On peut écrire :

$$I = U \cdot y \quad \text{et} \quad \cos \varphi = \frac{g}{y} \quad \text{III.12}$$

Donc l'équation III.8 devient :

$$P_A = U \cdot U \cdot y \cdot \frac{g}{y} = U^2 \cdot g \quad \text{III.13}$$

$$P_A = U^2 \cdot \frac{g}{b} \cdot b \quad \text{III.14}$$

Sachant que :  $\text{tg } \delta = \frac{g}{b}$  et  $b = \omega \cdot C_p$  ; donc III.14 devient :

$$P_A = U^2 \omega \cdot C_p \cdot \text{tg } \delta \quad \text{III.15}$$

$$\text{tg } \delta = \frac{g}{b} = \frac{\frac{1}{R}}{\omega \cdot C_p} = \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C_p} \quad \text{III.16}$$

En égalisant les équations [III.11] et [III.15], on déduit :

$$C_p = \frac{C_s}{\text{tg}^2 \delta + 1} \quad \text{III.17}$$

Pour un diélectrique parfait :  $\text{tg } \delta \approx 0 \Rightarrow \text{tg}^2 \delta \approx 0 \Rightarrow C_p = C_s$ .

Pour les diélectriques de bonne qualité, les pertes étant très faibles, d'où  $(\text{tg}^2 \delta)$  est négligeable par rapport à l'unité. C'est pourquoi les capacités  $(C_p)$  et  $(C_s)$  sont équivalentes à la capacité  $(C)$  d'un diélectrique parfait :  $C_p = C_s = C$ .

On présente souvent par une formule empirique les pertes spécifiques sous la forme suivante :

$$P = \frac{\varepsilon \cdot f \cdot \text{tg } \delta}{1,8 \cdot 10^{12}} E^2 \text{ W/cm}^2 \quad \text{III.18}$$

$\varepsilon$  = Permittivité relative du diélectrique.

$f$  : Fréquence du champ

$\text{tg } \delta$  : Angle de perte

$E$  : Intensité du champ.

### III-6. Claquage diélectrique :

La rigidité diélectrique est l'une des caractéristiques principales des matériaux isolants. L'intensité du champ électrique sous laquelle un diélectrique peut fonctionner ne doit pas dépasser un certain seuil bien déterminé. Dans le cas contraire, le diélectrique sera perforé par une étincelle et perd ainsi ses propriétés isolantes, car sa résistance diminue fortement et les pièces conductrices précédemment séparées par l'isolant deviennent court-circuitées : c'est le claquage diélectrique.

On distingue trois types de claquage :

- Claquage électrique.
- Claquage électrochimique
- Claquage thermique

Chaque type de claquage peut avoir lieu pour un même diélectrique.

### **III-6-1. Claquage électrique.**

IL est caractérisé par le développement rapide d'un processus électrique suite à l'ionisation par choc, où les électrons forment des avalanches et par conséquent des canaux de décharge. Ce genre de claquage est caractérisé par son développement rapide  $t = 0$  à 10 secondes.

### **III-6-2. Claquage électrochimique**

Il apparaît souvent lors du fonctionnement du diélectrique dans des conditions ambiantes sévères; à savoir des températures élevées et à des taux d'humidité élevés de l'air ambiant. Dans ce cas, c'est un processus électrolytique qui provoque la diminution progressive de la résistance d'isolation .On appelle souvent ce phénomène vieillissement du diélectrique. Il réduit par conséquent la rigidité diélectrique et termine par un claquage à une tension inférieure à celle du claquage électrique. Ce phénomène touche généralement les diélectriques organiques. Il exige un temps plus au moins long pour son développement.

### **III-6-3. Claquage thermique.**

Ce genre de claquage est provoqué par l'échauffement du diélectrique dans un champ électrique jusqu'à une température qui correspond à la destruction de l'isolant. Ce phénomène à lieu si la quantité de l'énergie dégagée dans un diélectrique dépasse celle dissipée dans le milieu ambiant (mauvaise ventilation). Dans ces conditions, la température augmente et atteint les valeurs critiques. La quantité d'énergie dégagée s'écrit :

$$Q_{\text{dég}} = C.\omega.U^2.tg \delta$$

III.19

La quantité d'énergie dissipée :

$$Q_{\text{dis}} = \sigma \cdot S (t_1 - t_2)$$

III.20

U : tension entre les électrodes.

$\omega$  : fréquence angulaire de la tension. C : capacité de l'isolant.

C : capacité de l'isolant.

$\sigma$  : coefficient de transmission de chaleur .

$\text{tg}\delta$  : facteur de dissipation d'énergie.

S : surface du diélectrique.

$t_1$  : température de la surface du diélectrique :

$t_0$  : température du milieu ambiant.

Ces différentes contraintes se répercutent par un dégagement de chaleur qui aura une influence sur la longévité.

# CHAPITRE IV

#### **IV-1. Définition :**

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. C'est l'importance du champ électrique à proximité de ce conducteur qui est à l'origine de l'ionisation du gaz, en particulier au voisinage des régions de forte courbure (effet de pointe). Une des conséquences les plus importantes est l'apparition d'un courant de fuite, vu comme tel par le conducteur.

Les premières expériences sur l'effet couronne, étaient faites à l'aide de fils minces, de quelques millimètres, lorsqu'un tel fil est porté à une tension suffisante, il se forme autour de lui une gaine lumineuse de couleur bleue violette, dont l'épaisseur augmente avec la tension, c'est la présence de cette lueur uniforme, autour du conducteur qui a donné naissance à l'expression, maintenant universellement employée «d'effet couronne» ou «corona». Mais lorsque le diamètre du fil croit, pour atteindre les dimensions des câbles utilisés sur les lignes de transport d'énergie, l'effet couronne perd cet aspect de gaine lumineuse uniforme, il se discrétise en lueurs localisées sous le nom général d'aigrettes. Cette discrétisation de l'effet couronne est observée sur des cylindres parfaitement polis, et est encore grandement favorisée, dans le cas des conducteurs industriels, par les irrégularités de surface telles que le tramage, les éraflures, les dépôts de poussières végétales, de pollution industrielle, voire de petits insectes; toutes ces aspérités de nature diverses créent un renforcement local de champ électrique, et ont pour conséquence une réduction du niveau de tension, d'apparition des aigrettes. On voit donc apparaître, dès maintenant, l'influence notable de l'état de surface qui sera introduit dans les calculs par la définition d'un coefficient «d'état de surface».

#### **IV-2. Présentation et origines des pertes par effet couronne :**

Il existe un nombre de modes d'émission de courants dus à l'ionisation des gaz, pouvant prendre l'aspect d'émission continue ou d'émission impulsionnelle, et constituant autant de variétés d'aigrettes (voire fig.IV.4) quelque soit le mode d'émission, le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes en électrons et en ions positifs. Les charges de signes opposées à celles du conducteur sont immédiatement attirées vers celui-ci et neutralisées, alors que les charges de même signe sont entraînées vers l'extérieur par le champ électrique. Comme les électrons ne restent jamais libres et s'attachent très rapidement à des atomes neutres pour former des ions négatifs, tout se passe comme si le conducteur émettait, sous l'effet du phénomène de l'ionisation, des ions lourds de même polarité que lui. La migration de ces ions dans le champ électrique selon une loi de mouvement visqueux, et on

peut dire que la cause physique des pertes couronne est précisément l'énergie perdue mécaniquement par frottement des ions contre les molécules neutres de l'air. Le mouvement des ions appelle dans les conducteurs, par induction électrostatique, un courant qui comporte une composante fondamentale en phase avec la tension; on voit que, par cet intermédiaire, s'effectue un transfert d'énergie mécanique en énergie électrique et par conséquent le prélèvement, sous forme électrique de l'énergie dissipée.

Tant que le nombre de points générateurs d'ions est faible, le champ principal dû aux charges portées par le conducteur n'est pratiquement pas perturbé; on dit qu'on est en régime de «pertes localisées», le calcul du mouvement individuel et de la perte d'énergie des charges d'espace est alors aisé; mais, par contre, la quantité des charges émises est extrêmement fluctuante et dépend considérablement de l'état de surface du conducteur.

Lorsque la tension appliquée s'accroît ou lorsque pluie, le brouillard ou neige multiplient les aspérités du conducteur en déposant sur sa surface des gouttes d'eau, le nombre d'aigrettes augmente considérablement. La charge d'espace créée devient suffisamment dense pour réagir de façon sensible sur les charges portées par le conducteur. Il se produit alors une sorte de phénomène de régulation, par lequel le champ électrique superficiel ne peut pas dépasser une certaine valeur critique, légèrement supérieure au seuil d'ionisation. En effet toute tendance au dépassement a immédiatement pour conséquence la génération de nouveaux ions tendent à leur tour à limiter la croissance du champ.

Dans ce type de fonctionnement, la quantité des charges d'espace émises ne dépend plus des caractéristiques propres des sources d'ions, mais est directement liée au phénomène d'interaction mentionné. Une description quantitative des mécanismes en jeu, et par conséquent un calcul des pertes devient alors possible. Le régime de formation intense des charges d'espace est appelé «régime des pertes généralisées»

### **IV-3. Perturbations radio-électriques :**

En ce qui concerne les perturbations radioélectriques, le phénomène fondamental est le mode d'émission impulsionnelle, au cours de laquelle les charges libres, ions et électrons sont brusquement formés puis violemment entraînés par le champ électrique intense au voisinage immédiat du conducteur. La formation et le déplacement de ces charges dans l'espace voisin du conducteur provoquent une modification des potentiels électriques, d'où résulte l'émission d'une onde électromagnétique: ce rayonnement direct de type sphérique, s'atténue en  $1/r^2$  et il a été reconnu que sa contribution au champ perturbateur total mesuré en un point voisin de la ligne était faible.

Le déplacement des charges provoque également un appel de courant dans le conducteur, se répartissent par moitié de part et d'autre de l'aigrette. Le point de production de celle-ci peut donc être considéré comme origine de deux impulsions de courant symétriques, se propageant en sens inverse le long du conducteur. Ces impulsions, donc le front à une durée d'une fraction de micro-secondes, sont représentables par leur spectre de Fourier.

Dans le cas des lignes aériennes, le phénomène d'ionisation de l'air a lieu au voisinage immédiat du conducteur, le paramètre caractéristique le plus évident auquel on a coutume de rattacher l'intensité de l'effet couronne est le champ électrique à la surface du conducteur, ou gradient superficiel.

Le champ superficiel d'un conducteur se calcule de la façon la plus générale, par le théorème de Gauss.

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad \text{IV.1}$$

E : champ superficiel en V/cm

q : charge superficiel par unité de longueur en C/m.

r : rayon du conducteur lisse équivalent, en cm.

$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}$  : Permittivité du vide (ou de l'air).

En appliquant le théorème de Gauss à une distance  $\rho$  du conducteur :

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r}$$

On en déduit :

$$V = \int_r^R E dR = q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{R}{r} \quad \text{IV.2}$$

Ainsi sa capacité C par rapport au cylindre :

$$C = \frac{q}{V} \Rightarrow C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{R}{r}} \quad \text{IV.3}$$

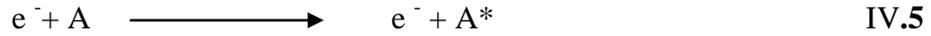
$$E = \frac{V}{\rho \ln \frac{R}{r}} \quad \text{IV.4}$$

**IV-4. Phénomènes d'ionisation dans les gaz :**

Les phénomènes qui ont pour siège les milieux gazeux sont représentés par des mécanismes de collisions entre les particules des gaz.

**IV-4-1. Excitation atomique :**

Un atome neutre peut être excité soit par collision avec un électron, soit absorption d'un photon :



$e^-$  : électron.  
 $A$  : atome  
 $A^*$  : atome excitée
 } par collision



$h\nu$  : photon  
 $A$  : atome  
 $A^*$  : atome excitée
 } par absorption d'un photon

L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  a pour expression :  $h\nu$

Où :  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  U.S.I ;  $h$  : constante de Plank

**IV-4-2. Ionisation par collision électronique :**

L'ionisation d'un gaz par les électrons libres accélérés dans le champ électrique est le processus essentiel de la formation d'ions positifs.

L'ionisation d'un atome par un choc électronique n'est possible que si l'énergie cinétique de l'électron incident est au moins égale à l'énergie d'ionisation de l'atome considérée.

**IV-4-3. Photo-ionisation :**

Pour qu'un processus d'ionisation puisse se produire lors de l'absorption d'un photon par une particule gazeuse, il faut que l'énergie d'un photon incident soit au moins égale à l'énergie de la particule considérée.

#### IV-4-4. Détachement :

C'est un phénomène qui se produit quand un ion négatif perd son électron supplémentaire, l'énergie nécessaire pour provoquer le détachement est relativement faible.

#### IV-4-5. La recombinaison :

C'est réaction inverse à celles présentées précédemment. On appelle ainsi les réactions par lesquelles deux particules possèdent des charges de signe différent échangeant ces charges pour revenir à l'état neutre, ces réactions libèrent une certaine énergie, soit sous forme de photon, soit sous forme d'énergie cinétique cédée à une molécule de gaz voisine. Dans l'effet couronne ces réactions se produisent dans les régions de champ électrique faible.

- recombinaison entre ions
- recombinaison entre ion + électron.

#### IV-4-6. Attachement :

C'est aussi un phénomène inverse de l'ionisation et c'est l'attachement d'un électron sur un atome ou une molécule neutre qui conduit à la formation d'un ion négatif.

#### IV-4-7. Mouvement dans le champ électrique :

Ce dernier phénomène, intervient dans l'étude des pertes par effet couronne .les particules chargées subissent normalement un mouvement désordonné d'agitation thermique en présence d'un champ électrique, ces particules sont soumises de plus en plus à une force unidirectionnelle de valeur  $q \cdot \vec{E}$  qui leur communique une accélération dans la direction du champ ; mais sous l'effet de cet ensemble de forces, les particules acquièrent en définitive une composante de vitesse moyenne  $\vec{v}$ , proportionnelle à l'intensité du champ électrique et inversement proportionnelle à la fréquence des collisions.

Le mouvement des ions est régi par la loi simple :

$$\vec{v} = \mu \vec{E} \quad \text{IV.7}$$

Le coefficient  $\mu$  : appelé mobilité ionique, a pour valeur dans l'air à pression et températures normales:

$$\mu^+ = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s par V/m.}$$

$$\mu^- = 1,80 \cdot 10^{-4} \text{ m/s par V/m.}$$

Ainsi l'ion consomme immédiatement, en frottement dans l'air, l'énergie qu'il acquiert dans le champ.

#### **IV-5. Les décharges électriques dans les gaz :**

Si on applique une différence de potentiel  $V$  au gaz contenu entre électrodes. L'existence d'une particule chargée va entraîner la réaction d'un courant de très faible intensité qui va augmenter avec la tension. Le passage de ce courant dans le gaz est souvent accompagné de phénomènes lumineux dus au déplacement de charges électriques (comme dans le cas des éclairs atmosphériques). C'est le gaz qui s'est ionisé et le développement de décharge qui s'y produit.

Au laboratoire, ces phénomènes peuvent être obtenus en appliquant une différence de potentiel  $U$  continue à un tube à décharge à travers une résistance  $R$ . En faisant varier  $R$  et  $U$  on obtient la caractéristique " courant - tension " de la décharge  $U = f(I)$ . Cette expérience donne une explication des mécanismes fondamentaux qui assurent la propagation de la décharge dans un gaz.

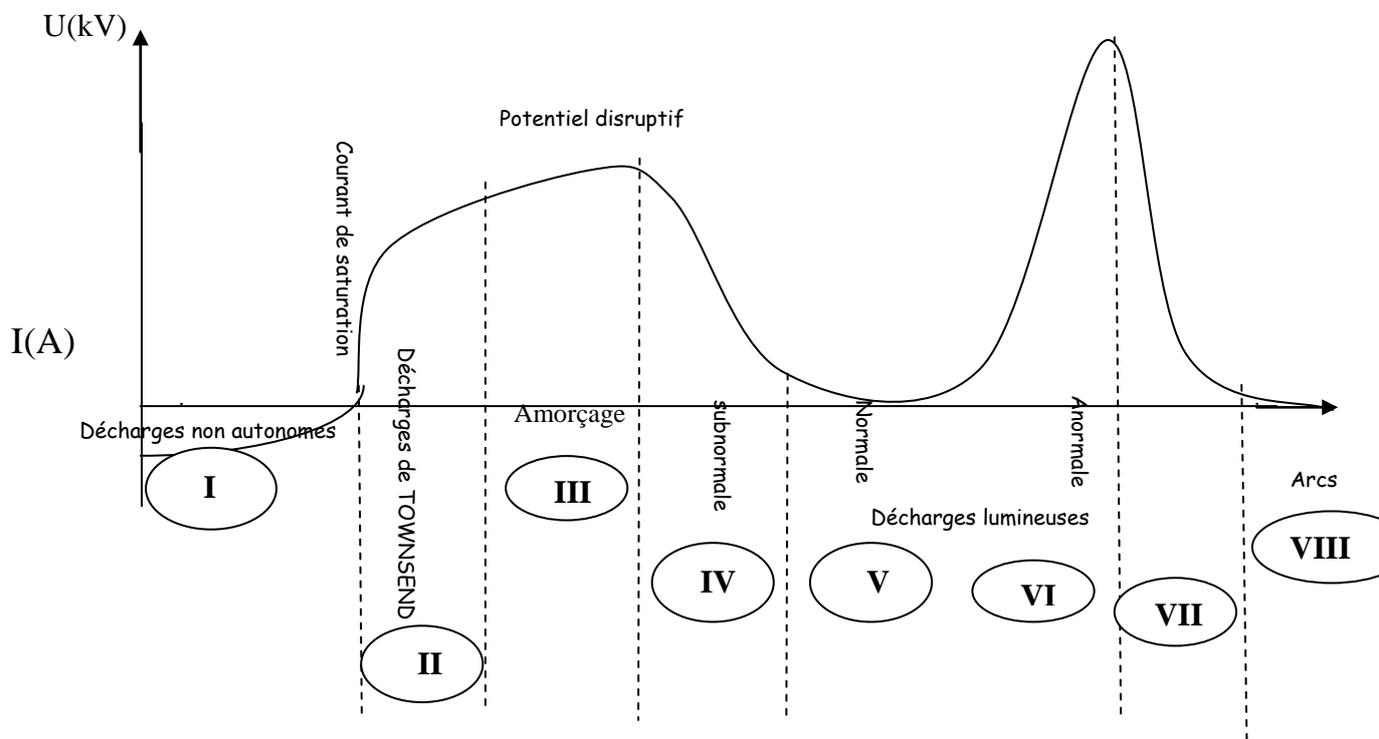
##### **IV-5-1. Caractéristique courant - tension des décharges dans les gaz :**

La figure IV-1 suivante représente une caractéristique courant - tension des décharges à basses pressions, entre deux électrodes isolées par un gaz quelconque. Cette caractéristique donne les ordres de grandeur des courants et des tensions qui interviennent dans les différentes formes de décharge.

- Zone (I)

Dans la première zone, le courant est proportionnel à l'intensité du champ électrique, ce qui vérifie la loi d'Ohm dans cette partie. Ceci est dû à l'équilibre entre les deux phénomènes : L'ionisation et la recombinaison des particules.

La tension croissante atteint une valeur au laquelle il y'a plus d'équilibre entre ionisation et recombinaison, c'est à dire que la recombinaison s'absente et tous les ions se dirigent vers les électrodes, cet état de gaz s'appelle : état de saturation. Pour cette raison le courant ne dépend pas de la tension et dans ce cas, le courant s'appelle «le courant de saturation» : cette zone est non - autonome.



**Figure IV-1 : Caractéristique courant tension de décharge dans les gaz.**

- Zone (II)

Décharge de Townsend, avec " $U_i < U < U_0$ ", tel que :

$U_i$  : Tension nécessaire pour communiquer à un électron libre l'énergie minimale lui permettant d'ioniser par choc une molécule ou un atome non excité.

$U_0$  : Tension nécessaire pour produire les premières décharges visibles entre deux électrodes quelconques dans l'obscurité totale.

A partir de la tension  $U_i$  ; l'énergie des ions augmente et il se produit une autre forme de décharge dite «décharge obscure». Cette dernière est due au choc d'ionisation des électrons libres avec les molécules neutres du gaz, par conséquent le courant s'accroît.

- Zone (III)

La décharge d'espace devient prédominante et permet une ionisation par choc beaucoup plus efficace, ce qui diminue la tension appliquée, tandis que le courant devient interne et par conséquent la décharge devient visible. Cette dernière n'est que " la décharge couronne".

- Zone (IV, V, VI, VII et VIII )

La décharge devient luminescente et elle est caractérisée par une déformation du champ par la charge électrique d'espace.

Pour une tension de plus en plus élevée, les faisceaux apparaissent entre les électrodes et finissent par les rejoindre et on a alors une décharge complète d'une électrode à l'autre.

Cette décharge peut être soit sous forme des lignes brisées et de courtes durées d'ou l'appellera «Etincelle», soit sous forme d'arc et dans ce cas elle est caractérisée par la cathode, ceci est dû soit à une haute température, soit à l'effet d'un champ intense qui existe près d'elle.

#### **IV-5-2. Décharge couronne :**

La décharge couronne est une décharge entretenue dans un gaz de grande densité soumis à un champ électrique non uniforme entre deux électrodes sous tension.

Dans le cas d'un conducteur électrique, la décharge couronne à lieu au voisinage de ce dernier et dépend essentiellement de son état de surface et de son diamètre. Dans le cas général, la décharge couronne se localise au voisinage de l'électrode de faible rayon de courbure et occupe un espace dit «zone d'ionisation ou enveloppe de couronne», lors de l'application d'une tension suffisante aux électrodes.

Dans cette zone d'ionisation, il se crée des charges électriques qui se déplacent sous l'action des forces du champ électrique en créant le courant de couronne.

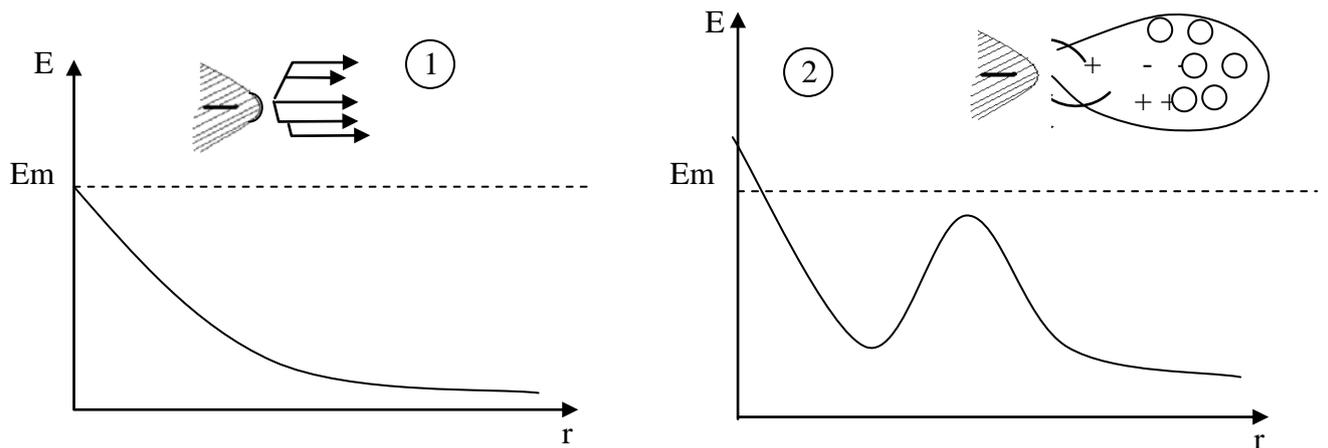
Les particules qui ont le même signe que l'électrode en couronne sautent de la zone d'ionisation à une zone antérieure. Cette dernière est sombre car il n'y a pas de processus d'ionisation. L'enveloppe de couronne dépend de la polarité et du genre de la tension appliquée à l'électrode en couronne, de la forme géométrique de l'électrode et de l'état de sa surface.

La décharge couronne peut se faire au niveau de la cathode ou de l'anode, c'est pourquoi on a deux genres de décharges : décharge positive et décharge négative.

#### **IV-5-3. Décharges négatives «Avalanche de Townsend» :**

L'avalanche de Townsend prend naissance dans une zone du champ intense, et se développe en direction opposée à celui –ci, selon le mécanisme suivant:

Un électron libre, dans le gaz, est accéléré par le champ, rencontre un atome neutre, est réaccélééré pour subir une nouvelle collision et ainsi de suite. Si le champ est suffisamment intense, certaines de ces collisions peuvent être ionisantes, c'est à dire que sous l'effet du choc, il se forme une paire électron - ion positif. Ce deuxième électron entraîné comme le premier par le champ électrique, peut lui aussi créer d'autres électrons secondaires, et le processus prend une allure d'avalanche (figIV.2).



**Figure IV-2. Processus de création de l'avalanche :**

**1) Avalanche électronique.**

**2) Auto-entretien par bombardement ionique de la cathode.**

D'après Townsend, l'accroissement d'électrons le long d'un parcours élémentaire "dl" de l'avalanche, peut être exprimé comme suit :

$$dN = N\alpha dl \quad \text{IV-8}$$

Où  $\alpha$  est le coefficient multiplicateur ou «premier coefficient de Townsend», qui dépend de la nature du gaz, du champ local E et de la pression p du gaz. En raison de lois de similitude simples,  $\alpha$  peut s'exprimer par une loi indépendante de la pression de la forme :

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad \text{IV-9}$$

Nous poserons par la suite :

$$\frac{\alpha}{p} = \alpha' \quad \text{et} \quad \frac{E}{p} = E'$$

Pour déterminer le nombre total  $N$  d'électrons contenus dans une avalanche issue d'un seul électron et après un parcours  $l$ , il faut résoudre l'équation différentielle :

$$\frac{dN}{N} = \alpha'(E')dl \quad \text{IV-10}$$

En général, le champ  $E$  varie au long du trajet de l'avalanche, ce qui est notamment le cas au voisinage d'une électrode pointue ou d'un conducteur cylindrique et la solution ne peut être donnée quantitativement que lorsqu'on Townsend les lois  $\alpha'(E')$  et  $E'(l)$ . La forme générale de la solution est immédiate :

$$N = \exp \int_0^l \alpha'(E')dl \quad \text{IV-11}$$

L'intégrale étant prise le long d'une ligne de force du champ. Lorsque le champ est fortement divergent (polarité négative de l'électrode). La multiplication des électrons s'arrête au bout d'un certain parcours  $l_1$ ; les électrons n'étant plus suffisamment énergétique pour créer de nouvelles paires, s'attachent à des atomes neutres et les ions lourds ainsi formés dérivent lentement vers l'anode.

Afin de mieux décrire la multiplication électronique dans les zones à faible champ, ou l'attachement ne peut plus être négligé, on est amené à écrire :

$$N = \exp \int_0^l (\alpha' - \eta')dl \quad \text{IV-12}$$

Où  $\eta' = \eta/p$  est le coefficient d'attachement réduit.

La multiplication électronique s'arrête donc quand l'attachement équilibre la formation de nouveaux électrons. C'est à dire lorsque  $\alpha' - \eta' = 0$ , ceci a lieu dans l'air pour un champ réduit  $E' = 34V/cm/mm\ Hg$ . Dans les conditions atmosphériques normales, le champ électrique vaut environ 26 KV/cm.

Pour qu'une véritable décharge puisse se produire, il faut qu'une succession d'avalanche doive avoir lieu, c'est à dire que de nouveaux électrons germes puissent rapidement apparaître. Il existe de nombreux processus pouvant conduire à la création de ces nouveaux germes. Citons les plus importants :

\* **Au sein du gaz** : au lieu d'être ionisés par collision avec un électron, les atomes peuvent être excités, puis se désexciter en émettant un photon : le photon peut à son tour ioniser un autre atome par photo - ionisation.

\***Au niveau de la cathode** : les ions positifs formés au cours des collisions ionisantes bombardent la cathode et peuvent en extraire des électrons.

C'est ce dernier processus qui a retenu l'attention de Townsend (Fig IV-2). Il introduit un deuxième coefficient  $\gamma$ , qui exprime la probabilité qu'a un ion de créer un électron. Comme l'avalanche de N électrons formée par le processus décrit plus haut a engendré (N-1) ions, le nombre probable de nouveaux électrons germes formés par une avalanche sera :  $\gamma(N-1)$ .

La condition d'auto entretien des avalanches s'écrira donc simplement :

$$\gamma(N-1) \geq 1 \quad \text{IV-13}$$

En remplaçant N par la valeur trouvée précédemment, on obtient

$$\int_0^{l_0} (\alpha' - \eta') dl \geq \ln(1 + 1/\gamma) \quad \text{IV-14}$$

Cette relation est dite «critère de Townsend».

**Remarque** : l'avalanche électronique étant quasi-instantanée, il y a formation extrêmement rapide d'une charge d'espace positive (48) devant la cathode. Puis ces ions, dont l'inertie est beaucoup plus grande que celle des électrons, sont entraînés vers la cathode relativement lentement, où ils sont neutralisés. On conçoit que ce processus donne lieu à une impulsion électrique de front de montée très raide, puis de durée relativement longue : l'impulsion de Trichel.

#### **IV-5-4. Décharges positives «Front de photo - ionisation» :**

Les décharges positives, ou streamers, trouvent leur origine dans la région de champ intense au niveau de l'anode. Elles ont lieu, dans le cas qui nous intéresse, lorsqu'une pointe ou un conducteur cylindrique sont portés à une polarité positive. Les connaissances théoriques actuelles de ces phénomènes de décharges positives sont encore insuffisantes pour pouvoir proposer une interprétation quantitative. Elles restent du domaine de la description. On explique le mécanisme des streamers comme suit (Fig-IV-3-1, Fig-IV-3-2, Fig IV-3-3).

Il sont déclenchés par une avalanche électrique dont l'origine est un électron providentiel parti d'une zone intermédiaire où le champ est encore assez fort pour qu'il n'y ait pas formation

par attachement d'un ion  $O_2^-$  et suffisamment loin pour que l'avalanche soit assez importante en atteignant la surface.

Nous avons vu qu'en air atmosphérique, ce champ était de l'ordre de 26 kV/cm.

Les trois étapes principales du développement d'un streamer sont détaillées sur les figures suivantes :

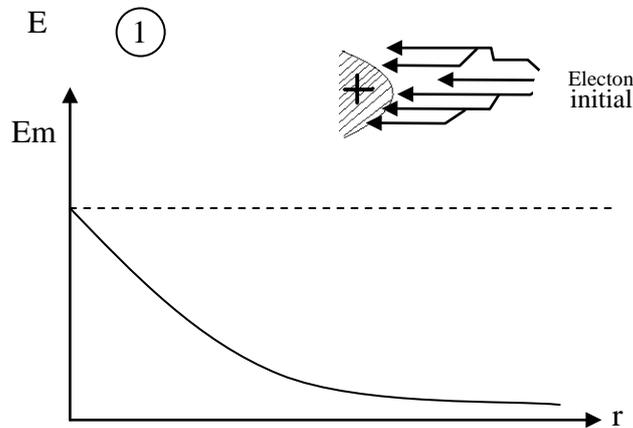


Figure IV-3-1 : Avalanche de Townsend en direction de l'anode.

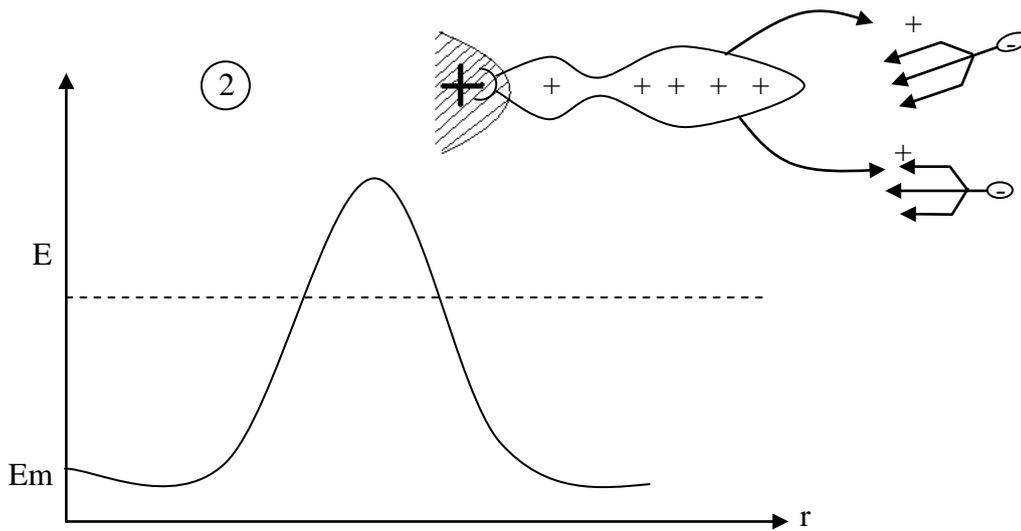


Figure IV-3-2 : Front de photo - ionisation en avant de la masse d'ions positifs.

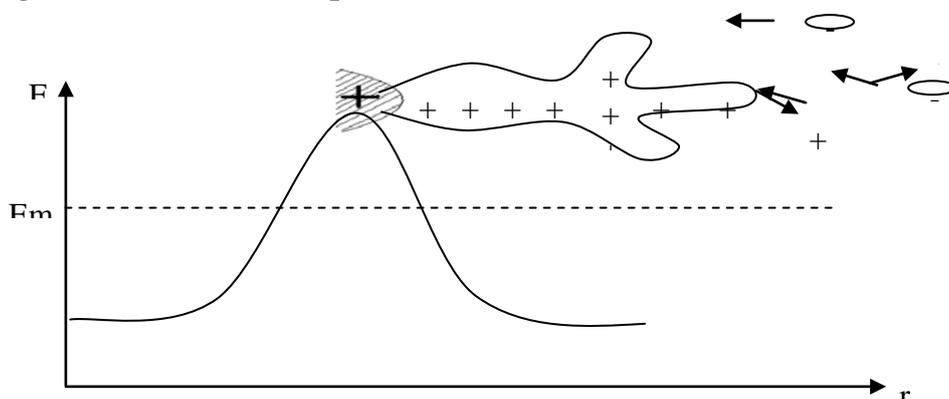


Figure IV-3-3.: Progression et ramification du streamer.

Le premier stade correspond donc à une avalanche dont la direction de l'anode. Du fait de leur inertie, les ions positifs qui restent en arrière ne migrent que beaucoup plus lentement. La pointe des ions ainsi amassés devant l'anode crée un fort champ dans son voisinage :

La taille critique de l'avalanche qui permet la progression du streamer est de l'ordre de  $10^8$  électrons. Il se crée alors de nouvelles avalanches à partir d'électrons libres, mais surtout à partir de paires d'électrons ions créées par photo ionisation dans la zone de fort champ. Ces avalanches secondaires créent à leur tour une charge d'espace positive en avant de la première pointe, on assiste donc à une progression d'une véritable onde de choc d'ionisation créée essentiellement par un front de photo ionisation.

Le front du streamer est formé d'une intense charge d'espace positive; le corps est un canal de plasma parcouru par un courant électronique intense.

Les effets de la répulsion électrostatique et de la dispersion de l'émission photo-ionique conduisent ensuite à un éclatement de la tête du streamer, qui se manifeste par une ramification de la décharge.

Quand les diverses ramifications du streamer atteignent une zone de champ faible, leur progression s'arrête. Les électrons du plasma soit ils se recombinent, soit ils se lient pour donner des ions lourds négatifs. Les deux charges migrent dans le champ. Lorsque le nuage positif s'est suffisamment éloigné de l'anode. Il réapparaît devant celle-ci un champ suffisant pour qu'un nouveau streamer puisse se développer.

#### **IV-6. Différents types d'émission des charges en effet couronne :**

La plupart des études systématiques concernant l'émission des charges sont faites dans des géométries d'électrodes dissymétriques, par exemple dans un ensemble pointe plan d'ionisation de l'air est limitée au voisinage de l'électrode à petit rayon de courbure.

Pratiquement à une certaine distance de la pointe. Seule intervient la conductivité de l'air par migration visqueuse des ions. Les phénomènes observés au niveau d'une aspérité déposée à la surface d'un conducteur cylindrique sont qualitativement très semblables à ceux qu'on observe en géométrie pointe plan.

Le passage de courant de pointe vers l'air donne souvent lieu à des relaxations dues au blindage de la pointe par les charges d'espace déjà émises. Il y a alors interruption momentanée du processus d'ionisation qui recommence dès que les charges d'espaces se sont suffisamment éloignées sous l'effet du champ électrique : c'est le phénomène des aigrettes.

On distingue de nombreux types d'émission de courant par une pointe. Mais ceux qui se rencontrent au cours des études de l'effet couronne des conducteurs cylindriques se limitent pratiquement aux trois types suivants :

#### **V-6-1. Petites aigrettes négatives (impulsions de Trichel) :**

Quand on fait croître la tension du conducteur, le courant émis est d'abord pratiquement négligeable: il se réduit au drainage des paires électrons – ions, qui se créent naturellement dans l'espace inter - électrodes. Lorsque le champ critique  $E_c$  est atteint au sommet de la pointe ou de l'aspérité, il apparaît un courant impulsionnel, avec une fréquence de relaxation qui peut aller de 1kHz à 100 kHz. En général les impulsions sont d'autant plus petites et plus serrées que la pointe est fine et la pression est forte. Leur largeur est de l'ordre de la microseconde; leur amplitude est relativement faible, mais elles sont caractérisées par des fronts raides. A ces impulsions, dites «impulsions de Trichel», correspond visuellement un cône lumineux dont le sommet plus brillant est posé sur la pointe. La figure (IV-4-a) montre un oscillogramme d'impulsions de Trichel et l'aspect lumineux qu'elles présentent. Le mécanisme de ces impulsion est du type avalanche de Townsend. C'est pratiquement le seul mode d'émission couronne en tension négative.

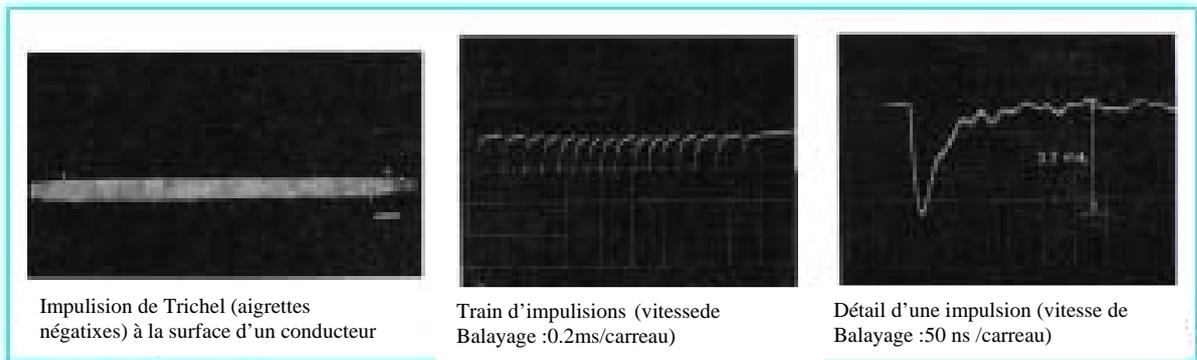
#### **IV-6-2. Zone de conductivité continue (Zone d'Hermstein) :**

C'est un mode d'émission en polarité positive qui a la propriété d'être parfaitement continu. En fait, pour une tension positive croissante ce n'est pas le premier mode d'émission couronne que l'on rencontre : les premiers modes d'émission qui apparaissent sont impulsionnels : (burst pulses et pre-onset streamers) Mais en courant alternatif ceux – ci sont difficilement observables et de peu d'importance. On peut dire que c'est la zone de conductivité continue qui domine dans le domaine immédiatement supérieur au potentiel critique. Sa participation à la formation des pertes couronne est importante, par contre évidemment négligeable dans la formation des perturbations radio - électriques.

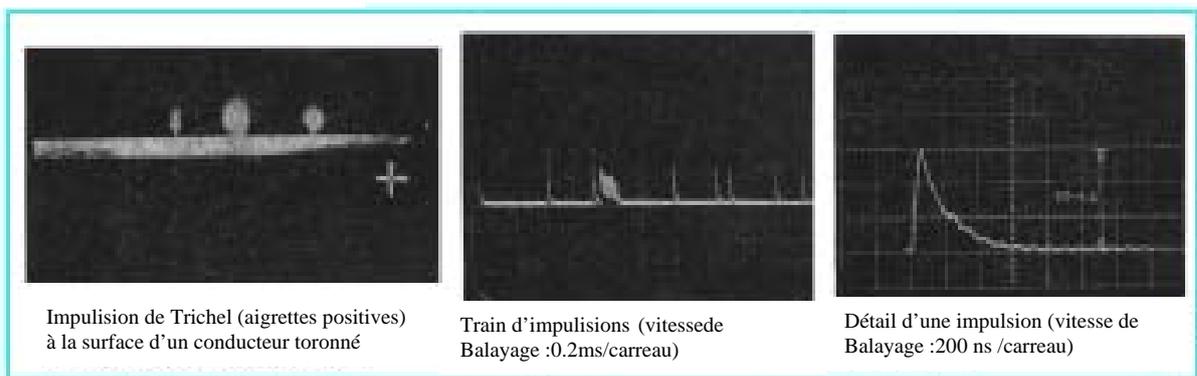
#### **IV-6-3. Grandes aigrettes positives (Pre-breakdown Streamers) :**

Ce mode d'émission couronne impulsionnel apparaît au delà de la zone de conductivité continue pour des tensions positives supérieures. Le courant d'émission prend la forme d'une série d'impulsions extrêmement raide. Visuellement le «pre-breakdown streamer» se présente comme une étincelle arborescente (48) très lumineuse dont la base est attachée à une aspérité du câble, sa longueur peut dépasser 10cm. Le phénomène est

accompagné, du point de vue acoustique, par un claquement sec. En électrotechnique on a coutume de les appeler grandes aigrettes positives. Ce sont elles qui sont responsable du bruit radioélectrique des lignes haute tension. Ces aigrettes sont en fait des streamers qui se propagent le long d'une onde de photo - ionisation (Fig IV-4-b).



**a- effet couronne négatif**



**b- effet couronne positif**

**Figure IV-4 : Impulsions de Trichel.**

**IV-7. Loi de Peek : seuil critique de l'effet couronne :**

**IV-7-1. Définition :**

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique d'effet couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat.

L'aspect général de l'effet couronne dépend de la taille du conducteur. Pour un fil très fin, l'effet est très reproductible, on observe une gaine lumineuse autour du fil, par contre pour des grands rayons de courbure ( $r > 2\text{mm}$ ), l'effet couronne se localise en certains endroits, perd sa symétrie et devient plus instable. Ces instabilités sont à l'origine des nombreuses formes d'émission de couronne.

En tension alternative, le seuil critique apparaît d'abord en polarité négative.

Peek observa que l'apparition de la couronne était fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur et de la densité de l'air. Il donna à sa loi la forme empirique suivante :

$$E_c = E_p \delta \left[ 1 + \frac{K}{\delta r} \right] \quad \text{IV.15}$$

$E_p = 31 \text{ kV/cm}$ .

$K$  : coefficient de Peek ;  $K = 0,308$ .

$$\delta = \frac{3.92p}{273 + t} \quad \text{IV.16}$$

$\delta = 1$  pour  $p = 76 \text{ cm Hg}$  et  $t = 25^\circ \text{ C}$ .

$E_C$  : champ critique en KV/cm.

$r$  : rayon du conducteur en (cm).

$p$  : pression de l'air en cm Hg.

L'état de surface du conducteur est très important : la relation précédente (IV.15) ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies .La rugosité superficielle diminue le champ critique, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental  $m \leq 1$ , appelé coefficient d'état de surface. Le champ critique  $E_C$  d'un conducteur imparfaitement poli s'exprime alors sous la forme :

$$E_0 = m E_C \quad \text{IV.17}$$

#### IV-7-2. Obtention de la loi de Peek :

Le champ électrique en fonction de  $\rho$  est donné par :

$$E(\rho) = E_m \frac{r}{\rho} \quad \text{IV.18}$$

$E_m$  : champ maximal à la surface du conducteur.

On obtient :

$$E_m = E_0 \left[ 1 + \frac{k}{\sqrt{r}} \right] \quad \text{IV.19}$$

$K$  : coefficient de Peek.

Ou  $E_{cr}$  : représente le champ critique maximale.

$$E_{cr \max} = 30.3\delta m \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta.r}} \right) [KV / cm] \quad \text{IV.20}$$

**Remarque :**

La loi de Peek a donc donné un seuil critique à partir duquel on dit qu'il y a effet couronne ou cet effet est négligeable :

On note : Si  $V > V_{cr} \implies$  il y a effet couronne

Si  $V \leq V_{cr} \implies$  il n'y a pas d'effet couronne

Ou  $V$  : est la valeur de la tension efficace appliquée.

$V_{cr}$  : est le potentiel critique qui dans notre cas proportionnel au champ critique donné par Peek.

Notant que ces approximations sont largement utilisées dans le chapitre suivant IV et elles sont la base pour la visualisation de l'atténuation des surtensions transitoires par l'effet couronne.

Pour se protéger généralement contre ce phénomène, on utilise principalement des conducteurs en faisceaux pour la THT et la HT.

Jusqu'ici nous n'avons cité que les inconvénients de l'effet couronne, mais il se trouve que l'effet couronne (48) atténue et déforme les différentes formes de surtension surtout les surtensions transitoires de foudre (qui sont les plus graves pour les installations des réseaux électriques) et les déforment de façon très remarquable, plusieurs résultats ont montré que cette diminution peut aller jusqu'à plus 80% de l'onde de surtension. Ainsi de nouvelles approches de protection seront utilisées grâce à ce phénomène. C'est pour cette raison que tous les résultats d'études de ce chapitre II et ceux du chapitre IV seront utilisés pour l'étude de cette atténuation.

# CHAPITRE V

## **V-1 Introduction :**

La continuité de service d'un réseau de transport est primordiale pour les exploitants des réseaux électriques. Le contournement des isolateurs pollués est un des problèmes majeurs et présente 80% des défauts dans la ligne électrique de haute tension (31),(40). Les causes essentielles sont la coordination des isolants d'une part et des phénomènes transitoires temporaires dus en général à des coups de foudre (41). Le présent travail est consacré à l'étude et l'analyse avancée d'une catégorie importante des surtensions dont les résultats, obtenus après de longues recherches, sont restés controversés : à savoir en premier lieu, les surtensions de foudre qui se propagent le long d'une ligne électrique subissent une déformation sous l'influence de l'effet couronne (30).

Cette atténuation qui se superpose à une distorsion par effet de peau est due à la dissipation supplémentaire d'énergie par injection de charges d'espace autour des conducteurs dès que la tension critique de l'effet couronne est dépassée.

Le problème est posé depuis fort longtemps et avait été traité par plusieurs chercheurs.

Cependant la divergence des résultats obtenus a été marquée à cause de la complication naturelle du phénomène de foudre (39) ainsi que ces chercheurs avaient utilisé des sections de conducteurs relativement faibles non représentatives à des conducteurs actuels.

De nos jours et grâce à un nouvel appui expérimental adopté aux lignes ainsi que certain affinement de la théorie ; comme la recherche des lois de similitude (55) reste donc nécessaire, sans oublier les récentes recherches sur la physique de décharge à grande distance celles-ci nous permettent de déduire une nouvelle interprétation des phénomènes mis en jeu dans les surtensions de foudre.

A cet égard, une protection générale (44) définissant les principaux paramètres qui entrent en jeu dans l'atténuation et la distorsion des surtensions de foudre sous l'influence de flux couronne est nécessaire pour la première partie de ce travail.

En utilisant les travaux expérimentaux élaboré par C.Gary et son groupe de recherche au laboratoire de Clamart (France) (29) ; nous avons traité le principe général basé principalement sur le cycle des charges en utilisant un modèle analogique d'une ligne en présence de l'effet couronne transitoire.

## **V-2.Méthodes expérimentales :**

Le calcul de la distorsion de propagation des surtensions de foudre et l'analyse des résultats détenus font l'objet principal de notre travail et pour valider nos calculs qui forment une interprétation théorique des mesures des cycles de charge  $q = f(u)$  effectués au laboratoire et fournissant la base physique de ce calcul et de le comparer avec le groupe de

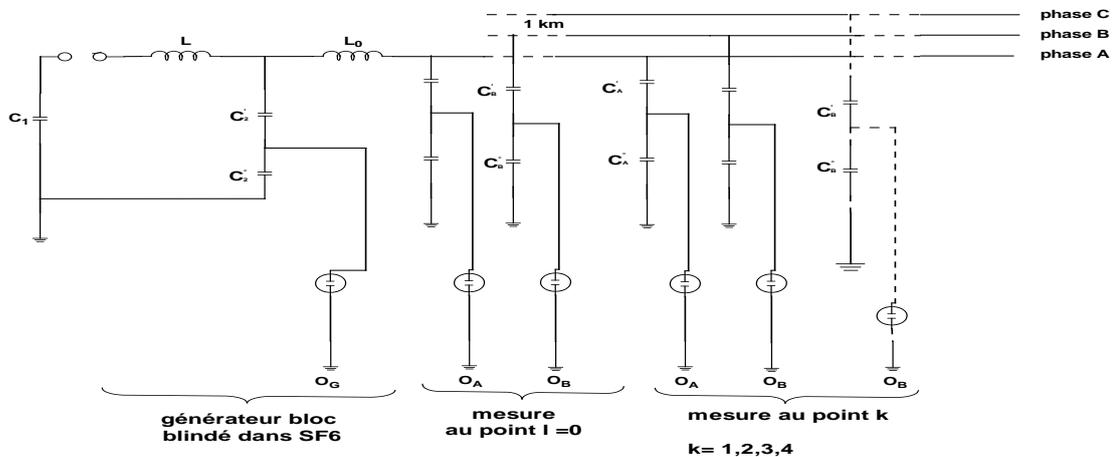
chercheurs de Roumanie [25] et en France [48]. Sur la ligne réelle de 65km de longueur et sous une tension de 220 kV. Cette ligne a les caractéristiques suivantes, elle est de 411 mm<sup>2</sup> de section et de diamètre  $\varnothing=26,2$  mm et d'une distance entre phases  $d=7$  m. le générateur de choc utilise les caractéristiques suivantes, c'est un générateur blindé SF<sub>6</sub> de tension: d'une énergie  $W=21$ kJoules et d'une capacité de choc  $C_{choc} = 21,4nF$ .

Le générateur de choc est connecté à une phase de la ligne considérée.

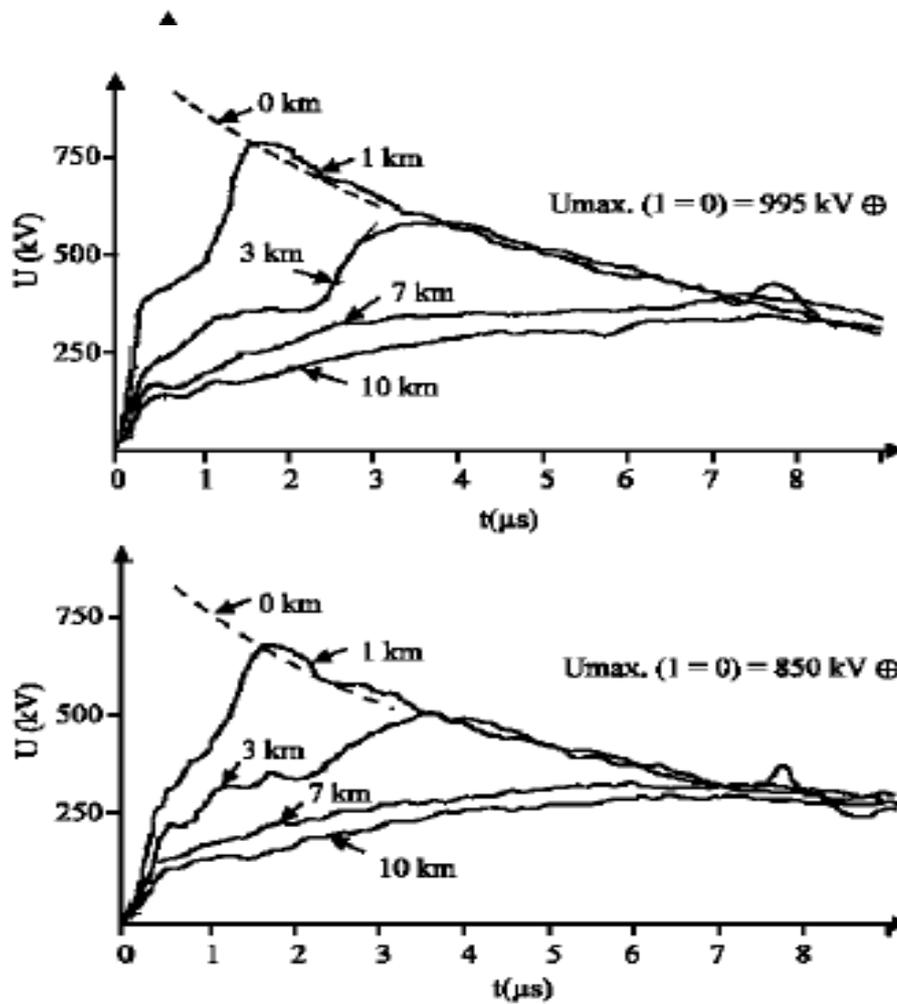
L'enregistrement des mesures a été effectué à l'aide des oscilloscopes mobiles sous formes de poste connectés dans chaque phase de la ligne respectivement en OA, OB et OC comme l'indique la figure V-1.

Les tensions de choc utilisées étaient de polarité positive et négative avec des amplitudes 300 kV inférieure à la tension critique  $U_0$ , puis 600 kV, 850 kV et 950kV. Sachant que la ligne est suffisamment longue, elle sera vue du générateur de choc comme une résistance égale à son impédance caractéristique  $Z$  (notant que cette impédance dépend du couplage ainsi probablement que de l'effet couronne). La constante de temps de queue du choc obtenu sera donnée par  $Z C$ ,  $C$  étant la capacité de charge du générateur. Le calcul prévoit environ 10 $\mu$ s, soit une durée de queue conventionnelle d'environ 7 $\mu$ s. Pour avoir une queue plus longue un générateur plus puissant aurait été nécessaire [43].

En profitant de ces énormes travaux, nous présentons les graphiques de l'oscillographe connecté à la phase A siège du choc injecté et par conséquent de l'effet couronne ces graphes présentent des ondes mobiles de tension en plusieurs points de la ligne (0 km, 1 km, 3 km, 7 km et 10 km) figure V-2. D'après ces graphiques expérimentaux on constate sans ambiguïté une déformation due à l'effet couronne (25) bien plus importante que celle due à l'effet de peau. Les effets respectifs de la distance de propagation et de l'amplitude de l'onde initiale et de la polarité sont nettement visibles.



**Fig.V-1 : Schéma d'injection et de mesure des ondes mobiles le long de la ligne 220kV**



**Fig.V-2 : Courbes de distorsion et de propagation d'une onde tension supérieure à la tension critique (polarité positive)**

Le plus remarquable de ces enregistrements est la dépendance entre l'amplitude de l'onde ( $U_{max}$ ), le temps du front ou de la raideur  $t_{max}$  et de la distance de propagation.

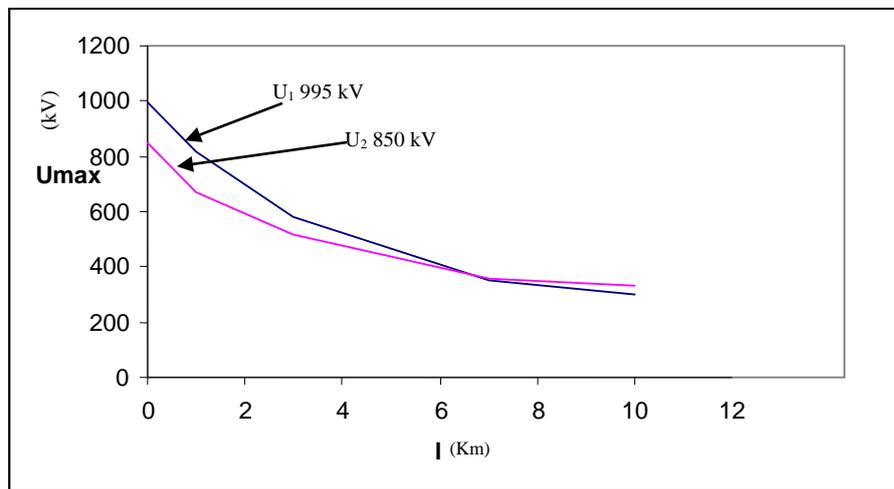
D'après ces graphes de la figureV-2 on peut déduire plusieurs points qui illustrent cette dépendance que nous présentons dans les tableaux 1 et 2 représentés aux figures V-3 etV-4.

$l$ (km)	0	1	3	7	10
$U_{1max}$ kV	995	820	580	350	300
$U_{2max}$ kV	850	670	520	360	330

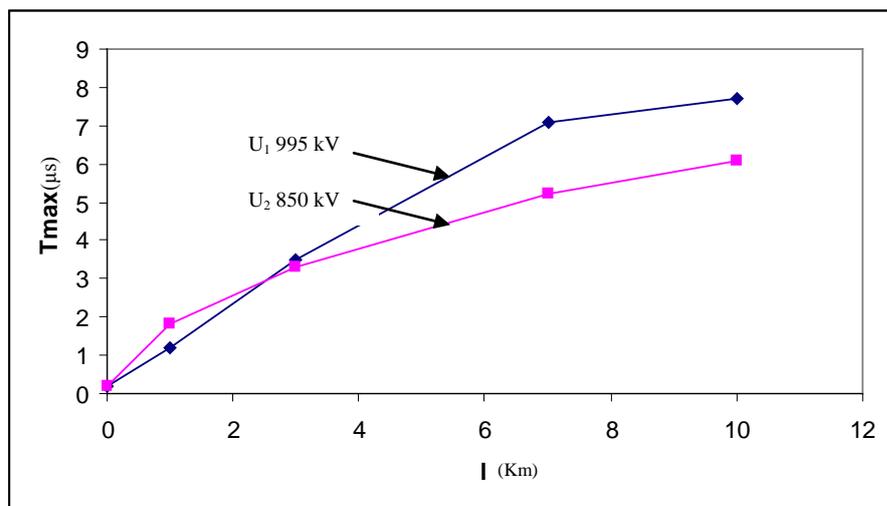
**Tableau V-1 : variation de l'amplitude maximale le long de la propagation**

l (km)	0	1	3	7	10
T <sub>1</sub> max μs	0,2	1,2	3,5	7,1	7,7
T <sub>2</sub> max μs	0,2	1,8	3,3	5,2	6,1

**TableauV- 2 : variation du temps de raideur de l'onde le long de la propagation**



**Fig.V-3.Variation de Umax en fonction de la distance de propagation**



**Fig.V-4.Variation de Tmax en fonction de la distance de propagation**

### V- 3. La méthode des échantillons en laboratoire : Les cycles " q-u " :

#### V-3-1. Principe de l'étude :

Le principe de l'étude consiste à appliquer la surtension  $u(t)$  d'un générateur de choc à un échantillon de conducteur d'une dizaine de mètres de longueur et à mesurer la charge d'espace  $q(t)$  injectée par effet couronne dans son voisinage .

A partir de l'analyse de la relation expérimentale  $q = f(u)$ , on peut déterminer par le seul calcul la déformation supplémentaire de propagation et la déformation subie par l'onde.

On obtient alors une figure en forme de boucle fermée d'où le nom de cycle " q-u " figure V-5.

Pratiquement, on relève un cycle charge tension critique de conducteur (loi de Peek ) , la charge est uniquement capacitive et une fonction linéaire de la tension telle que :

$$q_g = C_{\text{géom}} \cdot U \quad \text{V.1}$$

Et au dessus de la tension critique  $U_{\text{cr}}$  , la charge mesuré s'écrira :

$$q = q_{\text{géom}} + q_{\text{cor}} = C_{\text{géom}} \cdot U + q_{\text{cor}} \quad \text{V.2}$$

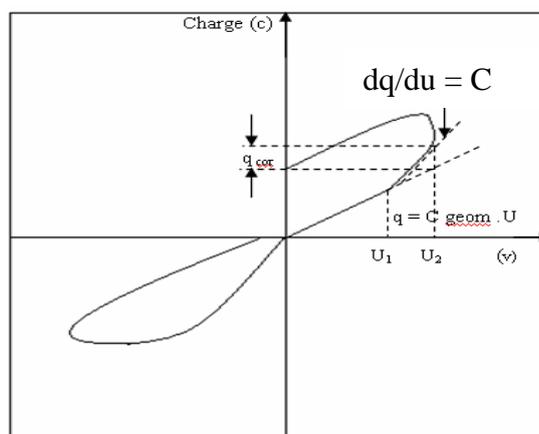
Avec,

$q_g$  : la charge sans la présence d'effet couronne

$q_{\text{cor}}$ : la charge avec la présence de l'effet couronne

$$C_{\text{géom}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{Ln \frac{2h}{R}} \quad \text{V.3}$$

A partir d'un tel cycle, on peut concevoir deux interprétations possibles de la déformation de propagation de long d'une ligne. Considérons en effet une onde de surtension exprimée par  $U_1(t)$  au point d'abscisse 1 ( figureV-6) et par  $U_2(t)$  au pont d'abscisse  $1 + \Delta 1$  , dans le sens de la propagation .



**Figure V-5** Aspect général d'un cycle de charge " q-v " obtenus pour un échantillon au laboratoire

**a)- 1<sup>ère</sup> interprétation : Retard de propagation :**

Partons des deux équations classiques des télégraphistes, appliquées à un élément dl de ligne :

$$\frac{du}{dl} = L \frac{di}{dt} \quad \text{V.4}$$
$$\frac{di}{dl} = C \frac{du}{dt}$$

Dans notre cas nous écrirons :

$$\frac{di}{dl} = \frac{dq}{dt} \quad \text{V.5}$$

Où q par définition n'est autre chose que la charge q(u) ramenée à l'unité de longueur du conducteur, qui apparaît dans le tracé du cycle.

Posons alors :

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq}{du} \cdot \frac{du}{dt} \quad \text{V.6}$$

Dans cette équation,  $\frac{dq}{du}$  a les dimensions d'une capacité que nous appellerons capacité

dynamique  $C_{\text{dyn}}$ . Cette capacité est une fonction de u et est donnée par la pente instantanée du cycle : elle est toujours supérieure à la capacité géométrique  $C_{\text{géom}}$  du conducteur.

En présence d'un effet de couronne, la deuxième équation du système devient donc :

$$\frac{di}{dl} = C_{\text{dyn}} \frac{du}{dt} \quad \text{V.7}$$

On peut considérer alors la relation :

$$q = C_{\text{dyn}} \cdot U \quad \text{V.8}$$

Où :  $C_{\text{dyn}}$  : serait une capacité dynamique variable avec la tension, cette capacité tient compte de l'augmentation de la charge du conducteur par l'effet couronne, et doit par conséquent être supérieur à  $C_{\text{géom}}$ .

La solution du nouveau système définit une vitesse de propagation

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_{\text{dyn}}}} \quad \text{V.9}$$

Où : L est l'inductance de la ligne

$C_{\text{dyn}}$  : est la capacité dynamique.

On voit que  $v$  est une fonction de  $C_{dyn}$  donc de  $u$ .

On peut alors interpréter la déformation subie par l'onde de tension en supposant que chaque tranche d'onde comprise entre  $u$  et  $u + \Delta u$  se déplace avec une vitesse différente, inférieure à la vitesse de la lumière  $c$ , déterminée par la capacité dynamique  $C_{dyn}$  instantanée.

Le retard  $\Delta t$ , caractéristique de la distorsion, s'exprimera par :

$$\Delta t = \Delta l \left[ \frac{1}{v} - \frac{1}{c} \right] \quad \text{V.10}$$

**b)- 2<sup>ème</sup> interprétation : Dissipation de l'énergie :**

L'énergie dissipée par les charges d'espace au cours d'un cycle de tension s'écrit :

$$W = \int_{Cycle} u dq \quad \text{V.11}$$

Et peut, par conséquent, se calculer à partir de la surface de ce cycle.

L'énergie transportée par une onde de tension est donc donnée par :

$$W = \frac{1}{Z} \int_0^{\infty} u^2(t) dt \quad \text{V.12}$$

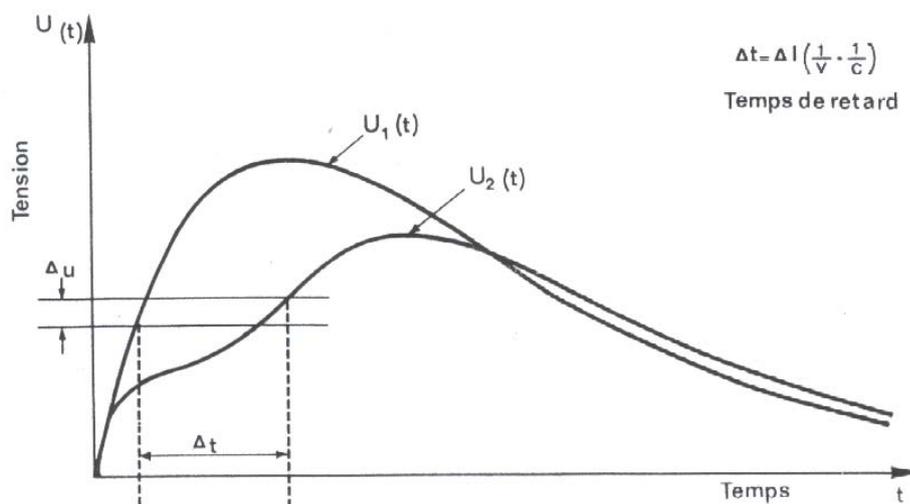
Avec  $Z$  : Impédance caractéristique de la ligne et donnée par :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_{geom}}} \quad \text{V.13}$$

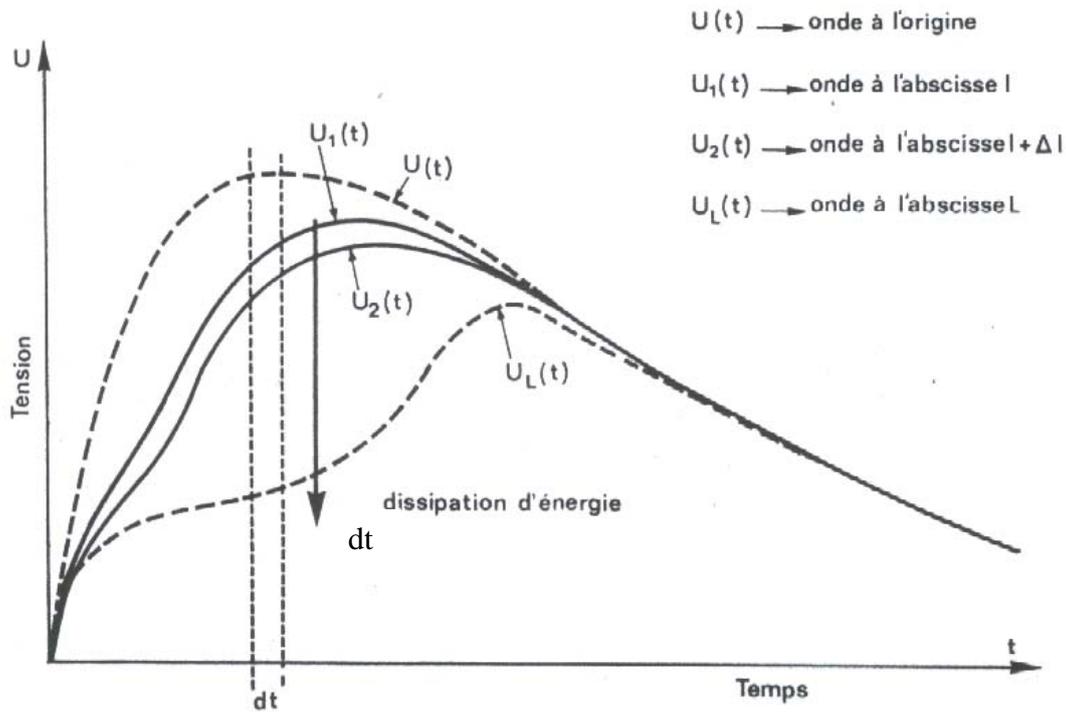
Avec ces hypothèses, l'énergie dissipée le long du tronçon  $\Delta l$  vaudra évidemment :

$$W_1 - W_2 = \frac{1}{Z} \int_0^{\infty} [u_1^2(t) - u_2^2(t)] dt \quad \text{V.14}$$

Où  $u_1(t)$  et  $u_2(t)$  sont respectivement les tensions en deux points de propagation successifs : 1 puis 2. S'il y a effet couronne, l'existence de la dissipation d'énergie nécessite une tension  $u_2(t)$  inférieure à  $u_1(t)$ . D'où l'explication de l'atténuation des surtensions par l'effet couronne



**Figure V-6. Interprétation de la distorsion de propagation par le retard de propagation du front de l'onde**



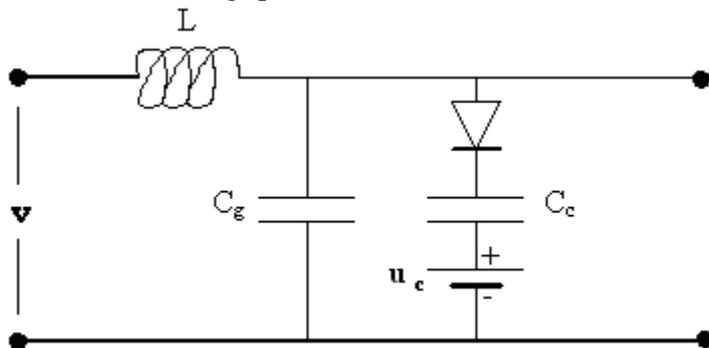
**Figure V-7 .Interprétation de la distorsion de propagation par l'énergie dissipé**

D'autre part, on sait que les cycles " q-v " dépendent uniquement de l'amplitude de la tension de la géométrie de la ligne, sachant que l'énergie dissipée par effet couronne est représentée par l'air de ces cycles, il s'ensuit que plus ces cycles sont « gonflés » et plus les pertes couronnes sont importantes, ce qui équivaut à une plus grande résistance couronne (25) et un amortissement important des surtensions.

**V.4 Modélisation analogique de l'atténuation de l'onde de surtension par Simulink/ Matlab.**

**V-4-1. Etude du circuit analogique.**

Suivant le modèle analogique suivant :



**Figure V-8Modèle analogique proposé**

La modélisation de l'onde de surtension d'une onde de choc 1,2/50µs, d'une tension crête  $v_m$  est représentée par une fonction de temps  $v(t)$  telle que :

$$v(t) = V_0 \left( e^{-\frac{t}{\tau_q}} - e^{-\frac{t}{\tau_f}} \right) \quad \text{V.15}$$

Où  $\tau_q$  : constante de temps de queue de l'onde de tension,

$\tau_f$  : constante de temps de front de l'onde de tension,

$V_0$  : coefficient de tension définit tel que :

$$V_m = V_0 \left( \delta^{1-\delta} - \delta^{1-\delta} \right) \quad \text{V.16}$$

Où  $V_m$  : valeur crête de la surtension,

$$\delta = \frac{\tau_q}{\tau_f} \quad \text{V.17}$$

On définit le rendement du générateur d'onde de choc :

$$\eta = \frac{V_0}{V_m} \quad \text{V.18}$$

Application pour une onde de foudre 1,2/50 µs :

$$v(t) = V_0 \left( e^{-0.014867t} - e^{-2.801120t} \right)$$

$$\tau_q = 67.26 \quad \text{et} \quad \tau_f = 0.357$$

$$\delta = \frac{67.26}{0.357} = 188.4$$

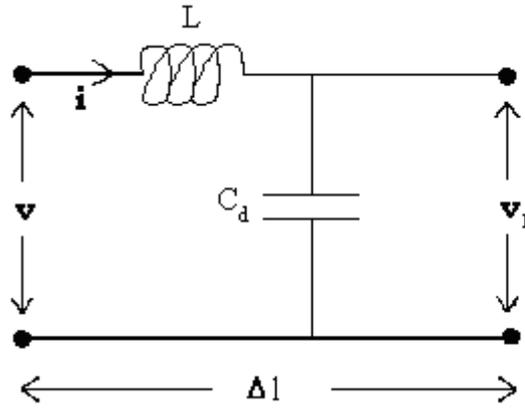
$$\eta = 0,967$$

Finalement, la surtension de foudre  $v_m$  ( kV), s'écrit :

$$v(t) = v_m \eta \left( e^{-\frac{t}{67.26}} - e^{-\frac{t}{0.357}} \right) \quad \text{V.19}$$

#### **V-4-2. Etude du circuit électrique équivalent du modèle.**

L'étude du circuit équivalent du modèle donne :



**Figure V-9. Schéma électrique équivalent d'un tronçon de ligne.**

La tension à l'entrée du schéma équivalent est représentée par l'équation:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C_d} \int i(t) dt \quad \text{V.20}$$

Où  $v(t)$  : tension appliquée à l'entrée de chaque tronçon de ligne (pour le 1<sup>er</sup> tronçon,  $v(t)$  est la fonction de surtension),

$i(t)$  : courant circulant dans le tronçon de ligne,

$C_d$  : capacité dynamique déterminée de l'analyse des cycles q-v,

$L$  : inductance du tronçon de ligne (H) calculée à partir des dimensions de la ligne tel que :

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D_{eq}}{R_{eq}} \right) \quad (\text{H/m}) \quad \text{V.21}$$

Où  $\mu_0$  : perméabilité magnétique de l'air (H/m),

$D_{eq}$  : distance équivalente entre phase de la ligne,

$R_{eq}$  : rayon équivalent des conducteurs de phase de la ligne.

La tension  $v_1(t)$  à la sortie du tronçon 1 et qui s'appliquera à l'entrée du tronçon 2 est telle que :

$$i(t) = C_d \frac{dv_1(t)}{dt} \quad \text{V.22}$$

L'expression  $v(t)$  s'écrira alors :

$$LC_d \frac{d^2 v_1(t)}{dt^2} + v_1(t) = v(t) \quad \text{V.23}$$

Cette équation différentielle du second ordre en  $v_1$  avec second membre, dont la solution est de la forme d'une somme d'une solution particulière plus une solution générale.

La solution particulière est de la forme de la surtension  $v(t)$  :



- Chaque conducteur de phase est de 2.62 cm de diamètre,
- La distance entre phases est 7 m,
- Les conducteurs sont disposés en nappe horizontale

**\* Calcul de la résistance linéique.**

$$R = \frac{\rho}{s} \quad (\Omega/\text{m}) \quad \text{V.29}$$

Où  $\rho = 3.3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ , la résistivité pour un conducteur en Almelec,  
 Pour toute valeur du rayon du conducteur on calcul sa section :

ex :  $r = 1.31 \text{ cm}$ , on a  $S = 5.39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , et donc la valeur de la résistance est égale à :

$$R = 6.1 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m},$$

Pour une longueur  $l = 500 \text{ m}$  d'un tronçon, la résistance sera :

$$R = 0.0306 \Omega.$$

**\* Calcul de l'inductance linéique.**

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \left( 0,25 + \ln \frac{D_m}{R_{eq}} \right) \quad (\text{H/m}) \quad \text{V.30}$$

$D_m$  : distance moyenne égale à  $\sqrt[3]{2}D$  où  $D$  est la distance entre 2 phases adjacentes.

Avec  $D = 7 \text{ m}$ , on obtient  $D_m = 8.819 \text{ m}$ .

D'où  $L = 13.52 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

Pour une longueur  $l = 500 \text{ m}$  d'un tronçon, l'inductance sera :

$$L = 6.762 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

**\* Calcul de la capacité linéique.**

$$C = \frac{55.5 \cdot 10^{-12}}{\ln \frac{D_m}{R_{eq}}} \quad (\text{F/m}) \quad \text{V.31}$$

$$C = 8.836 \cdot 10^{-12} \text{ F/m},$$

Pour une longueur  $l = 500 \text{ m}$  d'un tronçon, la capacité sera :

$$C = 4.418 \cdot 10^{-9} \text{ F}.$$

La conductance sera négligée.

**V-4-3. Simulation de la charge**

La charge a été simulée par une impédance  $Z_{Ch}$  telle que :

La résistance de charge :  $R_{ch} = 566 \Omega$ ,

L'inductance de charge :  $L_{ch} = 3.12 \text{ H}$ ,

La capacité de charge  $C_{ch} = 8.79 \mu\text{F}$ ,

Les éléments sont montés en parallèle.

Considérons l'onde de surtension par une onde de choc normal : 1.2/50  $\mu$ s.

Considérons une tension crête de 850 kV de la surtension. Cette onde de surtension sous la forme de la double exponentielle suivante :

$$v(t) = 878.76 \left( e^{-\frac{t}{67.26}} - e^{-\frac{t}{0.357}} \right) \quad (\text{kV}) \quad \text{V.32}$$

Pour d'éventuels autres exemples, un programme informatique qui exécute l'organigramme suivant pourrait être utilisé.

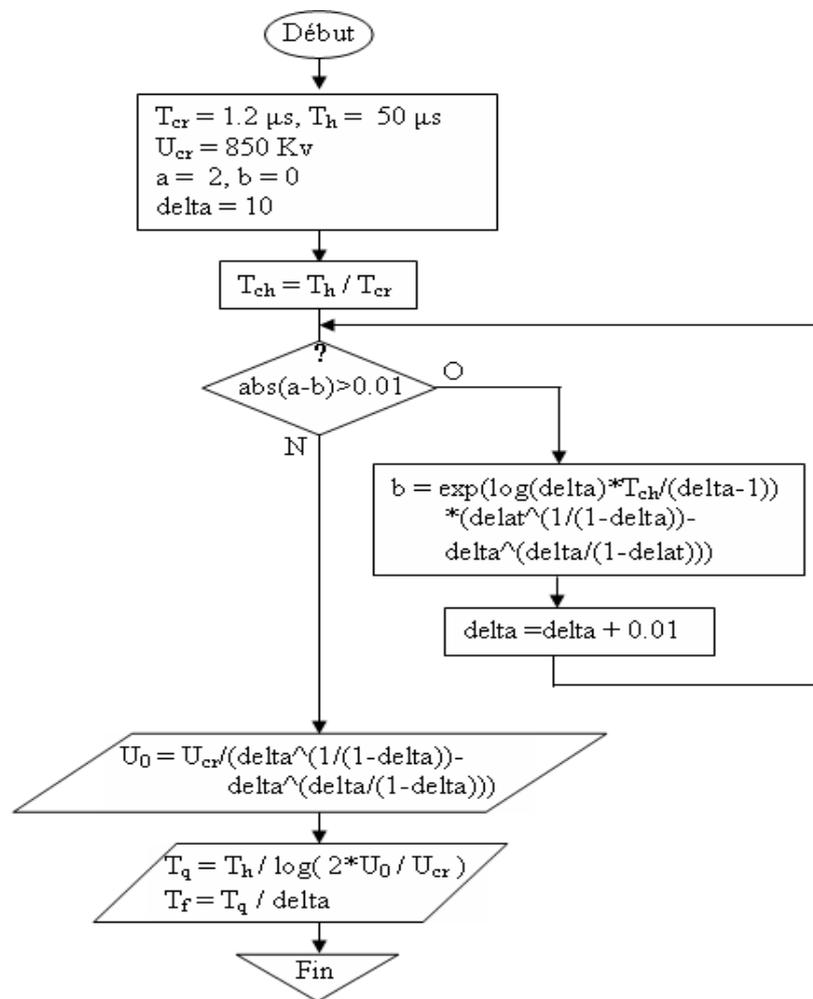
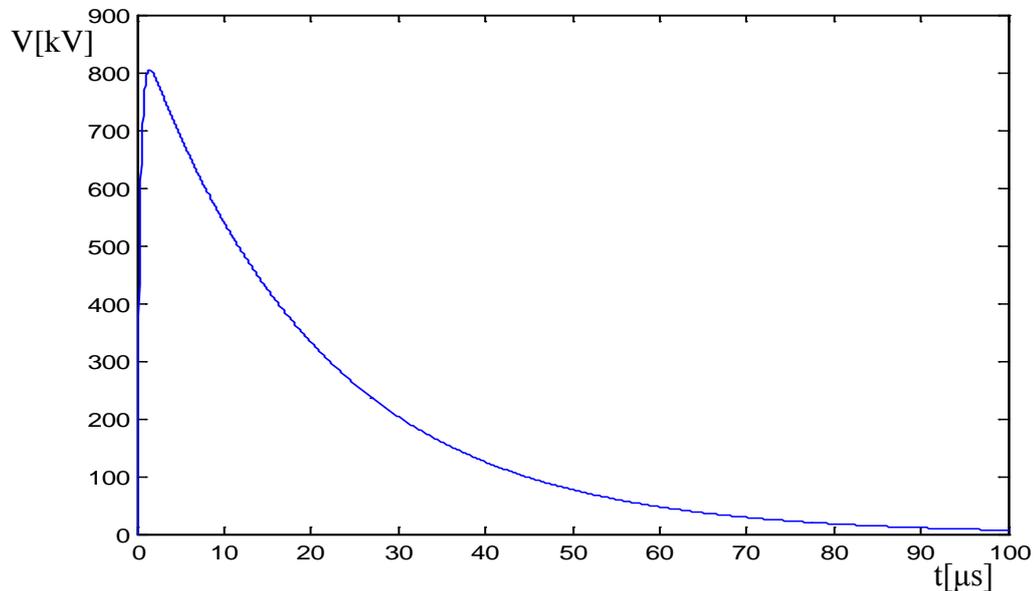


Figure V- 10 Organigramme de calcul Matlab d'une onde de choc normale 1.2/50 $\mu$ s.

Le résultat de la simulation de l'onde de choc est présenté sur la figure V-11.



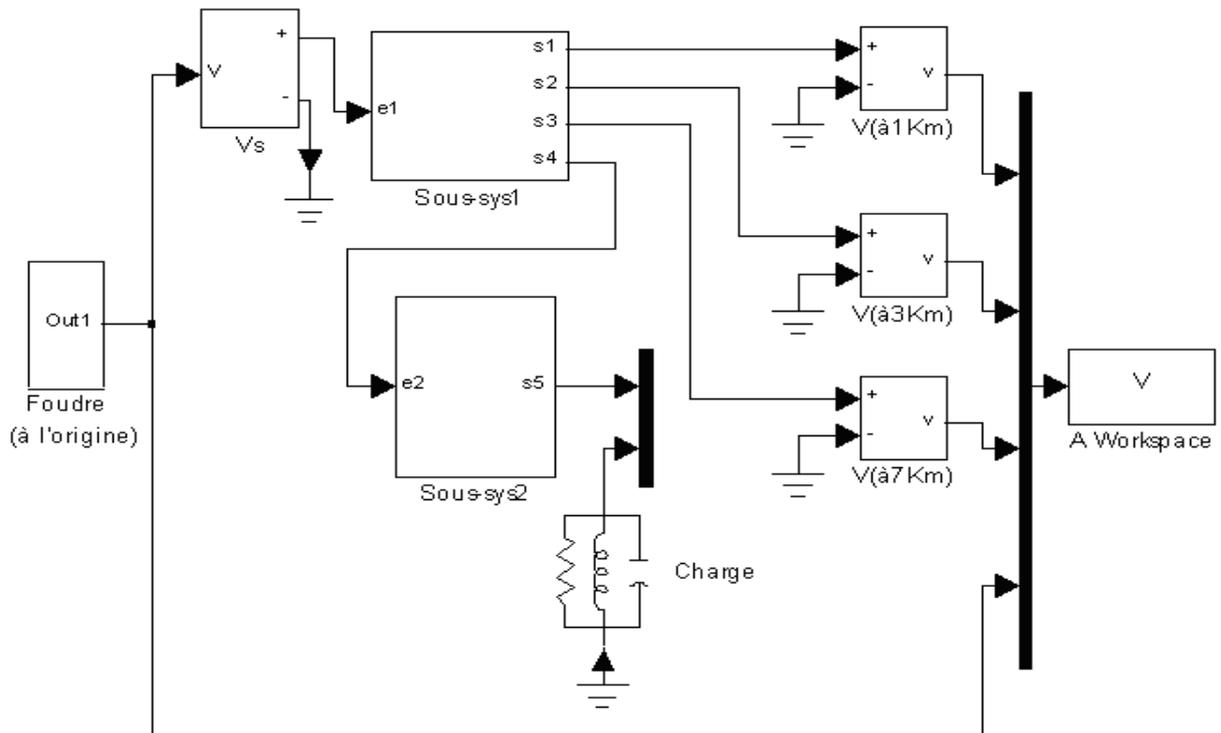
**Figure V-11. Courbe obtenue par simulation Matlab d'une onde de choc 1,2/50 $\mu s$  avec  $v_{Cr}=850$  kV**

#### **V-4-4. Détermination de l'atténuation de la surtension.**

Pour établir la courbe de la surtension  $v(t)$  en différents points de la ligne, on utilise le logiciel Simulink-Matlab.

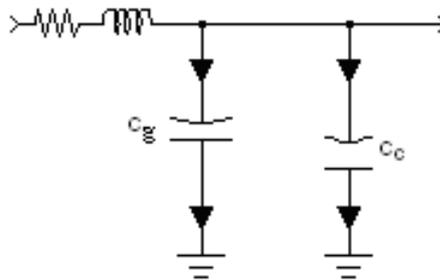
##### **a). Présentation des éléments de la modélisation Simulink**

Le modèle de la simulation a été construit par l'utilisation des éléments de la bibliothèque de Simulink d'un Matlab 6.5.



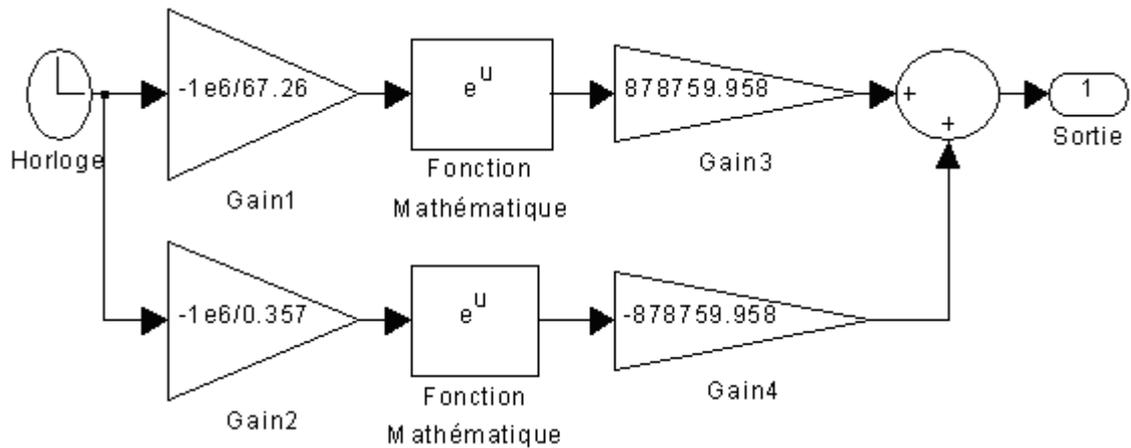
**Figure V-12.Circuit de la simulation complète.**

La ligne étant décomposée en sections identiques, chaque section est simulée par un circuit équivalent, représenté par la figure suivante :



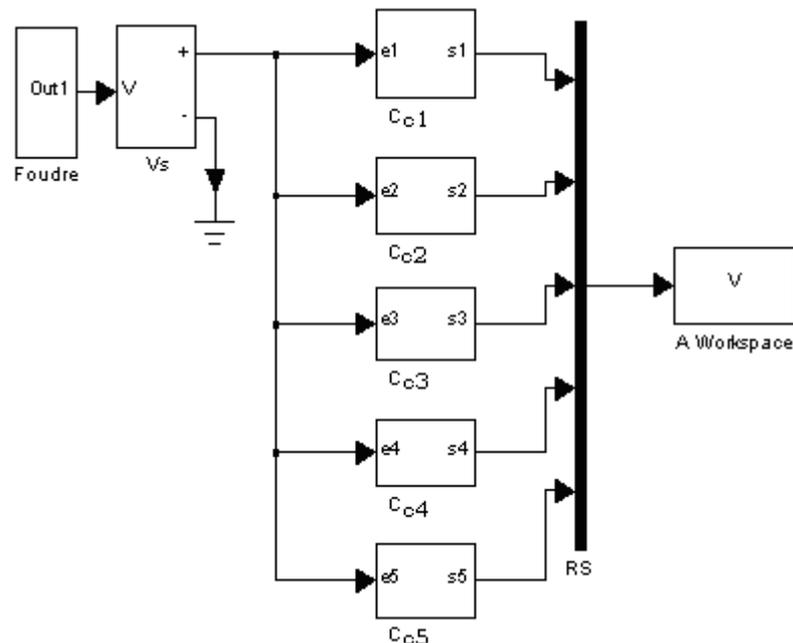
**Figure V-13.Schéma utilisé dans Simulink pour la représentation d'un tronçon de ligne avec effet couronne.**

Le bloc de foudre (Le point d'impact de l'onde de surtension est supposé appliqué à la source) est simulé par le circuit de la figure suivante :



**Figure V-14. Circuit de simulation de l'onde de choc de foudre**

Le circuit de simulation pour différentes valeurs de la capacité couronne est présenté dans la figure suivante :

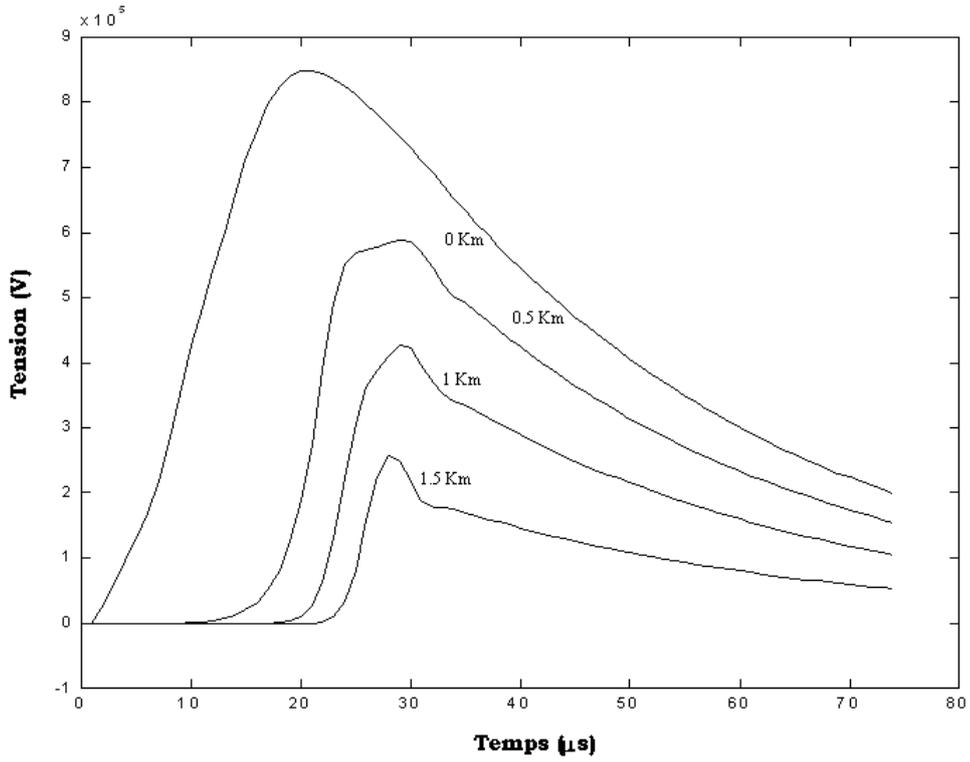


**Figure V-15. Circuit de simulation pour différentes valeurs de  $C_c$  :  $C_{C1}$  ;  $C_{C2}$  ;  $C_{C3}$  ;  $C_{C4}$**

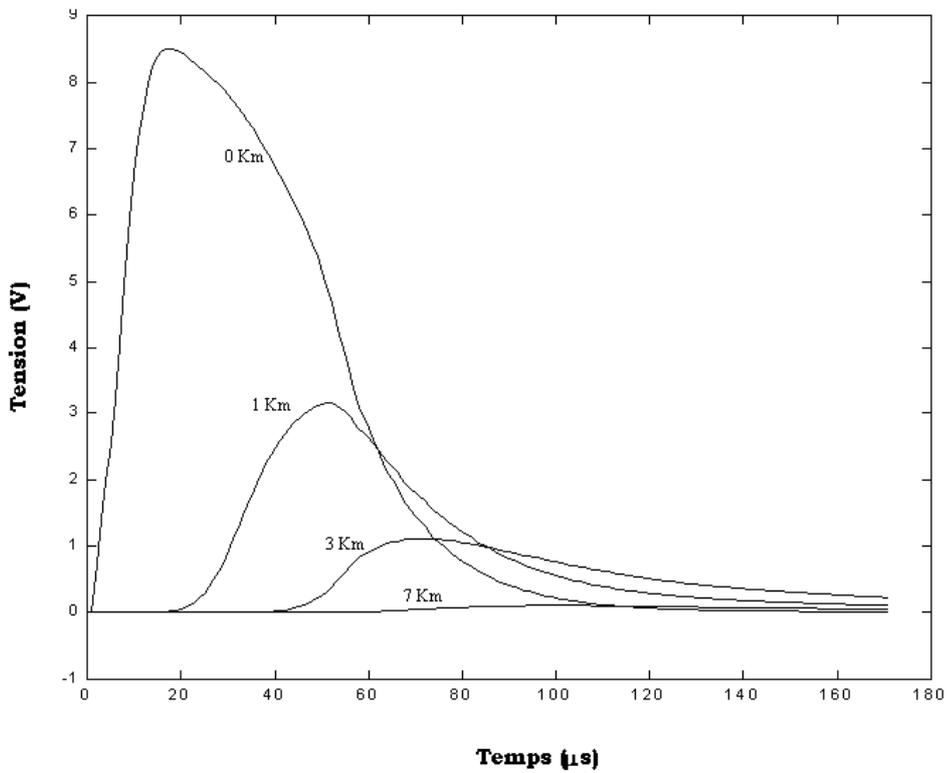
### b) Simulation pour une ligne avec pertes

La source de l'effet couronne est simulée par une capacité  $C_c$ . La valeur de cette capacité est prise égale à 8,54nF. Les résultats sont présentés dans deux figures différentes (V-16, V-17) : pour les distances : 0, 0.5, 1 et 1.5 km et la figure suivante pour les distances : 0, 1, 3 et 7 km. L'atténuation de la surtension, durant sa propagation le long de la ligne est parfaitement illustrée par ces résultats.

On détermine l'atténuation par des chiffres : à 1Km l'atténuation est de 62.35%, alors à 7Km, cette atténuation dépasse 98%.



**Figure V-16.** Représentations de la surtension à la source (0km), et à des distances : 0,5km, 1km et 1,5km de la source.



**Figure V-17.** Représentations de la surtension à la source (0km), et à des distances : 1km, 3km et 7km de la source.

Ces figures montrent une nette déformation due à l'effet couronne.

## V-5. Conclusion.

Dans ce chapitre on a montré qu'une onde de surtension atmosphérique se déforme très vite au cours de sa propagation le long de la ligne. Les différentes surtensions selon la norme CEI 71 qui peuvent affecter un réseau électrique sont présentées au tableau 3 en annexe.

Une onde de front très raide au point d'injection (D) qui peut parcourir les 60Km en un temps de 200  $\mu$ s, qui est un temps relativement court par rapport au temps de déclenchement des dispositifs de protections.

Quand à l'atténuation de l'amplitude, elle dépend essentiellement de la durée de la queue, pour l'onde normalisée 1,2 /50  $\mu$ s, l'atténuation atteint plus de 75 % en tombant rapidement à une valeur proche de la tension de seuil de l'installation.

Pour ce, et dans tous les cas qu'on peut envisager, l'onde de surtension pénétrant dans un poste sera caractérisée, dès que la distance de l'impact du poste est supérieure à 2 ou 3 Km, par un front très aplati, et par une amplitude nettement inférieure à la tenue au choc du matériel du poste.

Cette surtension présentera en outre une forme qui n'a rien à voir avec l'onde injectée.

On constate aussi que, sauf dans le cas d'un coup de foudre direct très proche du poste (distance inférieure à 2Km), les surtensions atmosphériques apparaissent totalement inoffensives lorsqu'elles atteignent l'entrée du poste.

De ce fait les conséquences de l'étude de distorsion et de d'atténuation de la propagation due à l'effet couronne, sont une connaissance considérable pour l'amélioration des contraintes électriques affectant les ouvrages de haute tension et de très haute tension et par suite, une meilleure mise en oeuvre d'un plan de coordination d'isolement et de protection.

Par exemple pour une nouvelle approche de protection les câbles de garde d'une ligne de transport de haute tension ou très haute tension au delà de 10Km ne sont plus indispensables, quant à la protection du poste contre les surtensions atmosphériques, sinon pour se protéger contre le contournement des isolateurs. Et par conséquent les dispositifs de protection seront réétudiés et redimensionnés.

# CHAPITRE VI

## **VI-1. Introduction :**

Les isolateurs ne présentent que quelques pourcents du coût total de la ligne mais jouent un rôle prépondérant sur la qualité du transport de l'énergie électrique. La fiabilité de service et les économies sur les opérations de maintenance seront d'autant plus grandes que le choix du dimensionnement des isolateurs sera basé sur une conception fiable et sur la prise en compte des contraintes externes environnementales et en particulier celle de la pollution.

La pollution est d'origine naturelle (poussières, bord de la mer...), industrielles (aciéries, cimenterie, industries chimiques).

Dans ces zones où la surface des isolateurs est conductrice en présence d'humidité, la pollution devient alors un paramètre dimensionnant important. Aussi les chaînes d'isolateurs doivent être conçues de façon à minimiser leur longueur afin de réduire le surdimensionnement coûteux des pylônes. Dans les cas de pollution extrême, surtout dans les zones où il est noté quasiment une absence de pluviométrie, la forme des isolateurs doit prendre compte de la nécessité de pouvoir effectuer des opérations de lavage efficace, y compris sous une tension électrique et sous pression. D'un autre côté, sachant qu'il existe un autre paramètre caractérisant le contournement c'est les surtensions internes ou externes.

Pour le projet du tracé d'une ligne électrique haute tension, on doit tenir compte des niveaux isokérauniques de chaque pays. Les surtensions externes ont un effet néfaste sur le contournement et la perforation des isolateurs.

## **VI-2. Mécanismes de contournement des isolateurs :**

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes, chacune de ces étapes a une importance sur le résultat final, c'est à dire la tenue ou le contournement de la chaîne isolante sous la tension de service, ces étapes sont:

- \* Dépôt de pollution.
- \* Humidification de la pollution.
- \* Développement de la zone sèche et apparition d'arcs.
- \* Comportements des arcs.

Au chapitre I et suivant le modèle d'Obenaus on a procédé à deux approches du contournement des isolateurs (qualitative et théorique).

En ce qui concerne l'approche qualitative le schéma de modélisation est présenté sur la figure 7 qui se résume à l'apparition de courant de fuite qui provoque un échauffement de l'électrolyte et accroît la conductivité. En second lieu grâce à l'échauffement on a un assèchement local de la couche polluante jusqu'à l'interruption complète du courant de fuite.

Aux bornes de la zone sèche apparaît une tension susceptible de créer des arcs c'est à partir de stade qu'on peut observer les étapes successives du contournement.

Ces étapes dépendent de nombreux paramètres (nature de l'isolant, la tension appliquée, conductivité et largeur de la couche de la zone sèche).

Cette description schématique montre qu'un arc qui a pris naissance le long d'un isolateur peut parfois s'allonger jusqu'à créer le contournement.

La couche conductrice (L-X) de la formule I.5 caractérise la ligne de fuite et les courants de fuite peuvent varier de 5 mA à 1A.

La détermination de la tension de contournement dépend de l'équation I.1 et du domaine de variation de X qui doit appartenir à l'intervalle (X<sub>0</sub>, L), X<sub>0</sub> étant la longueur initiale de l'amorçage de la décharge. La plus petite valeur qui permet de remplir cette condition sera choisie comme tension de contournement.

Quoique qu'il en soit, la description de principe met en évidence les divers processus qu'il en soit, la description qu'il y a lieu de considérer pour parvenir à une modélisation complète de l'isolateur.

En ce qui concerne l'approche théorique, de nombreux auteurs ont examiné le phénomène de contournement selon différents critères, mais dans notre thèse on a retenu le système d'Obenaus.

Suivant les schémas de la figure 1 (a et b) et d'après les équations I.5 et I.6, on retiendra que la chute de tension totale U est indépendante du courant I qui traverse la décharge. Elle ne dépend que de des conditions que l'on désire représenter (formes des électrodes, et nature de l'électrolyte ...).

La décharge est caractérisée par l'équation I.4 dont la forme générale est :

$$E_a = U_{\text{arc}} / x = A I^n \quad \text{VI.1}$$

Où A et n sont des constantes liées aux conditions particulières de l'isolateur.

L'analyse de l'équation totale I.5 nous permet de voir qu'il y a trois variables (tension d'alimentation U, courant de fuite I, et longueur de la décharge x).

Le courant I<sub>m</sub> correspondant à cette tension limite U<sub>m</sub> de la figure I.10 montre qu'il existe deux points de fonctionnement possibles.

Pour l'électrotechnicien pour toute tension supérieure à U on a contournement. Pour le physicien il faut analyser la stabilité de la décharge, ce phénomène n'est pas encore éclairci.

### **VI-3. Mécanismes de contournement artificiels et naturels :**

La tension de contournement pour différents types d'isolateurs pour les diverses méthodes aux laboratoires doit en principe fournir un classement par ordre de mérite identique à celui observé sous pollution naturelle.

Or, il n'est pas toujours ainsi et des inversions modifiant cet ordre de mérite peuvent être constatées.

Devant l'impossibilité d'établir une équivalence a priori des différents paramètres mais les résultats ne confirment cette relation (47).

Ainsi on est conduit à une équivalence à posteriori. Autrement dit, deux méthodes seront dites équivalentes si elles conduisent sur la même isolation à des tensions de contournement égales.

Compte tenu des dispersions, l'équivalence obtenue ainsi est représenté dans le tableau VI- 1.

La confrontation de ces données permet en principe de dimensionner les isolateurs quel que soit le niveau de tension.

Elle conduit à proposer une longueur de fuite par site. Enfin, comme la tension nominale des réseaux est une tension entre phases, on rapporte la ligne de fuite spécifique à la tension phase - phase.

Le tableau VI.2 donne la valeur de cette ligne de fuite spécifique ainsi que les longueurs de fuite qui en découlent pour différents réseaux et différentes classes d'isolation.

### **VI-4. Influence des surtensions sur le contournement :**

Le transitoire à la mise sous tension d'une ligne est ressenti plus ou moins fortement à tous les points du réseau. On constate en pratique que l'endroit le plus sollicité est l'extrémité de la ligne manoeuvré; ceci est de doublement de tension à la réflexion auquel s'ajoute une augmentation de la tension à la fréquence industrielle appelée "effet Ferranti".

L'effet Ferranti se résume à l'apparition d'une surtension lorsque une ligne électrique est alimentée et sans charge de l'autre extrémité.

D'après l'analyse de ce phénomène au chapitre II et de l'équation caractéristique :

$$V = V_0(1 + 5,5 \cdot 10^{-7} L^2) \quad \text{VI.2}$$

On a trouvé les courbes pour différentes tensions et différentes longueurs, ou la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

Ce phénomène peut sembler paradoxal : les lignes électriques sont habituellement connues pour leur "chute de tension" lorsqu'elles sont parcourues par un courant, mais le phénomène est inversé : l'extrémité ouverte de la ligne est à un potentiel plus élevé que celle connectée au réseau .

Niveau De pollution		Environnement	Pollution artificielle : sévérité équivalente		
			Brouillard Salin Salinité g/1	Couche solide Densité de NaCl Equivalente mg/cm <sup>2</sup>	Couche liquide Conductivité µS
<b>I</b>	<b>Léger</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Zones sans industrie et avec faible densité de maison équipées d'installations de chauffage.</li> <li>❖ Zones avec une faible densité d'industries ou de maisons, mais soumises à des vents ou des pluies fréquentes.</li> <li>❖ Toutes les régions agricoles.</li> <li>❖ Toutes ces zones doivent être situées loin de la mer (10 à 20 Km) ou à haute altitude et ne doivent en aucun cas être exposées aux vents venant de la mer</li> </ul>	<b>&lt; 7</b>	<b>0,05 à 0,1</b>	<b>5 à 10</b>
<b>II</b>	<b>Moyen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Zones avec des industries ne produisant pas de fumée particulièrement polluante, ou avec une densité moyenne de maisons équipées de chauffage.</li> <li>❖ Zones avec forte densité de maison ou d'industries, mais soumises à des vents fréquents et propres, ou à des pluies.</li> <li>❖ Zones exposées au vents de la mer, mais pas trop proches de la cote (distantes d'au moins 1 Km).</li> </ul>	<b>7 à 20</b>	<b>0,1 à 0,2</b>	<b>10 à 15</b>
<b>III</b>	<b>Fort</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Zones à forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'appareils de chauffage polluants.</li> <li>❖ Zones proches de la mer, ou en tout cas exposés à un vent relativement fort venant de la mer</li> </ul>	<b>20 à 80</b>	<b>0,2 à 0,6</b>	<b>15 à 30</b>
<b>IV</b>	<b>Très fort</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais.</li> <li>❖ Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées à des vents forts et très polluants venant de la mer.</li> </ul>	<b>112 à 225</b>	<b>0,6 à 1,1</b>	<b>30 à 50</b>

**Tableau VI-1: Equivalence entre pollution naturelle et méthodes de pollution artificielle.**

Classe de pollution	Tension de contournement kV/cm	Tension simple tenue kV/cm	Ligne de fuite spécifique cm/kV (ph - ph)	Tension nominale du réseau (phase - phase)			
				63kV	90kV	225kV	400kV
				Tension la plus élevée (phase – phase)			
				73kV	100kV	245kV	420kV
<b>I</b> (0-7 g/I)	<b>0,392</b>	<b>0,36</b>	<b>1,6</b>	<b>117</b>	<b>160</b>	<b>392</b>	<b>672</b>
<b>II</b> (7-20 g/I)	<b>0,316</b>	<b>0,29</b>	<b>2,0</b>	<b>146</b>	<b>200</b>	<b>490</b>	<b>840</b>
<b>III</b> (20-80 g/I)	<b>0,25</b>	<b>0,23</b>	<b>2,5</b>	<b>183</b>	<b>250</b>	<b>613</b>	<b>1050</b>

**Tableau VI-2 :Longueurs des lignes de fuite des chaînes d'isolateurs, en centimètres.**

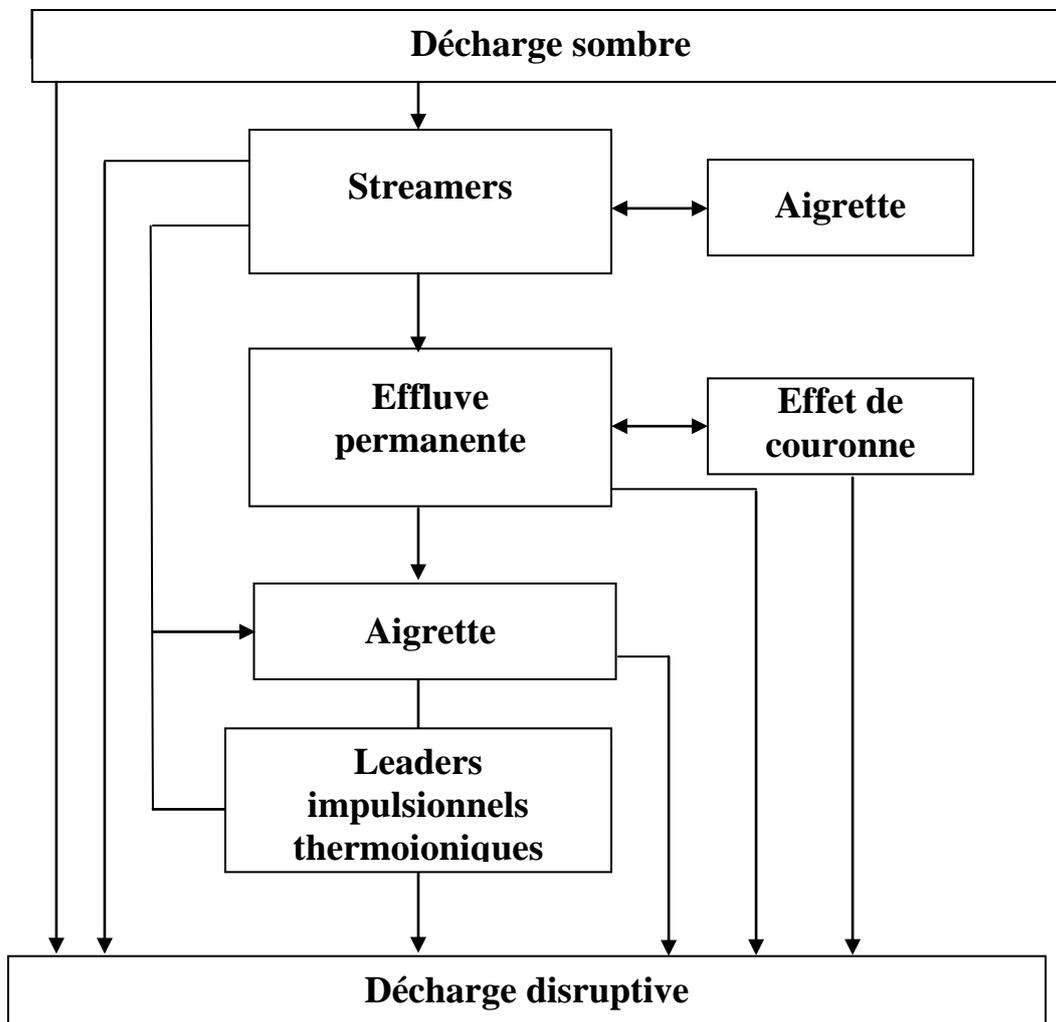
Les résultats de la simulation (figures II-4a,II-4b, II-4c) et ceux du programme informatique pour des lignes de différentes tensions confirment cette surtension.

Ce phénomène est potentiellement destructeur pour les équipements du réseau. On utilise des réactances shunt pour s'en prémunir.

Les surtensions de manoeuvre sont aussi dangereuses et sont souvent la conséquence de la destruction des équipements électriques entraînant des coupures d'énergie électrique.

Mais les surtensions externes ou surtensions atmosphériques sont plus dangereuse.

Généralement ces surtensions sont dues à la foudre. Les coups de foudre ont caractérisé par l'amplitude et la forme des impulsions (décharges positives et décharges négatives). Les décharges négatives ont un front d'onde plus raide (10-20µs) que celle positives (20-50µs) ce qui les rend plus dangereuses, la représentation schématique des phénomènes précédant la décharge disruptive est résumée sur le schéma suivant :



**Figure VI-1 : Représentation schématique des phénomènes précédant la décharge.**

#### **VI-4-1. Dispositions normatives et coordination de l'isolement :**

Depuis de nombreuses années la commission d'électrotechnique internationale a abordé le problème de la coordination de l'isolement en haute tension.

Deux documents généraux (en annexe) traitent de la coordination de l'isolation :

- La CEI 947-1 pour le domaine de la basse tension.
- La CEI 71 pour le domaine de la haute tension.

L'objectif principal de cette norme s'explique par la décomposition des différents coefficients qui permettent de parvenir aux tensions de tenue. Une telle démarche favorise la recherche d'une optimisation, voire une baisse des niveaux de tenue en tension.

La CEI 71 propose une modélisation conventionnelle des contraintes réelles des formes d'ondes réalisables en laboratoire et ayant démontré une équivalence satisfaisante.

#### **VI-4-2. Dispositions complémentaires à la coordination de l'isolement :**

Pour assurer la continuité de service des lignes de transport il est nécessaire d'assurer un bon isolement en utilisant les opérations suivantes :

- Bien définir le niveau d'isolement (en fonction des différentes contraintes électriques).
- Tenir compte des contraintes mécaniques.
- Utiliser des isolateurs antipollution pour les zones où le taux de pollution est élevé.
- Procéder à des lavages périodiques là où la pollution est sévère.
- Installer des fils de gardes pour les lignes de transport et des parafoudres pour les postes là où le niveau isokéraunique est élevé, et tenir compte de la norme CEI 71 en annexe.

D'autre part, deux préoccupations sont nouvelles dans cette norme :

- L'isolement longitudinal (entre les bornes de la même phase d'un appareil ouvert)
- La prise en compte de l'altitude ainsi que du phénomène de vieillissement des installations.

C'est ainsi que cette norme est distinguée par l'isolation interne et l'isolation externe :

- L'isolation interne intéresse tout ce qui ne se situe pas dans l'air atmosphérique (isolation liquide pour les transformateurs, SF<sub>6</sub> ou vide pour les disjoncteurs par exemple).
- L'isolation externe correspond aux distances dans l'air.

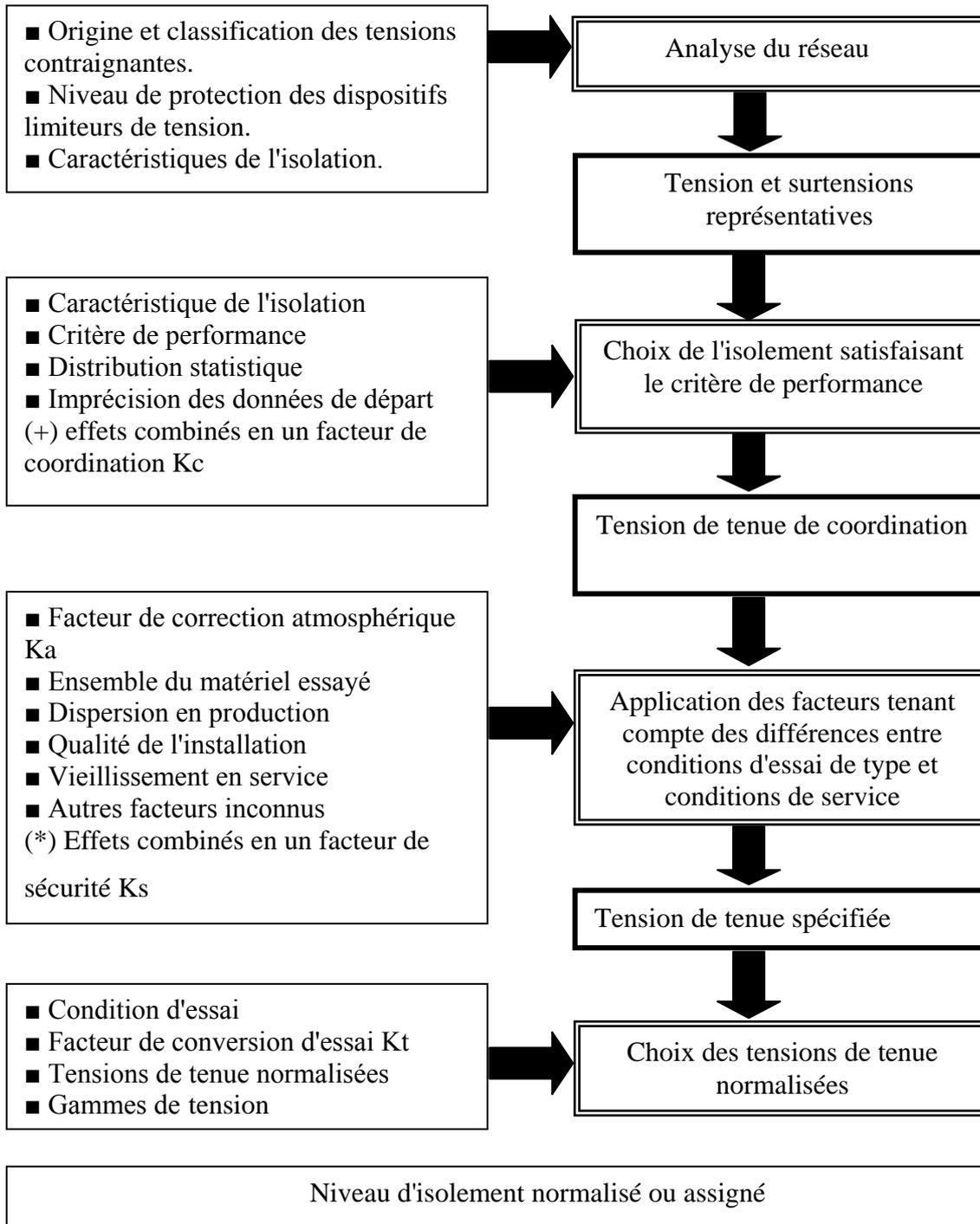
Ainsi on a deux gammes de tensions (de 1kV à 245 kV et au dessus de 245kV).

Pour chacune d'elles, la mise en oeuvre de la coordination est légèrement différente.

A chaque gamme est associé un tableau de tensions de tenue assignées normalisées. Ces tableaux VI-1 et VI-2 ont été établis suivant des critères différents, jusqu'à présent souvent empiriques mais dont le choix a été confirmé, parfois avec quelques réserves.

En effet, il est indéniable que les niveaux imposés, sans grandes modifications depuis des années, sont tout à fait acceptables au point de vue sécurité de service. De plus, l'abandon progressif des éclateurs au profit des parafoudres permet de réduire la marge de sécurité devenue surabondante entre le niveau de protection des parafoudres et la tension d'isolement spécifiée des matériels.

La détermination du niveau d'isolement n'indique pas précisément des tensions de tenue invariables et valables dans tous les cas mais elle permet la réalisation des études de coordination de l'isolement en plusieurs étapes comme représenté sur l'organigramme suivant.



**Figure VI-2 : Organigramme de détermination des niveaux d'isolement assignés ou normalisés.**

- Données à prendre en compte.
- ==== Actions à effectuer.
- Résultats obtenus.

### VI-4-3. Atténuation des surtensions :

L'atténuation des surtensions est un effet positif sur le contournement de l'isolateur et de l'isolation en générale.

Sous l'influence de l'intense effet de couronne qui accompagne les surtensions atmosphériques lorsqu'elles se propagent le long des conducteurs des lignes, ces surtensions subissent une déformation en même temps une réduction d'amplitude. Ce phénomène de surtension, qui se superpose à la distorsion par l'effet pelliculaire, est du à la dissipation d'énergie par injection de charges d'espace autour des conducteurs.

Ceci est possible lorsque la tension appliquée du réseau est supérieure à la tension critique, cette dernière tient compte de l'environnement et des caractéristiques géométriques (formule IV.20).

Selon le principe de la méthode des échantillons au laboratoire, on remarque suivant l'étude du cycle (q,u) qu'on a deux types de couronne l'une géométrique et l'autre dynamique, et la charge totale autour du conducteur sera :

$$q = q_{\text{géom}} + q_{\text{esp}} = C_{\text{géom}} \cdot u + q_{\text{esp}} \quad \text{VI.3}$$

D'autre part, on sait que les cycles (q,u) dépendent uniquement de l'amplitude de la tension et de la géométrie de la ligne. Sachant que l'énergie dissipée par l'effet couronne est représentée par l'aire de ces cycles, il s'ensuit que plus ces cycles sont gonflés et plus les pertes couronne sont importantes. Ce qui équivaut à une plus grande résistance couronne et à un amortissement plus important des surtensions.

Cette interprétation du mécanisme de distorsion conduit à modéliser une ligne, en adjoignant à la capacité géométrique une capacité variable.

Les résultats de la modélisation sont significatifs .Les ondes de surtension atmosphérique se déforment et s'atténuent très vite au cours de leur propagation le long d'une ligne de transport. Cette connaissance supplémentaire nous aidera à dimensionner l'isolement du réseau et la mise en place des moyens de protection.

### **VI-5. Conclusion :**

La coordination de l'isolement a pour rôle de déterminer les caractéristiques d'isolement nécessaires et suffisantes de divers constituants des réseaux en vue d'obtenir une tenue homogène aux tensions normales, ainsi que aux surtensions de diverses origines. Le but final est de permettre une distribution sûre et optimisée de l'énergie électrique.

Pour optimiser il faut chercher le meilleur rapport économique entre les différents paramètres dépendant de cette coordination (isolation, protection, défaillance subie).

S'affranchir des effets néfastes des surtensions suppose une première démarche de s'attaquer aux phénomènes générateurs, tâche qui n'est pas toujours simple. En effet si, à l'aide des techniques appropriées, les surtensions de manoeuvre de l'appareillage peuvent être limitées, il est impossible d'agir sur la foudre. Il est donc nécessaire de localiser le point de plus faible tenue par lequel s'écoulera le courant engendré par la surtension, et de doter tous les autres éléments du réseau d'un niveau de tenue diélectrique supérieur.

## CONCLUSION GENERALE :

L'analyse des différents problèmes qui influent sur le contournement des isolateurs permet d'éviter les courts circuits et d'assurer une bonne continuité de service du réseau électrique.

L'étude des formulations mathématiques obtenues à partir des expériences concernant la tension de contournement et surtout grâce au modèle d'Obenaus, nous a permis de trouver l'équation générale qui caractérise la tension de contournement (I-20).

Cet équation lie trois variables : la tension d'alimentation  $U$ , le courant  $I$  et la longueur de l'arc. Elle décrit le fonctionnement statique de la décharge et a pour conséquence immédiate que pour l'arc, il existe une tension limite au dessous de laquelle le courant ne peut plus circuler dans le circuit (figure I-8).

Le courant  $I_m$  correspondant à cette tension  $U_m$  s'obtient par la dérivation de  $U$  par rapport à  $I$  dans l'équation (I-20).

L'analyse des résultats obtenus nous permet de conclure que la tension de contournement dépend de la longueur de fuite " $l$ " et de la résistance de pollution " $r$ " et de la fonction de décharge.

Nous avons vu que la longueur de fuite est un important paramètre de la tenue des isolateurs sous pollution. Pour augmenter les performances d'un isolateur, on pourrait donc être tenter d'augmenter la ligne de fuite.

Ce raisonnement n'est pas fondamentalement faux mais des restrictions doivent être apportées, l'utilisation des isolateurs comportant de nombreuses nervures de profil dit "anti-pollution" permet de réduire l'effet du contournement. Le tableau VI-2 nous donne une idée sur les longueurs de fuite en fonction de la pollution et du niveau de tension.

Lorsque les conditions locales augmentent, par exemple dans le cas le cas de l'extension des zones industrielles ou urbaines, l'isolement déjà en place d'un poste ou d'une ligne peut devenir insuffisant.

Le remplacement des isolateurs est une opération très onéreuse pour être envisagée. On a alors recours aux techniques de lavage et de graissage, cette dernière technique étant particulièrement réservée aux isolateurs de poste.

Les surtensions sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale. Ces perturbations peuvent conduire à des interruptions plus ou moins longues des réseaux électriques et peuvent même endommagées leur isolation.

Dans notre travail après énuméré les différentes surtensions internes et externes, on étudié l'effet Ferranti, celui ci désigne l'apparition d'une surtension lorsque une ligne est alimentée à vide. Ce phénomène peut sembler paradoxal, les lignes électriques sont habituellement connues par leur chute de tension lorsqu'elles sont parcourues par un courant mais lorsqu'elles ne sont pas parcourues le phénomène est inversé. L'extrémité ouverte de la ligne est à un potentiel plus élevé que celle connecté au réseau. La figure II-2 relative à la formule II-6 décrit bien ce phénomène.

Les différentes simulations effectuées pour différentes tensions et différentes distances grâce au Matlab 6.5 ont bien confirmée cette surtension. Plus la ligne est longue plus la surtension est importante.

C'est ainsi qu'on doit demander aux opérateurs des dispatchings de tenir compte de cette contrainte pour éviter la destruction de l'isolement et assurer la continuité de service du réseau. Les surtensions externes ou surtensions atmosphériques sont très dangereuses pour les réseaux électriques. Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et les surintensités d'origine atmosphériques. Une particularité des coups de foudre est leur polarisation, ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif).

Environ 10 % sont de polarité inverse, mais ceux sont les plus violents. A noter que le front de montée des chocs de foudre retenu par les normes est de  $1,2\mu s$  pour les tensions et de  $8\mu s$  pour le courant. Une distinction est souvent établie entre coup de foudre direct et indirect, celui qui touche directement la ligne et celui qui tombe à proximité.

L'étude de ces conditions permet de déterminer le niveau d'isolement de surtension qui pourra solliciter le matériel durant son utilisation. Le choix du niveau d'isolement adapté permettra de s'assurer que, vis à vis de la fréquence industrielle et des chocs de manoeuvre au moins, ce niveau d'isolement ne sera jamais dépassé. Vis à vis du choc de foudre, un compromis doit généralement être fait entre le niveau d'isolement et le niveau de protection (fils de garde, éclateurs, parafoudres).

Le projet du tracé d'une électrique de haute tension doit tenir compte du niveau kéraunique. Le niveau moyen est de 20 avec une fourchette allant de 10 en régions côtières jusqu'à 30 dans les régions montagneuses. En fonction de ce niveau kéraunique, on doit prévoir les protections nécessaires.

Les surtensions transitoires ont une grande importance dans la coordination des isolements et le choix du type de protection et du lieu de leur emplacement, ainsi toute atténuation doit être adéquatement évaluée.

L'effet couronne qui peut accompagner les surtensions transitoires lorsqu'elles se propagent le long des lignes a un effet bénéfique en un sens puisque il réduit les contraintes d'isolement des matériaux par rapport aux valeurs habituellement calculées et utilisées.

Les travaux présentés au chapitre V montrent qu'une onde de surtension atmosphérique se déforme très vite (graphe V-6) au cours de sa propagation le long d'une ligne .L'analyse des travaux de laboratoires relatifs au cycle de charge (figure V-4) et ceux de la simulation confirme cette atténuation.

L'étude de distorsion et d'atténuation de la propagation due à l'effet couronne sont une connaissance considérable pour l'amélioration des contraintes électriques affectant les ouvrages de haute tension et par suite une meilleure mise en oeuvre d'un plan de coordination d'isolement et de protection.

# BIBLIOGRAPHIE

## **BIBLIOGRAPHIE:**

- [1]. IEEE "Bibliography on high voltage insulator contamination"  
Publication 77 B1 0100-8-PWR Meeting, Mexico Juin/77
- [2]. RIZK . F.A.M "Mathematical models for pollution flashover",  
Electra, 1981, 78 pp 71-103.
- [3]. OBENAUS F."Fremdschichtueberschlag und Kriechweglaenge"  
Electrotechnik (Germany) 1958, H4 pp 1260-1266.
- [4]. ALSTON , LL and ZOLEDZIOWSKI." Growth of discharges on polluted insulation"  
Proc.IEE, 1963 110 (7) pp 1260-1266
- [5]. WILKINS. "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-  
pollution films" Proc.IEE 1969,116(3) pp 457-465
- [6]. S.GOPAL, M.E and Prof.Y.N.RAO."Flashover phenomena of polluted insulators"  
IEE Proceedings Vol.131,Pt, C n°4 July 1984.
- [7]. JOLY, D.C, CHU "Surface electrical breakdown of tin oxide coated glass"  
J .Appl .Phys 1975, 60 pp.6196-6199.
- [8]. CLAVERIE, P. and PORCHERON,Y. How to choose insulators for polluted areas.  
IEEE Trans., 1973 PAS-98 pp 1121-1131.
- [9]. RAHAL, A.M. and HURAUX,C." Flashover mechanism of high voltage insulators"  
IEEE Trans. 1979 PAS 98, pp.2223-2231.
- [10]. E.NASSER " Contamination Flashover of outdoor insulation" ETZ-A  
Bd 93 (1972) pp 321-325.
- [11]. B.F HAMPTON "Flashover mechanism of polluted insulation"  
Proc. I.E.E. vol.111 n°5 Mai 1964, p.985-990.
- [12]. F.W.PEEK " Phénomènes électriques dans la technique des hautes tension"  
Traduction de R. ACKERMANN, DELAGRAVE édit.1924.
- [13]. G.W.TRICHEL."The mechanism of négative Point-to-Plane Corona in air at  
Atmospheric Pressure", Physical Review,vol.55p.382, Feb.1939.
- [14]. R.WILKINS "Flashover voltage of high voltage insulators with uniform pollution  
films". Proc.I.E.E. vol.116, n°3 Mars 1969, p.457-465.
- [15]. D.C JOLLY " Contamination flashover, Part I : theoretical aspects"  
I.E.E.E. Trans.PAS 91, Déc.1972, p.2437-2442.
- [16]. E.NASSER ."Contamination flashover of out door insulation"  
ETZ - A Bd.93 (1972), p 321-323.

- [17]. R. WILKINS and A.A.J. AL-BAGHDADI " Arc propagation along an electrolyte surface". Proc. I.E.E., vol.118, n° 12, Déc 1971, p.1886-1892.
- [18]. A.M.RAHAL. "Mécanismes physiques du contournement des isolateurs de haute tension" Thèse de Docteur ès-sciences, Univ.P.Sabatier- Toulouse 1979.
- [19]. S. FLAZI. "Modélisation d'une décharge électrique sur une couche isolante polluée recouverte d'une couche conductrice - Application au contournement des isolateurs H.T.". Thèse de Docteur - Ingénieur Univ.P.Sabatier Toulouse 1980.
- [20]. B.F. HAMPTON " Flashover mechanism of polluted insulation" Proc.IEE , Vol .111 n°5 , Mai 1964.
- [21]. A.GREENWOOD "Electrical transients in power systems"J.WILEY and sons, Inc 1971.
- [22]. N.L.OVICK and G.L.KUSIC "Including corona effects for travelling waves on transmission lines". Vol. PAS-104, n°3, Mars.1985
- [23]. F.W.PEEK "Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering" New-York : Mc G.Hill Book Comp.1971.
- [24]. M.AGUET et M.IANAZ "Haute tension" Traité d'électricité Vol XXII Ed. Georgi 1981.
- [25]. C. GARY et M.MOREAU " L'effet couronne en tension alternative" Ed. Eyrolles 1976.
- [26]. ILLICETO .F , CINIERIC and VIA. A"Overvoltages due to open phase occurrence in reactor- compensated E.H.V.lines" IEEE Transac.On Power App.And Syst 103(3):474-82 1984
- [27]. A.INOUE "Propagation analysis of overvoltage surges with corona based upon charge versus voltage curve" IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-104, n°3 March 1985.
- [28]. M.M.SAIED, Y.A.SAFAR and M.H.SALAMA "Line transients with corona" J.Univ.Kuwait (Sci) 1987.
- [29]. B.HULZLER et GEORGES LE ROY et al. "Les propriétés diélectriques de l'air et les hautes tension" Ed. Eyrolles.1984.
- [30]. WAGNER et LLOYD "Effects of corona on travelling waves" Transactions on Power Apparatus and systems Vol.74, pp858 -872, Oct.1955.
- [31]. D.FULCHIRON. " Surtensions et coordination de l'isolement" CT Merlin Gérin n°151 édition Décembre 1992.
- [32]. BENOIT DE METZ- NOBLAT "La foudre et les installations électriques" CT Merlin Gérin n°168 édition juillet 1993.

- [33]. L.PARIS, A.TASCHINI. Résultats d'investigations récents sur les tensions de manoeuvre dans les réseaux à T.H.T Electra, n° 4 (03.1978).
- [34]. R.GERT, H.GLAVITSCH, N.N.TIKHODEYEV, S.S.CHOUR, B.THOREN.  
Surtensions temporaires, leur classification, grandeur, durée , forme d'onde et fréquence  
Rapport CIGRE33-12, session 1972.
- [35]. C.BARBIER. Etudes des surtensions dynamiques sur le réseau à 400kV. Notes Etudes et Recherches E.D.FH.R9934/4 du 21.12.81.
- [36]. PHILIPPE. FERRACI. " La ferrorésonance". CT. Merlin Gérin n° 190 édition oct 1997.
- [37]. C.DUBANTAN et G. GERVAIS. "Surtensions de manoeuvre à la fermeture des lignes à vide. Influence de la puissance et de la configuration du réseau". Rapport CIGRE 33-O5 5 (1972).
- [38]. K. BERGER, R.B. ANDERSON, H. KRONINGER."Paramètres des coups de foudre"  
Electra, n° 41, 1975, p.23-27.
- [39]. K.BERGER."Methoden und Resultate der Blitzforschung aufdem Monte Salvatore bei Lugano in den Jaheren 1963-1971. Bull.SEV, 63, 1972, p.1403-1422.
- [40]. A.J.ERIKSON. "Surtensions des foudre sur les lignes de transport à haute tension".  
Recherche sur les caractéristiques de forme d'onde. Electra n°47, 1976, p.87-110.
- [41]. L. FACY. " Orages, in Encyclopedia Universalis. Vol. 12, Paris , 1972, p.150-152.
- [42]. R.FIEUX, P.PORTAL. "La Station Expérimentale de Saint- Privat-d'Allier". Résultats généraux, caractéristiques des coups de foudre déclenchés. Bulletin de la Direction des Etudes et des Recherches, Série B, n° 4, 1979.
- [43]. G.LE ROY, C. GARY, B. HULZER, J. LALOT, C.DUBANTON. "Les propriétés diélectriques de l'air". Editions Eyrolles n° 51; 1984.
- [44]. A.MAUDUIT " Installations électriques à haute et basse tension".  
Editions Dunod Paris 1964.
- [45]. A.ROUSSEAU."Dimensionnement des parafoudres MT pour le réseau (EDF).1988.
- [46]. D.DUMORA, R.PARRAUD "Solutions apportées aux problèmes par différents isolateurs en verre trempé et isolateurs en composite" Sediver, journée technique, Alger 20 Fev 2000.
- [47]. E.M.BAZELIAN, T.G.VALAMAT-ZADE, A.V.SHKILEV. "A long spark in the precence of reduced air density.Izvestiya Akadzmii Nauk SSSR.Energeticka i .Transport, Vol.13, n°6. p. 149-154 .1975.
- [48]. R.PELISSIER, " L'effet couronne sur les lignes aériennes", Techniques de l'ingénieur tome 1, indice D-160,1951.

- [49]. A.M.RAHAL. "Mécanismes physiques du contournement des isolateurs HT".Thèse de docteur es - sciences physiques. Université Paul Sabatier Toulouse 1979.
- [50]. H.MATSUO T. YMASHITA and W.D.SHI, "Electrical contact between a local discharge on an electrolyte solution and the solution surface", IEEE Trans. On Dielectric and Elect.Insul. Vol.7, pp 360-365, 2000.
- [51]. S. FLAZI "Etude du contournement électriques des isolateurs de haute tension pollués critère d'élongation de la décharge et dynamique du phénomène". Thèse de docteur d'état es - sciences. Université Paul Sabatier, Toulouse 1987.
- [52]. A.BOUDJELLA, H.HADI, S FLAZI, M. YUMOTO, T.SAKAI, THOSOKAWA. "Dynamic aspect of the discharge on its propagation to flashover". ELECO 99, Turkey.
- [53]. S. FLAZI H.HADI KL RABAH M HAMOUDA A.BOUDJELLA. "Dynamic aspect of the direct current flashover on rectangular and new disk models". IEEE, CEIDP 2001, Kitchener, On, Canada, Oct. 14-17, 2001.
- [54]. S. FLAZI, M. HAMOUDA "Influence of the electric field to the neighborhood of the discharge on its propagation to flashover" ELECO 99, Turkey.
- [55]. A.BOUDJELLA "Etude de l'évolution d'une décharge vers le contournement d'un isolateur HT simulé par un modèle à plusieurs films de pollution". Thèse de magister.Université USTO. Oran, 1986.
- [56]. FLAZI " Etude critique des critères du contournement " CNHT 2002 Ghardaia, 16-17 Janvier 2002.
- [57]. N.BOUKHENOUBA S. FLAZI M.HAMOUDA H. BENAMAR "Critical Conditions of flashover on a disk model" CNHT 03 décembre 2003. USTO.Oran.
- [58]. MZEN ABDEL - SALAM E.KEITH STANEK "Field optimization of high - voltage insulators" IEEE, Transactions on industry applications Vol .IA 22 n°4 July/ August 1986.
- [59]. M .EI-A .SLAMA S.FLAZI et H.HADI."Etude de l'influence de la non conformité de la pollution sur le dimensionnements des isolateurs des lignes aériennes THT 4ème conférence nationale de la haute tension, Ghardaia, 16-17 Janvier 2002. Algérie.
- [60]. K.NAITO."Insulators pollution.Part 1: general aspects". Séminaire sur lapollution des isolements des lignes et des postes HT. Casablanca, mars 1989, Maroc.
- [61]. M.A.B. EL-KOSHAIRY et F.A.M. RIZK: "Comportement des isolateursdes lignes de transport de à THT dans les conditions de pollution désertique". Cigré, Gr 33-05, 1978.
- [62]. M.EI-A. SLAMA, S. FLAZI H. HADI et A. EULMI. "Etude de l'influence de la position initiale de la décharge sur la tension de contournement", CEE02, Batna, 10-11 Déc 2002.
- [63]. JEAN CLAUDE LABADIE. "Etude de la validité du modèle électrique de contournement des isolateurs pollués", Thèse de spécialité, UPS-Toulouse, 1977.

- [64]. G .PEYREGNE. "Etude en régime dynamique du contournement par décharges rendues faiblement conductrices". Thèse de Docteur ingénieur à UPS- Toulouse, 1981.
- [65]. M.A SALAM, H .AHMAD, T.TAMSIR. "Calculation of time to contaminated insulator by dimensional analysis technique". Journal of computers and electrical engineering, vol 27, pp.419-427, 2001.
- [66]. C.GARY . "Les principes physiques guidant la protection des batiments contre la foudre". Revue générale él, tome 89, n°5, mai 1980, pp.351-367.
- [67]. M.AGUET, PH. BLECH, M.IANOVICI. "Coordination probabilistique de l'isolement des réseaux à haute tension, Bull.ASE- UCS, tome 68, n°24, 1977, PP.1297-1303.
- [68]. J.P. BOUPBA. "Analyses des causes de distortion de l'onde dans une installation d'essai à haute tension, à fréquence industrielle, et moyens d'y remédier, Bull.ASE-UCS, tome 61, n°21, 1970, pp 1018-1026.
- [69]. H.PRINZ ."Les merveilleuses et étonnantes expériences avec l'étincelle électrique, Bull.ASE-UCS, tome 63, n°1, 1972, pp1-13.
- [70]. P.BLASUIS, K.H.SCHNEIDER, O.VOGEL, K.H.WECK. "Génération d'ondes de choc du type foudre dans les circuits d'essais à ultra haute tension , Electra CIGRE, n°27, Paris, mars 1973, pp.35-64.
- [71]. GROUPE IRR-IMS (1). Considérations théoriques concernant les tension induites dans les circuits de mesure haute tension, Electra, CIGRE, n°35, juillet 1974, pp.245-248.
- [72]. P.GRIVET ."Physiques des lignes à haute fréquence et ultra haute fréquence, tome1 Masson, Paris, 1969.
- [73]. GROUPE IRR- IMS (1),"Considérations théoriques concernant les tensions induites dans les circuits de mesure à haute tension", Electra, CIGRE, n°35 juillet 1974, pp 245-248.
- [74]. J.J.MORF, "Méthodes de calcul des circuits électriques", Polycopié EPFL, Lausanne, 1969, pp.41-44.
- [75]. A.LIETTI, Radiofrequency High Voltage Test Equipment with very large Power Supply, Proc. Int. Symp.on HIGH Voltage Techn., Zurich , Sept 1975, pp.151-154.
- [76]. MICHEL AGUET, MIRCEA IANOVICI, "Traité d'Electricité Haute Tension" Tome XXII, ISBN, Edition Georgi 1982 CH -1015, Lausanne.
- [77]. MICHEL AGUET, JEAN - JACQUES MORF. "Traité d'Electricité Energie Electrique". Tome XII Edition Georgi 1981 CH -1015, Lausanne.
- [78]. ROBERT FOURNIE ." Les isolants en électrotechniques concepts et théories" Editions Eyrolles Paris , 1986.

- [79]. J. POUGET. " Réseaux électriques " Ecole Supérieure d'Electricité, Editeurs Masson Paris, ISBN : 2-225 65230-9, 1979.
- [80]. THEODORE WILDI. " Electrotechnique générale" Imprimé au Canada 1978.  
ISBN 0-7746-6849-0 distribué par Eyrolles Paris.
- [81]. P.DEJUSSIÉU - PONCARRAL." Encyclopédie d'Electricité Larousse" Tome I et II.  
Librairie Larousse, Paris 1969.
- [82]. R. ABDESSEMED, M.S AGGOUNE, F.Z KADID "Electrostatique" Presses de l'Université de Batna 1997.
- [83]. JACQUES CLADE."Electrotechnique", Collection EDF N°71, Editions Eyrolles, Paris 1989.
- [84]. HEINY, NAUDY. "Techniques de l'appareillage et se applications" Editions Foucher n° 3085-473, Paris 1973.
- [85]. P. HEINY, A.CAPLIEZ. "Matériaux et équipements électriques" Editions Foucher Tome 1, Paris 1973.
- [86]. A.BLAJKINE ET COLL."Electrotechnique générale", Editions MIR. Moscou Traduction Française par V.GRANOVSKI et V. KOLIMEEV 1977.
- [87]. A.KUFFEL ET COLL. "High voltage engineering fundamentals" Oxford 1986.
- [88]. A.GOLDAMN ET COLL. "Gaseous Dielectrics IV" L.G .Chritophorou and M.O.Pace, Edition Pergman, New- York, pp.306-310, 1984.
- [89].Y.ZEBBOUDJ G.HARTMANN ."Current and electric field measurement in coaxial system during the positive DC corona in humid air". Laboratoire de Béjaia, Mai 1999.
- [90]. M. HOUABES. "Atténuation des surtensions transitoires dans les lignes de transport électrique par l'effet couronne" Conférence nationale sur la haute tension 1999.
- [91]. M.ADJABI. N.E DEBACHE .EB.AZZAG."Critères de contournement des isolateurs bicouche"Conférence nationale sur la haute tension 1999.
- [92]. A. TILMATINE M. BRAHIMI S. FLAZI. "Contribution à l'étude phénoménologique du contournement" Conférence nationale sur la haute tension 1999.
- [93]. A.AISSAOUI B.BELMADANI. "Modélisation d'une décharge luminescente radio fréquence" Conférence nationale sur la haute tension 1999.
- [94]. E.B AZZAG M.HOUABES H.LABAR H.KATEB AND K. CHAOUI.  
"Impact of Transient Over- Voltages on the Skirting of Electrical Transmission Line Insulators Corona Effects. "Asian Journal of Information Technology Dec, 2006.
- [95] M. RIOUAL. "Modélisation triphasée de l'effet couronne et in fluence sur l'amortissement des ondes". Rapport EDF- D.E.R publié dans IEEE en 1994.

- [96]. ESCLAUGON , HULZER. "Effet de l'effet couronne dans le calcul des réseaux"  
Rapport EDF -DER Chamart. France 1983.
- [97]. J.F GUILLER. "Protections des postes contre les surtensions atmosphériques"  
Thèse de Doctorat de l'université de Paris 6. 1992.
- [98]. C.GARY, G DRAGAN TLUGU D MONNICA. "Charge- voltage carcteristic  
modeling of impulse corona discharge around transmission lines conductors"  
Rev .Roumanaise Scie.tech D .1992.
- [99]. B.HULTZER. "Simulation de la foudre au laboratoire". Bull, EDF série B n°3 1988.
- [100]. CHANG. "Protection des réseaux haute tension contre la foudre" Thèse Doctorat d'état  
de l'université de Paris 6. 1985.
- [101]. C.GARY. "Lignes et postes, choix et coordination de l'isolement". Extrait de la  
collection de l'ingénieur D 670 .1983.

# **Annexes:**

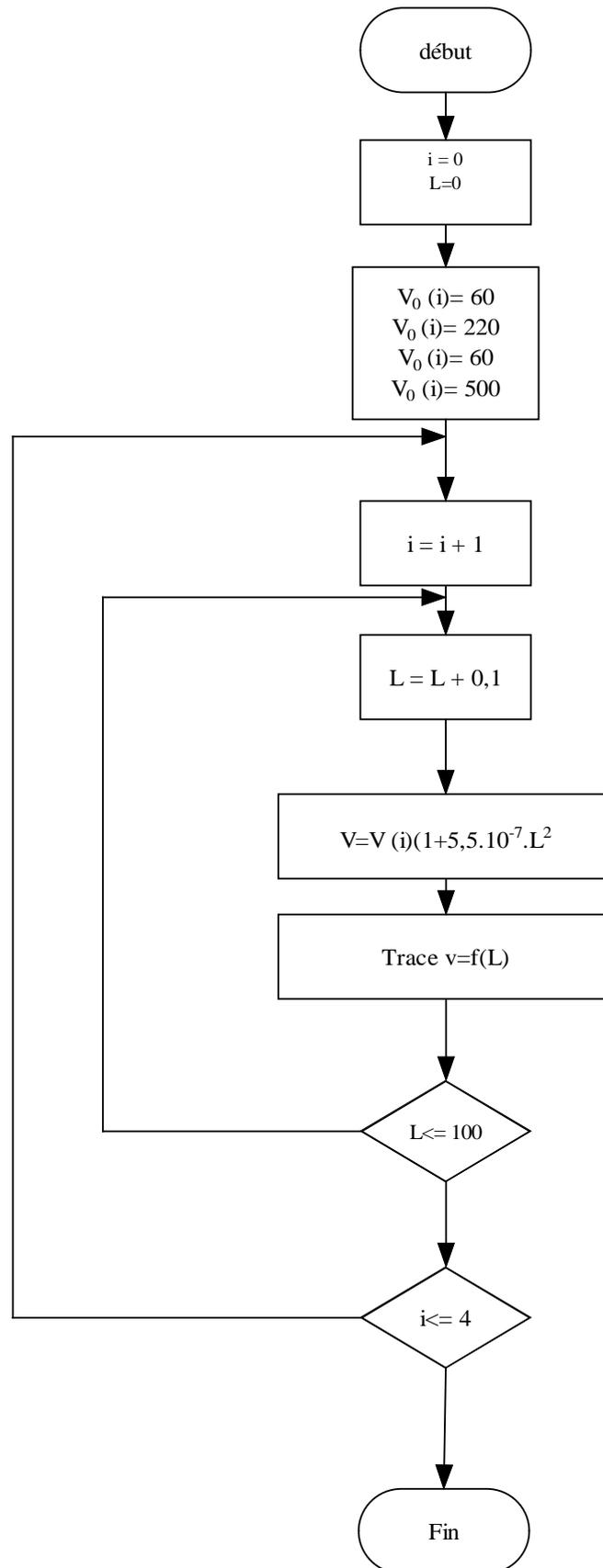


Figure 1 : Organigramme de calcul des surtensions du à l'effet Férranti.

Auteurs	A	n
Obenaus (3)		
Jolly (7)	100	0,7
Claverie P . (8)	80	0,62
Woodson, M.E. (11)	100	0,5
Zoledziowski (4)	200	0,8
Wilkins (5)		
Nasser (10)	63	0,78
King (13)		
Rahal , Huraux (9)	530	0,24
Hampton (11)	530	0,24

**Tableau 1 : Variation des paramètres A et n selon différents auteurs.**

surtension	durée	raideur du front de montée, ou fréquence	amortissement en fonction de la distance
atmosphérique	très courte ( $\mu$ s)	très élevée (1000 kV/ $\mu$ s)	fort
décharge électrostatique	très courte (ns)	élevée (= 10 MHz)	très fort
manceuvre	courte (ms)	moyenne (1 à 200 kHz)	moyen
à fréquence industrielle	longue (s) voire très longue (h)	fréquence du réseau	nul

**Tableau 2 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques.**

classe de surtension	basse fréquence		transitoire		
	permanente	temporaire	à front lent	à front rapide	à front très rapide
forme					
gamme des formes (fréquence, front de montée, durée)	f = 50 ou 60 Hz T <sub>1</sub> ≥ 3 600 s	10 < f < 500 Hz 3 600 ≥ T <sub>1</sub> ≥ 0,03 s	5000 > T <sub>p</sub> > 20 μs 20 ms ≥ T <sub>2</sub>	20 > T <sub>1</sub> > 0,1 μs 300 μs ≥ T <sub>2</sub>	100 > T <sub>1</sub> > 3 ns 0,3 > f <sub>1</sub> > 100 MHz 30 > f <sub>2</sub> > 300 kHz 3 ms ≥ T <sub>1</sub>
forme normalisée	f = 50 ou 60 Hz T <sub>1</sub> (*)	48 ≤ f ≤ 62 Hz T <sub>1</sub> = 60 s	T <sub>p</sub> = 250 μs T <sub>2</sub> = 2 500 μs	T <sub>1</sub> = 1,2 μs T <sub>2</sub> = 50 μs	(*)
essai de tenue normalisé	(*)	Essai à fréquence industrielle de courte durée	Essai de choc de manœuvre	Essai de choc de foudre	(*)

(\*) à spécifier par le Comité de produit concerné

**Tableau 3 : Formes des surtensions représentatives selon la norme CEI 71.**

catégorie de surtensions		I	II	III	IV
		pour des matériels raccordés aux circuits dans lesquels des mesures pour limiter les surtensions transitoires à un niveau faible approprié sont prises	pour des matériels consommateurs d'énergie, alimentés à partir de l'installation fixe	pour les matériels des installations fixes et dans le cas où la fiabilité et la disponibilité du matériel font l'objet de spécifications particulières	pour les matériels utilisés à l'origine de l'installation
degré de pollution	impératif de construction				
	tension assignée de tenue au choc (kV)	1,5	2,5	4	6
	tension d'essai 1,2/50 μs au niveau de la mer (kV)	1,8	2,9	4,9	7,4
1 = Pas de pollution ou seulement une pollution sèche non conductrice	distance minimale d'isolement dans l'air (mm)	0,5	1,5	3	5,5
2 = Présence normale d'une seule pollution non conductrice	distance minimale d'isolement dans l'air (mm)	0,5	1,5	3	5,5
3 = Présence d'une pollution conductrice ou d'une pollution sèche non conductrice qui devient conductrice par suite de condensation	distance minimale d'isolement dans l'air (mm)	0,8	1,5	3	5,5
4 = Conductivité persistante et élevée due à la pollution causée, par exemple, par de la poussière conductrice ou par de la neige ou de la pluie	distance minimale d'isolement dans l'air (mm)	1,6	1,6	3	5,5

**Tableau 4 : Tension de tenue de choc et distances d'isolement en BT selon la norme CEI 947-1**