

N° d'ordre : .....

N° de série : .....

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



## **Mémoire de Fin d'Études**

Présenté à

**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

Faculté de la Technologie

Département de Génie Électrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En Réseaux Électriques

Présenté par

**BEDJOUTI Ramzi**

**REGUIG Messaoud**

## **Thème**

**Contribution à l'étude de la coordination des  
isolements des postes de transformation haute  
tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO**

Soutenu le 16/09/2020. Devant le jury composé de :

Dr. MIDA Dris

Maitre de conférences

Président

Dr. KHECHEKHOUCHE Ali

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr. GUIA Talal

Maitre de conférences

Examineur

**Année Universitaire 2020/2021**

# *Dédicace*

À mes parents **Lakhdar** et **Fatiha** et à leurs familles.

À mes frères **Achraf**, **Ahmed**, **Elias** et à ma seule  
sœur **Noujoud**.

À tous mes amis sans exception notamment qui m'ont  
souhaité la réussite dans ma vie.

# *Dédicace*

À mes chers parents pour leur sacrifice, leur amour,  
leur patience et leur soutien, leurs encouragements et  
leurs prières qui ont été l'essence de mon succès.

À toute ma famille.

À tous ceux qui me sont chers.

# REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le tout-puissant **ALLAH** qui m'a donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à remercier le **Dr. Ali KHECHEKHOUCHE**, qui est l'initiateur de ce travail et qui, par sa disponibilité et ses innombrables conseils, nous a permis de mener à bien ce travail.

Je remercie aussi de manière générale tous les membres du jury qui nous avons ont fait l'honneur d'assister à notre soutenance et qui ont donné des remarques constructives dans chacun de leur domaine respectif.

Mes plus sincères remerciements vont à mes chers parents pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de mes études.

Je remercie tous mes amis, qui m'ont soutenu pendant ces cinq années.

Je remercie également toute ma famille pour son soutien tout au long de ces années d'études supérieures.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**BEDJOUTI Ramzi**

# REMERCIEMENTS

Je remercie **ALLAH**, le Tout-Puissant, qui m'a inspiré patience et constance, et m'a donné la force et la détermination de poursuivre mes études.

J'exprime mes sincères remerciements et ma grande gratitude à :

**Dr. Ali KHECHEKHOUCHE**, qui nous a honorés en acceptant la supervision du travail, et qui ne nous a pas épargné ses précieux conseils et encouragements scientifiques, malgré ses préoccupations et son temps précieux.

Je remercie également tous les membres du jury de discussion d'avoir accepté la discussion de ce travail.

**REGUIG Massoud**

## Résumé

Pour étudier les caractéristiques du parafoudre ZnO et de ses blocs. Des expériences sont menées pour trouver les caractéristiques thermiques des blocs de parafoudre. L'élévation de température des blocs parafoudre affecte les caractéristiques de fonctionnement du parafoudre. Cela aide à approfondir les études sur les performances des parafoudres.

La coordination des isolements est le processus de connaître les niveaux d'isolation des composants du système d'alimentation. En d'autres termes, il s'agit de déterminer la résistance d'isolement de l'équipement. L'isolation interne et externe de l'équipement électrique est exposée à une tension normale continue et à une tension anormale temporaire.

L'objectif du travail exposé dans cette thèse concerne la modélisation et l'étude des performances de protection des parafoudres à oxyde métallique (ZnO), Pour atteindre cet objectif, nous avons ensuite modélisé les éléments du système, puis nous avons étudié et proposé des modèles de parafoudre à oxyde métallique (ZnO).

**Mots-clés :** Caractéristiques ; modélisation ; performances ; l'équipement ; parafoudre ZnO ; coordination des isolements; protection.

## ملخص

لأجل دراسة خصائص مانع الصواعق (ZnO) والأجزاء التي يتكون منها. اقيمت تجارب للتعرف على الخصائص الحرارية لهذه الأجزاء. يؤثر ارتفاع درجة حرارة أجزاء مانع الصواعق على آلية عمله. هذا ما ساعد على التعمق في الدراسات حول أداء مانع الصواعق .

تنسيق العزل هو عملية لمعرفة مستويات العزل لمكونات نظام الطاقة. بمعنى آخر ، يتعلق الأمر بتحديد مقاومة العزل للمعدات. يتعرض العزل الداخلي والخارجي للمعدات الكهربائية للجهد المستمر العادي والجهد غير الطبيعي المؤقت.

يتعلق الهدف من العمل المعروف في هذه الأطروحة بنمذجة ودراسة أداء الحماية لدى مانع صواعق (ZnO) ، ولتحقيق هذا الهدف ، قمنا بعمل نموذج لعناصر النظام ، ثم قمنا بدراسة واقتراح بعض نماذج مانع صواعق (ZnO).

**الكلمات المفتاحية:** خصائص ؛ نمذجة ؛ أداء؛ معدات؛ مانع الصواعق ZnO ، تنسيق العزل ، الحماية.

FIGURES	TITRES	N
I.1	- Ondes typiques dans le canal de la foudre	6
I.2	- Oscillogramme d'un courant de foudre	7
I.3	- Distribution statistique expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE	7
I.4	- Distribution statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE	8
I.5	- Ordre de grandeur des surtensions électriques	9
I.6	- Coup de foudre sur le conducteur de phase	13
I.7	- Coup de foudre sur le câble de garde	13
I.8	- Schéma d'un éclateur	15
I.9	- Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs	16
I.10	- Parafoudre à oxyde de zinc ZnO	18
I.11	- Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO	20
I.12	- Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection	22
II.1	- Détermination exacte du niveau de protection et d'isolement	27
II.2	- Surtension de foudre	28
II.3	- Surtension de commutation	29
II.4	- Procédure de coordination des isolements	31
II.5	- Schéma général de coordination de l'isolation individuelle	33
II.6	- Schéma général de la coordination des isolements pour un poste	37
II.7	- Marge de protection et niveau de tenue d'isolement	38
II.8	- Exigence du nombre d'unités pour différentes tensions	39
III.1	- Modèle multi-étages du pylône	44
III.2	- Concaténation des conducteurs	44
III.3	- Photos réelle des pylônes utilisés	45
III.4	- Modèle de la résistance de terre	48
III.5	- Caractéristique non-linéaire de la prise de terre	48

## Liste des figures

---

III.6	- Photo réelle d'un jeu de barre 225 KV	50
III.7	- Modèle à résistance non-linéaire	51
III.8	- Modèle à inductance linéaire	51
III.9	- Modèle de W. Breilmann	52
III.10	- Modèle de Ozawa	53
III.11	- Modèle proposé par Hagiwara et al	53
III.12	- Modèle IEEE du parafoudre.	54

## Liste des tableaux

---

TABLEAUX	TITRES	N
I.1	- Classification des surtensions sur les réseaux électriques triphasés, formes normalisées de tensions d'essais	11
I.2	- Exemple de caractéristiques des parafoudres ZnO	21
II.1	- Le BIL pour différentes tensions de classe de référence (kV)	29
III.1	- Caractéristiques des conducteurs de la ligne	43
III.2	- Expressions pour les distances d'amorçage	56

### Acronymes

<b>MTBF</b>	Mean Time Between Failures
<b>BIL</b>	Basic Insulation Level
<b>MEG</b>	Modèle Electro-Géométrique
<b>CEI</b>	Comité Electrotechnique International
<b>SiC</b>	Carbure de Silicium
<b>ZnO</b>	Oxyde de Zinc
<b>CIGRE</b>	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
<b>BT</b>	Basse Tension
<b>MT</b>	Moyenne Tension
<b>HT</b>	Haute Tension
<b>THT</b>	Très Haute Tension
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IDMT</b>	Inverse Definite Minimum Time
<b>GIS</b>	Gas Insulated Substation
<b>SF6</b>	Sulfur Hexafluoride

*Symboles*

<b>m</b>	Mètre
<b>A</b>	Ampère
<b>V</b>	Volt
<b>F</b>	Farad
<b><math>\Omega</math></b>	Ohm
<b>K°</b>	Kelvin
<b>C°</b>	Degré Celsius
<b><math>\rho</math></b>	La résistivité de sol.
<b>s</b>	Seconde
<b>I</b>	Courant de foudre
<b><math>U_{cf}</math></b>	Tenue diélectrique de la ligne en choc de foudre
<b><math>Z_c</math></b>	Impédance caractéristique du conducteur
<b><math>R_0</math></b>	Résistance de terre à faible courant et faible fréquence
<b><math>R_t</math></b>	La résistance actuelle de la terre
<b><math>I_g</math></b>	La valeur seuil du courant suffisante pour commencer l'ionisation du sol
<b><math>E_0</math></b>	Champ d'ionisation du sol
<b>v</b>	La vitesse de l'arc de la chaîne d'isolateurs
<b>D</b>	Longueur totale de la chaîne d'isolateurs
<b>L</b>	La longueur de l'arc de la chaîne d'isolateurs
<b>t</b>	Temps à l'amorçage de la chaîne d'isolateurs
<b>U</b>	Tension appliquée aux bornes de la chaîne d'isolateurs
<b>C</b>	La capacité de l'arc à la terre
<b><math>t_c</math></b>	Temps de contournement
<b><math>t_i</math></b>	Temps avant le début du streamer
<b><math>t_s</math></b>	Temps de propagation du streamer
<b><math>t_l</math></b>	Temps de l'arc de contournement
<b><math>U_p, U_n</math></b>	Tensions aux bornes de la chaîne d'isolateurs
<b>S</b>	Commutateur
<b>A0, A1</b>	Eléments non linéaire du parafoudre
<b>p, q</b>	Constants propres de l'Eléments non linéaire du parafoudre
<b><math>V_{ref}</math></b>	Tension de référence du parafoudre
<b><math>R_i</math></b>	Résistances des tronçons de pylône
<b><math>L_i</math></b>	Inductances des tronçons de pylône

## Liste des Acronymes et Symboles

$V_t$	Vitesse de propagation de l'onde de courant dans le pylône
$H$	La hauteur totale du pylône
$h_i$	Hauteurs des tronçons du pylône
$\gamma$	Coefficient d'atténuation de l'onde du courant dans le pylône
$\alpha$	Coefficients d'amortissement de l'onde du courant dans le pylône
$V_c$	Tension de l'apparition couronne.
$C_i$	Capacité couronne
$k_c$	Constante de couronne
$r$	Rayon du conducteur
$R_0, R_1$	Résistances du modèle de parafoudre
$L_0, L_1$	Inductances du modèle de parafoudre
$C_0, C_1$	Capacitances du modèle de parafoudre
$r_c$	Rayon théorique crée par rapport aux conducteurs
$r_g$	Rayon théorique crée par rapport au sol
$R_n$	Nouveau rayon de la sphère
$R_{sph}$	Rayon de la sphère
$t_f$	Temps de front
$Y_s$	Nombre d'années de simulation
$n_f$	Nombre de défauts
$F_r$	Taux de contournement
$A$	Zone d'étude
$N$	Nombre de cas généré
$\rho_c$	Facteur de corrélation
$H$	Hauteur du pylône
$\sigma_{\ln x}$	Déviation standard de $\ln x$
$(x)$	Fonction de densité de probabilité

<i>Dédicace</i> .....	.....
<i>Remerciements</i> .....	.....
<i>Résumé</i> .....	.....
<i>Sommaire</i> .....	<i>i</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>iv</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>vi</i>
<i>Liste des acronymes et symboles</i> .....	<i>vii</i>
<hr/>	
<i>Introduction Générale</i> .....	<i>2</i>

## *Chapitre I*

### *Concepts de base & généralités sur la foudre*

---

<b><i>I.1</i></b>	<b><i>Introduction</i></b> .....	<b><i>5</i></b>
<b><i>I.2</i></b>	<b><i>Paramètres électriques de la foudre</i></b> .....	<b><i>6</i></b>
I.2.1	Forme du courant d'arc.....	6
I.2.2	Forme réelle du courant de foudre.....	6
I.2.3	Amplitude des coups de foudre.....	6
<b><i>I.3</i></b>	<b><i>Origines des surtensions</i></b> .....	<b><i>8</i></b>
I.3.1	Coup de foudre sur un conducteur de phase.....	12
I.3.2	Coup de foudre sur un câble de garde.....	12
<b><i>I.4</i></b>	<b><i>Dispositifs de protection</i></b> .....	<b><i>13</i></b>
I.4.1	Eclateurs à air.....	14
I.4.2	Parafoudre au carbure de Silicium.....	16
I.4.3	Parafoudre à Oxyde de Zinc.....	17
I.4.3.1	Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO.....	19
I.4.3.2	Caractéristiques des parafoudres ZnO.....	21
I.4.3.3	Avantages par rapport aux parafoudres SiC.....	22
I.4.3.4	Les inconvénients des parafoudres à oxyde de zinc.....	23
<b><i>I.5</i></b>	<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b><i>24</i></b>

## ***Chapitre II***

### ***Coordination des isolements***

---

<b><i>II.1</i></b>	<b><i>Introduction</i></b> .....	<b><i>26</i></b>
<b><i>II.2</i></b>	<b><i>Principe de coordination des isolements</i></b> .....	<b><i>27</i></b>
II.2.1	Tension du système à fréquence d'alimentation la plus élevée .....	27
II.2.2	Surtensions temporaires de fréquence de puissance .....	28
II.2.3	Surtension transitoire .....	28
II.2.4	Niveaux de tenue de l'équipement .....	29
<b><i>II.3</i></b>	<b><i>Procédure de coordination des isolements</i></b> .....	<b><i>30</i></b>
<b><i>II.4</i></b>	<b><i>Rôle des parafoudre sur la coordination des isolements</i></b> .....	<b><i>32</i></b>
<b><i>II.5</i></b>	<b><i>Coordination des isolements d'un équipement</i></b> .....	<b><i>33</i></b>
<b><i>II.6</i></b>	<b><i>Coordination des isolements d'une installation</i></b> .....	<b><i>34</i></b>
I.4.1	Coordination des isolements de la ligne .....	34
I.4.2	Coordination de l'isolement dans les postes .....	35
<b><i>II.7</i></b>	<b><i>Stratégie de coordination des isolements</i></b> .....	<b><i>37</i></b>
II.7.1	Méthode de la coordination conventionnelle .....	37
II.7.2	Méthode de la coordination statistique .....	38
<b><i>II.8</i></b>	<b><i>Conclusion</i></b> .....	<b><i>40</i></b>

---

## ***Chapitre III***

### ***Modélisation des éléments du système et les modèles pour la coordination des isolements***

---

<b><i>III.1</i></b>	<b><i>Introduction</i></b> .....	<b><i>42</i></b>
<b><i>III.2</i></b>	<b><i>Modélisation des lignes de transmission</i></b> .....	<b><i>43</i></b>
<b><i>III.3</i></b>	<b><i>Modélisation et représentation des pylônes</i></b> .....	<b><i>45</i></b>
<b><i>III.4</i></b>	<b><i>Modélisation de la résistance de terre</i></b> .....	<b><i>47</i></b>
<b><i>III.5</i></b>	<b><i>Amorçage des isolateurs</i></b> .....	<b><i>49</i></b>

---

## Sommaire

---

<b>III.6</b>	<b>Modélisation des jeux de barres.....</b>	<b>49</b>
<b>III.7</b>	<b>Modélisation des parafoudres .....</b>	<b>50</b>
III.7.1	Modèle conventionnel ou à résistance non-linéaire.....	50
III.7.2	Modèle de Tominaga et al .....	51
III.7.3	Modèle proposé par W. Breilmann.....	52
III.7.4	Modèle de Ozawa et al .....	52
III.7.5	Modèle proposé par T. Hagiwara et al.....	53
III.7.6	Modèle recommandé par le groupe IEEE.....	53
<b>III.8</b>	<b>Le modèle électro-géométrique .....</b>	<b>55</b>
<b>III.9</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>57</b>
<hr/>		
<b>Conclusion Générale .....</b>		<b>59</b>
<hr/>		
<b>Références Bibliographiques .....</b>		<b>x</b>
<hr/>		

**INTRODUCTION**  
**GÉNÉRALE**

Les parafoudres sont des dispositifs qui aident à prévenir les dommages aux appareils dus à des tensions élevées. Le parafoudre fournit un chemin à faible impédance vers la terre pour le courant provenant d'un coup de foudre ou d'une tension transitoire, puis revient à des conditions de fonctionnement normales.

Le parafoudre qui utilise un semi-conducteur d'oxyde de zinc en tant que matériau de résistance, ce type de parafoudre est appelé parafoudre à oxyde métallique ou inverseur ZnO. Ce parafoudre offre une protection contre tous les types de surtensions AC et DC. Il est principalement utilisé pour la protection contre les surtensions à tous les niveaux de tension dans un système d'alimentation. Il est actuellement le plus utilisé et tend à remplacer les parafoudres SiC et les éclateurs. En effet, les varistances à oxyde de zinc, qui sont les éléments de base du parafoudre, présentent des propriétés avantageuses du point de vue non linéarité, capacité d'absorption de l'énergie et temps de réponse. Cependant la capacité d'absorption de l'énergie de ces céramiques varie suivant une allure complexe en fonction des dimensions, densité de courant et uniformité du bloc.

L'objectif principal dans la conception des équipements des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique est de les fiabiliser quelles que soient les conditions environnementales. Les dépôts de glace qui peuvent s'accumuler sur les équipements électriques entraînent la diminution de la rigidité diélectrique de ces derniers et réduisent ainsi la fiabilité des réseaux électriques.

Parmi les équipements électriques comportant des réseaux aériens, une attention particulière doit être portée aux isolateurs qui constituent un élément indispensable au bon fonctionnement de ces derniers, bien qu'ils ne représentent qu'un faible pourcentage du coût total de conception. En effet, leur défaillance peut avoir une grande influence sur les coûts d'exploitation des réseaux électriques, puisque leur rôle est d'assurer l'isolation électrique des phases sous tension entre elles, et de ces dernières entre les parties de mise à la terre.

Le courant de foudre se propageant vers la sous-station peut être un coup de foudre direct sur la ligne de transmission (en contact avec le conducteur de phase ou la ligne de terre), ou un coup de foudre qui se termine au sol. Cette étude a analysé l'impact de la foudre sur le système électrique. Les coups de foudre produisent des ondes de choc, qui sont

générées dans les systèmes électriques. la plupart des surtensions peuvent dégrader la ligne de transmission et les équipements connectés.

L'objectif principal de cette étude est de réguler, dicter et analyser la spécification de la coordination d'isolement, pour améliorer et optimiser l'impact des surtensions sur le système électrique surchargé. Il contribue également au progrès et à l'élargissement des connaissances sur le comportement des systèmes électriques soumis à la foudre.

Ce mémoire de MASTER II en électrotechnique, option réseau électrique, centré sur Contribution à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO.

Pour accomplir et atteindre notre objectif, nous avons subdivisé notre étude en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous avons identifié les concepts de base principaux et de base liés à cette recherche, c'est-à-dire l'apparition de surtensions transitoires sur les réseaux électriques, les types d'isolements, les équipements différentiels utilisés pour protéger les systèmes électriques contre les surtensions et pour éviter les chocs.

Le deuxième chapitre est à propos une analyse et une exploration de la littérature sur la coordination des isolements, en discutant de sa procédure, ses méthodes, ses critères et le rôle du parafoudre sur la coordination de l'isolement

Le troisième et dernier chapitre donne une brève explication et démonstration des travaux liés à la modélisation des éléments du système électrique et des éléments de protection.

Notre mémoire de fin d'études se terminera par une conclusion générale et perspective.

**Chapitre I**  
**CONCEPTS DE BASE &  
GENERALITES SUR LA  
FOUDRE**

## **I.1 Introduction**

La conception des équipements des réseaux électriques est basée sur plusieurs facteurs en tenant compte les conditions environnementales telles que, la pollution, la pression atmosphérique, la température, et notamment, les décharges électriques de la foudre. Cette dernière pourrait influencer sur la tenue diélectrique des équipements électriques et par conséquence entraîner une diminution du niveau d'isolement qui conduit à une interruption du service. [12]

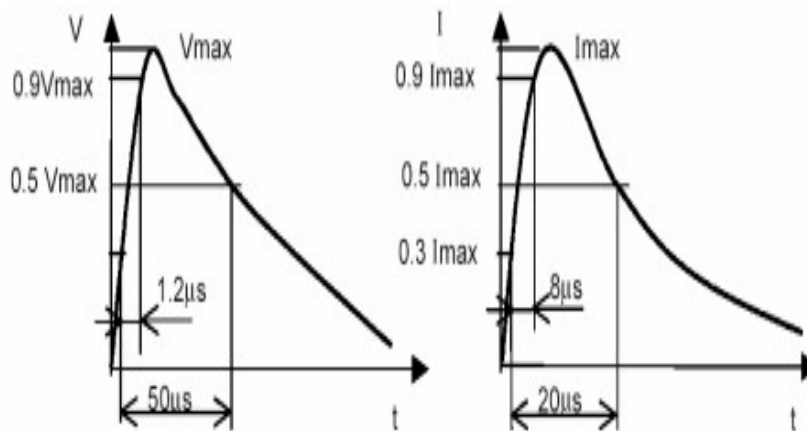
La tenue diélectrique de ces équipements est souvent menacée par la présence de surtensions transitoires sur les réseaux électriques. Ces surtensions correspondent principalement aux enclenchements ou déclenchement des lignes (surtensions de manœuvre) et aux surtensions atmosphériques (foudre) qui peuvent détruire l'isolation des équipements des réseaux électriques. [12]

## **I.2 Paramètres électriques de la foudre**

D'une manière générale, l'activité orageuse dans une région peut être caractérisée par :

### **I.2.1 Forme du courant d'arc**

Ce courant est de nature impulsionnelle ayant une forme qui se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée) et un temps de décroissance [1] (figure I.1).



**Figure I.1** Ondes typiques dans le canal de la foudre [1]

### **I.2.2 Forme réelle du courant de foudre**

Le phénomène physique de la foudre correspond à une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps. Il est généralement représenté par une source de courant impulsionnel. La forme d'onde réelle est très variable, elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelques microsecondes à 20 microsecondes) suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes (Figure I.2)

### **I.2.3 Amplitude des coups de foudre**

Beaucoup de fonctions de répartition des amplitudes des courants des premiers arcs en retour des coups de foudre négatifs peuvent exister. La distribution statistique expérimentale, selon la IEEE, des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale donnée dans la figure I.3 et celle en raideur de front est donnée sur la figure I.4. [3]

# CHAPITRE I

## CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

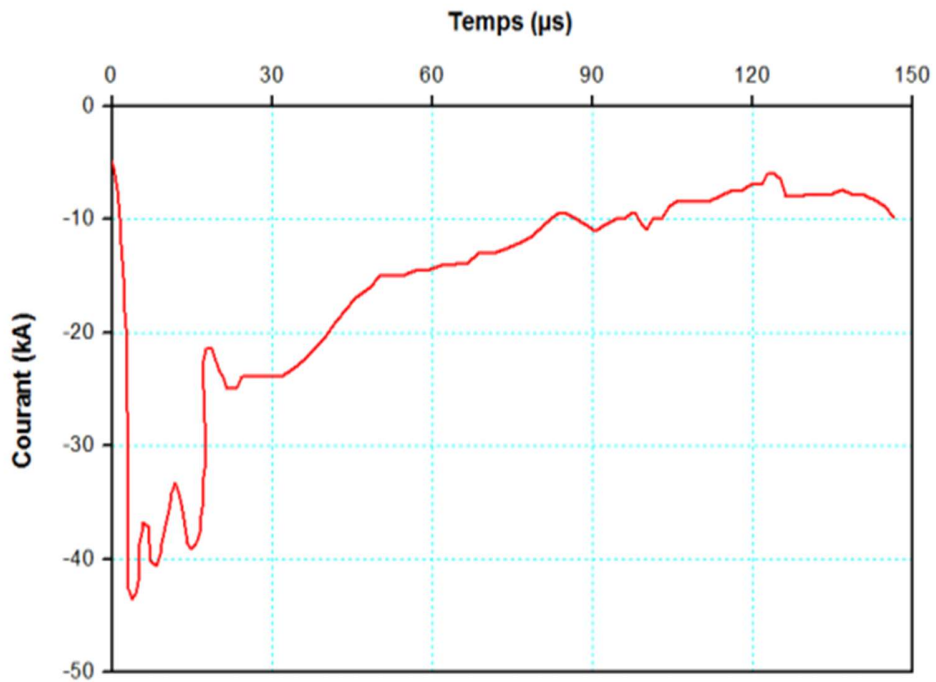


Figure I.2 Oscillogramme d'un courant de foudre

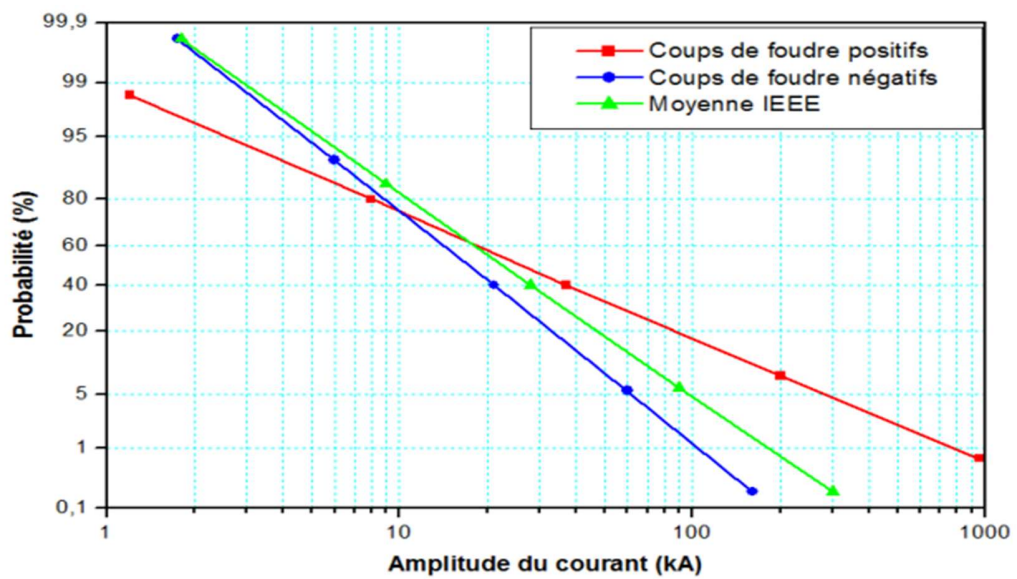


Figure I.3 Distribution statistique expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE [2]

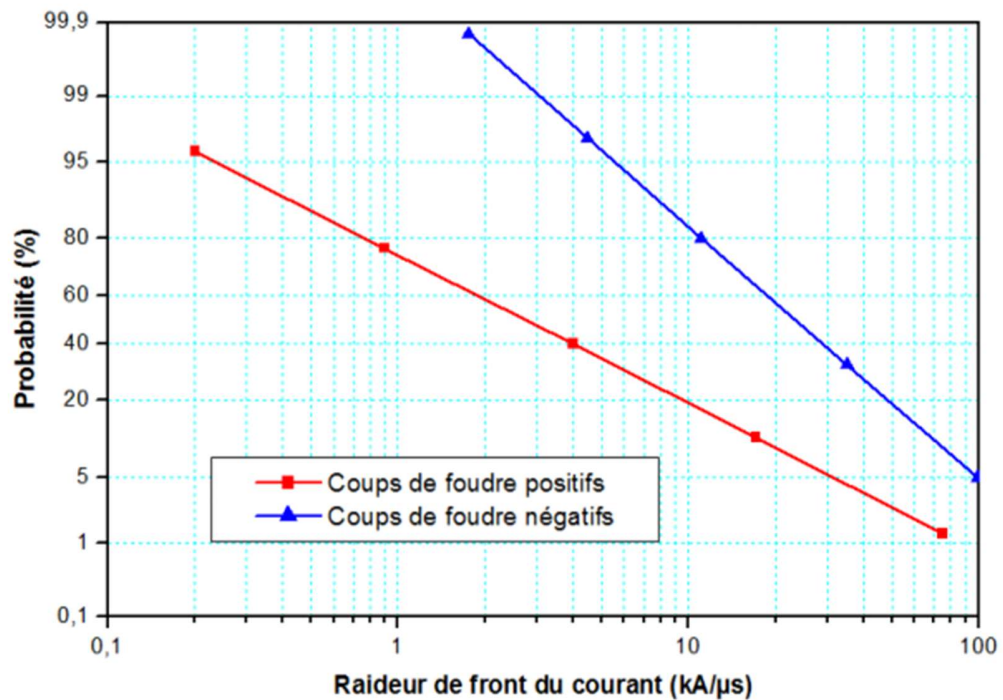


Figure I.4 Distribution statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE [2]

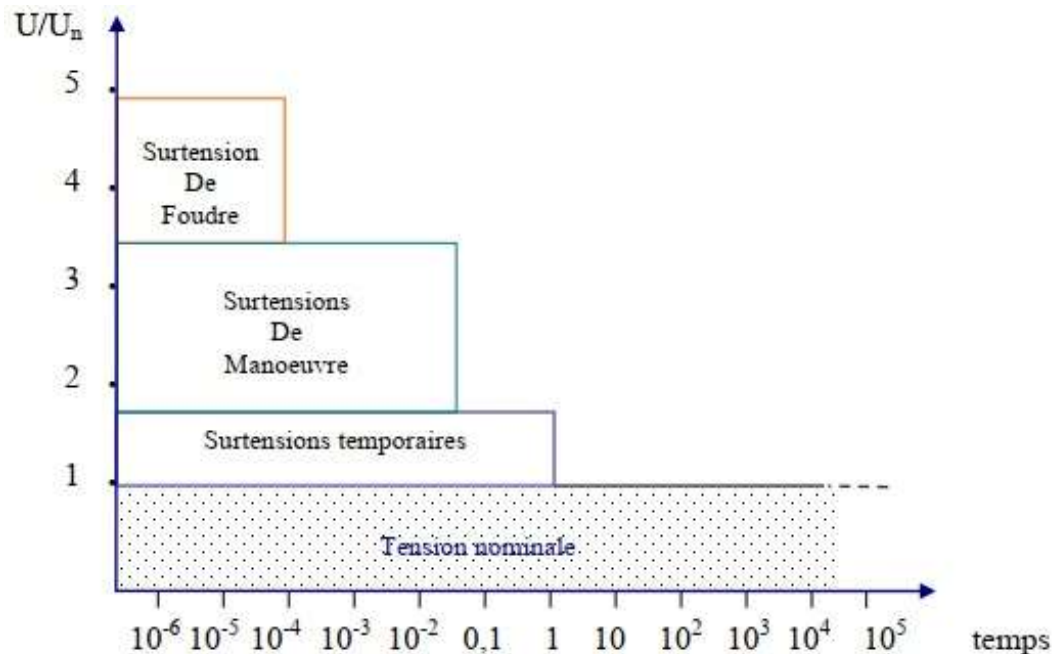
### I.3 Origines des surtensions

Les lignes aériennes, les câbles et les appareils électriques sont très souvent exposés à des surtensions électriques transitoires, dangereuses pour le matériel électrique et pour la sécurité des personnes, Les surtensions peuvent être d'origine interne ou externe. [13]

- Interne : Ces surtensions sont causées par un élément du réseau considéré et ne dépendent que des caractéristiques et de l'architecture du réseau lui-même. A titre d'exemple, la surtension qui apparaît à la coupure du courant magnétisant d'un transformateur.
- Externe : Ces surtensions sont provoquées ou transmises par des éléments externes au réseau, dont on peut citer à titre d'exemple :
  - \* surtension provoquée par la foudre

## CHAPITRE I CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

\* propagation d'une surtension HT à travers un transformateur vers un réseau interne d'usine.



**Figure I.5** Ordre de grandeur des surtensions électriques

Les contraintes de tension dans les caractéristiques sont reprises dans le tableau I.1 et sont réparties en deux classes en fonction de leurs origines, de leurs formes d'onde et de leurs durées

- Surtension temporaire : surtension à fréquence industrielle de durée relativement longue (de quelques périodes à quelques secondes).
- Surtensions transitoires : surtension de courte durée ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie. Les surtensions transitoires sont divisées en :
  - . surtension à front lent
  - . surtension à front rapide
  - . surtension à front très rapide.

Parmi les surtensions transitoires les plus contraignantes on trouve celles dues à un coup de foudre qui peut affecter le conducteur de phase, le câble de garde ou encore le pylône d'un réseau électrique

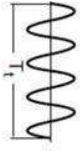
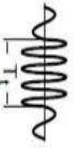

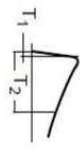
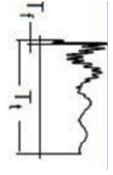
## CHAPITRE I

### CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

---

- Formes de tensions normalisées Les formes d'ondes normalisées utilisées pour effectuer les essais des matériels : – Tension de courte durée à fréquence industrielle : c'est une tension sinusoïdale de fréquence  $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$  et de durée égale à 60 s.
  - Tension de choc de manœuvre c'est une tension de choc ayant une durée jusqu'à la crête de 250  $\mu\text{s}$  et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 2500  $\mu\text{s}$
  - Tension de choc de foudre c'est une tension de choc ayant une durée de front montant de 1,2  $\mu\text{s}$  et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 50  $\mu\text{s}$ .

**CHAPITRE I**  
**CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre**

Classe de surtension	Basse fréquence		Transitoire		
	Permanente	Temporaire	à front lent	à front rapide	à front très rapide
Forme					
Gamme des formes	$f = 50$ ou $60$ Hz $T_1 \leq 3600$ s	$10 < f < 500$ Hz $3600 \leq T_1 \leq 0.03$ s	$20 < T_p < 5000$ $\mu$ s $T_2 \leq 20$ ms	$0.1 < T_1 < 20$ $\mu$ s $T_2 \leq 300$ $\mu$ s	$3 < T_f < 100$ ns, $3 < f_1 < 100$ MHz $30$ kHz $< f_2 < 30$ MHz $T_t < 3$ ms (durée)
Forme normalisée	$f = 50$ ou $60$ Hz	$48 \leq f \leq 62$ Hz $T_t = 60$ s	$T_p = 250$ $\mu$ s $T_2 = 2500$ $\mu$ s	$T_1 = 1,2$ $\mu$ s $T_2 = 50$ $\mu$ s	Aucun
Essai de tenue normalisé	Aucun	Essai de courte durée à fréquence industrielle	Essai aux chocs de manœuvre normalisé	Essai aux chocs de foudre normalisé	Aucun

**Tab. I.1** Classification des surtensions sur les réseaux électrique triphasés, formes normalisées de tensions d'essais [13]

### **I.3.1 Coup de foudre sur un conducteur de phase**

Une décharge de ce type se produit lorsque la foudre tombe directement sur les conducteurs de phase suite à une défaillance de blindage dans la ligne. Ce type d'incidence produit de fortes surtensions dues à deux ondes de surtension qui se propagent dans des directions opposées de la ligne à partir du point d'impact du coup de foudre (figure I.5). Si l'onde trouve un transformateur ou un disjoncteur ouvert, elle sera totalement réfléchi en conservant la polarité. Cette onde réfléchi, superposée à l'onde incidente, produit une surtension égale à deux fois l'amplitude. Ces surtensions s'expriment à partir de l'impédance caractéristique  $Z_c$  (300 à 400  $\Omega$ ) du conducteur d'après la formulation simplifiée suivante [4]:

$$U(t) = I(t) * \frac{Z_c}{2} \quad \text{I.1}$$

En se propageant le long de la ligne, l'onde subit des déformations dues aux éventuels amorçages des chaînes d'isolateurs. En effet, selon les valeurs respectives de la tension de tenue de cette chaîne et de l'amplitude de la surtension, il pourrait y avoir un contournement. Pour ce cas de figure, il y a un défaut d'isolement de la ligne dont l'élimination nécessite l'ouverture des disjoncteurs.

### **I.3.2 Coup de foudre sur un câble de garde**

La protection des lignes de transmission contre les coups de foudre directs est faite avec des câbles de garde qui sont placés au-dessus des conducteurs de phases et reliés directement à la terre au niveau de chaque pylône. Lorsqu'un coup de foudre tombe sur un pylône ou sur un câble de garde, l'écoulement du courant vers la terre à travers la structure métallique du pylône provoque une élévation de potentiel de ce dernier [4]. Cette surtension dépend de l'inductance propre  $L$  du pylône et de la résistance de sa terre  $R$  au choc de foudre (Figure I.6).

$$U(t) = [R * I_p(t) + L * d \frac{i_p(t)}{dt}] \quad \text{I.2}$$

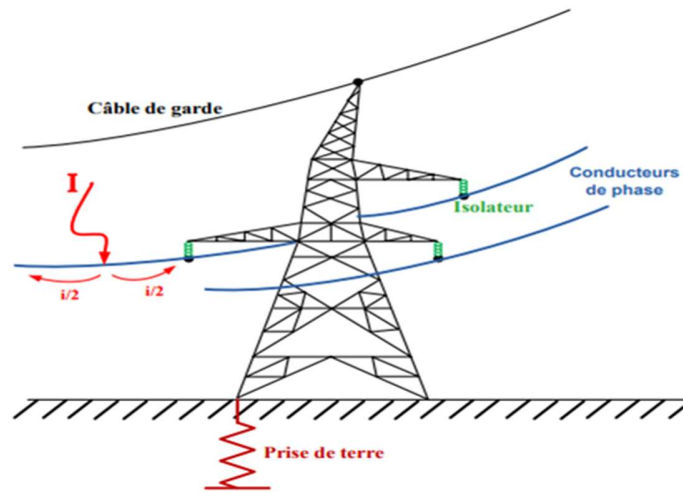


Figure I.6 Coup de foudre sur le conducteur de phase

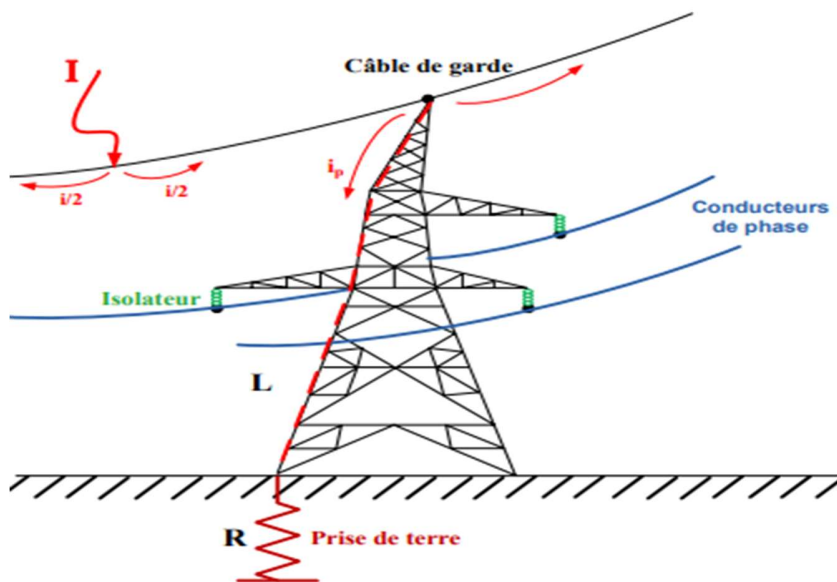


Figure I.7 Coup de foudre sur le câble de garde

#### I.4 Dispositifs de protection

Le premier dispositif utilisé a été l'éclateur à air. Quelques années plus tard un dispositif plus complexe, associant en particulier des éclateurs et des céramiques à SiC, a été développé. Récemment, le développement des céramiques à base d'oxyde de zinc (ZnO) avec une caractéristique Tension - Courant fortement non linéaire a rendu possible la construction de parafoudres plus simples, constitués d'un empilement de varistances dépourvu d'éclateurs.

## CHAPITRE I

### CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

---

Afin de mettre en évidence les meilleures performances atteintes avec les parafoudres à ZnO, nous présenterons les caractéristiques du matériel de protection. Les dispositifs de protection peuvent être classés en deux catégories [5]:

- Les éclateurs à air;
- Les parafoudres.

#### I.4.1 Eclateurs à air

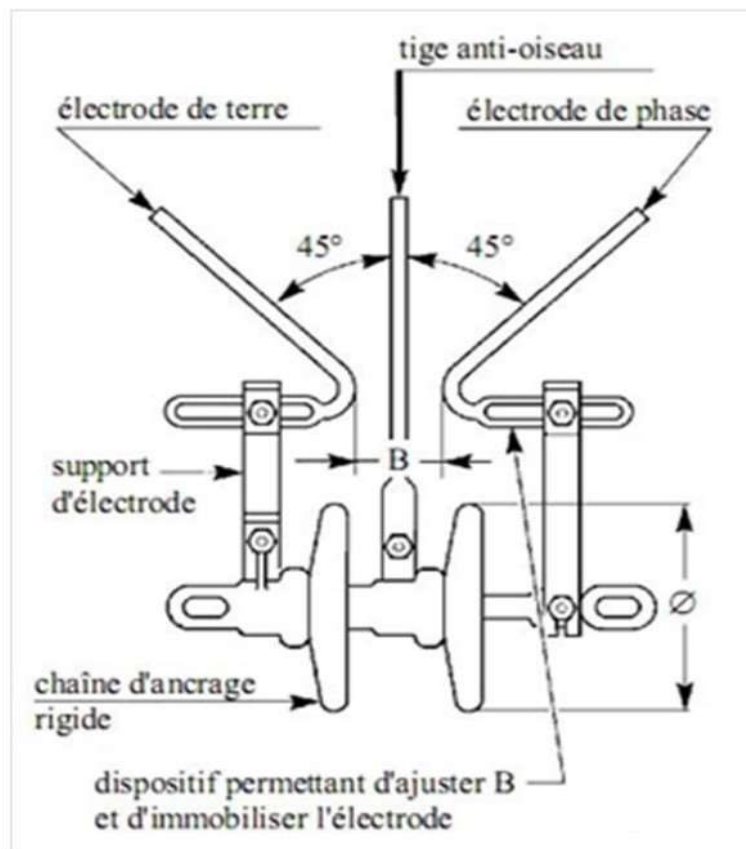
L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes. La forme et la nature de ces électrodes sont très variables. Le principal avantage de l'éclateur est son faible prix (figure 1.8). Il est aussi très robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction.

Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans inconvénients :

- Malgré un réglage rigoureux, leur niveau d'amorçage est peu précis et très sensible aux conditions atmosphériques (température, humidité, pression...), à l'état d'ionisation de l'air et au temps de montée de la surtension appliquée.
- Un éclateur ne se désamorce pas spontanément et il donne lieu à un courant de suite. Pour l'extinction de ce courant, il nécessite le déclenchement du disjoncteur en tête de ligne. De ce fait, un éclateur ne peut pas être utilisé pour lutter contre les surtensions de manœuvre.
- Ils sont sujet à des amorçages intempestifs, du fait des oiseaux, de la neige, de pailles...
- Ils sont réglés à un niveau de tension élevé pour éviter des amorçages intempestifs, d'où un niveau de protection élevé et un niveau d'isolement élevé du matériel protégé.

## CHAPITRE I CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

- Le déclenchement des disjoncteurs pour éliminer le courant de suite d'un éclateur provoque des coupures brèves de l'ordre de la seconde, nuisibles à la qualité du service.
- L'amorçage d'un éclateur provoque une onde coupée à front raide, susceptible d'endommager les enroulements du transformateur protégé, ou tout circuit bobiné proche.

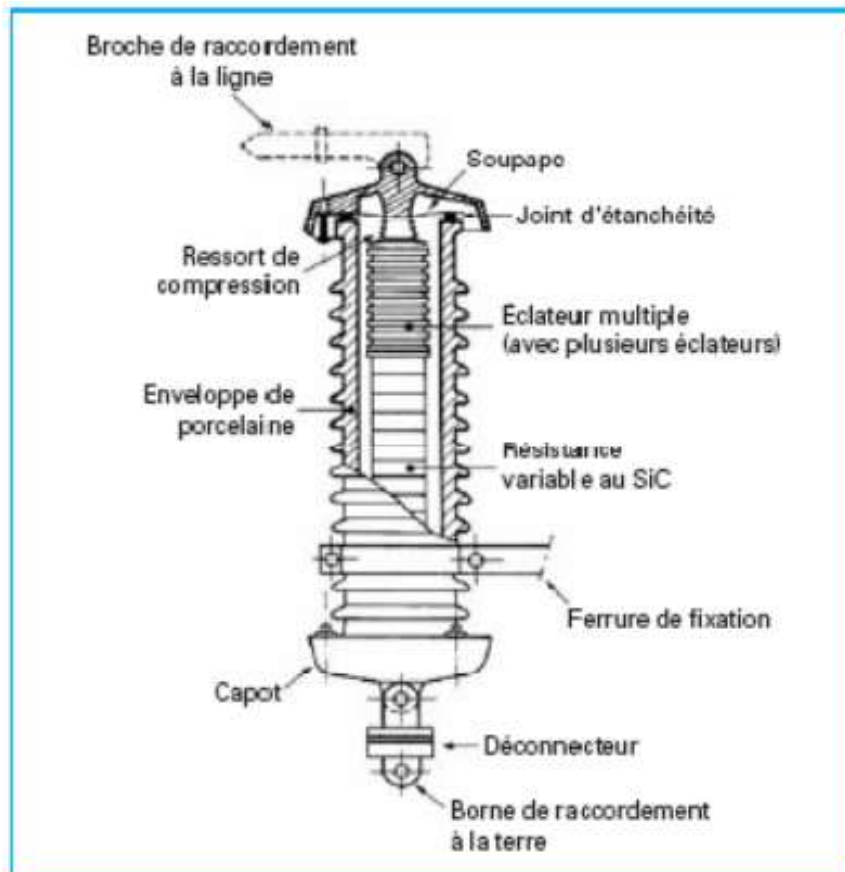


**Figure I.8** Schéma d'un éclateur [5]

En tout état de cause, l'éclateur demeure un excellent moyen de protection des isolations dans l'air puisque la tenue diélectrique du matériel à protéger subit les mêmes fluctuations que sa tension d'amorçage. En revanche, il est moins bien adapté à la protection des autres matériels tels que les transformateurs, les câbles, les postes électriques sous enveloppe métallique. On est alors amené à le remplacer de façon avantageuse par des parafoudres.

**I.4.2 Parafoudre au carbure de Silicium**

Ce parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances (résistances non linéaires), au carbure de silicium (SiC), associées en série avec un ou plusieurs éclateurs (figure I.9), l'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote)



**Figure I.9** : Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs [5].

En fonctionnement normal, les éclateurs ne sont conducteurs. Lorsque la surtension est supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge au travers des résistances dont la valeur est d'autant plus faible que la tension est élevée (caractéristique non linéaire), ce qui permet de limiter la surtension.

Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la tension à ses bornes diminue et la non-linéarité des résistances entraîne une décroissance plus rapide du courant qui peut alors être facilement interrompu par les éclateurs à son premier

## CHAPITRE I

### CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

---

passage par zéro. Ainsi, la saturation est écrêtée sans provoquer ni de défaut artificiel, ni d'onde coupée, puisque la présence des résistances en série avec les éclateurs évite l'effondrement de la tension après l'amorçage.

Cet ensemble présente certains avantages par rapport à l'éclateur de protection :

#### Avantages

- Elimination du défaut sans l'intervention des protections.  
La présence des résistances en série avec les éclateurs empêche l'apparition d'un front raide (onde coupée) lors de l'amorçage des éclateurs.
- Les contraintes atmosphériques sont éliminées car l'ensemble est placé dans une enveloppe de porcelaine étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).
- Moins de dispersion de la tension d'amorçage, surtout pour les surtensions à front raide.
- De par sa construction, un parafoudre à SiC peut limiter les surtensions de manœuvre (particulièrement en THT), ce qui se traduit par une diminution du niveau de protection par rapport à celui obtenu avec des éclateurs.

#### Inconvénients

- Les céramiques à SiC supportent très mal un écoulement prolongé de courant. De ce fait, un parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une tension temporaire; l'énergie qu'il aurait à dissiper provoquerait sa destruction.
- Pour le fonctionnement correct des parafoudres, il faut que la tension appliquée soit uniformément répartie entre les éclateurs. On fait face à ce problème par des systèmes de répartition de tension résistifs ou capacitifs, ce qui fait augmenter le prix de l'appareil et le rend plus complexe et moins fiables.

#### I.4.3 Parafoudre à Oxyde de Zinc

C'est au cours des années 1970 que des constructeurs de parafoudres se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces varistances qui présentent deux avantages essentiels:

## CHAPITRE I CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

- Un coefficient de non-linéarité si important que l'on peut en faire des parafoudres sans éclateurs, dont la partie active reste sous tensions en permanence.
- Ils ont une capacité d'absorption d'énergie élevée et peuvent être utilisés pour tous réseaux, de l'équipement électronique à la transmission d'énergie à très haute tension (225 ou 400KV).

Le parafoudre ZnO est composé essentiellement d'un assemblage en série de varistances à base d'oxyde de zinc dont le nombre détermine la tension de fonctionnement. (Figure I.10). La fabrication des varistances ZnO avec des caractéristiques remarquables a permis le changement de la constitution des parafoudres.

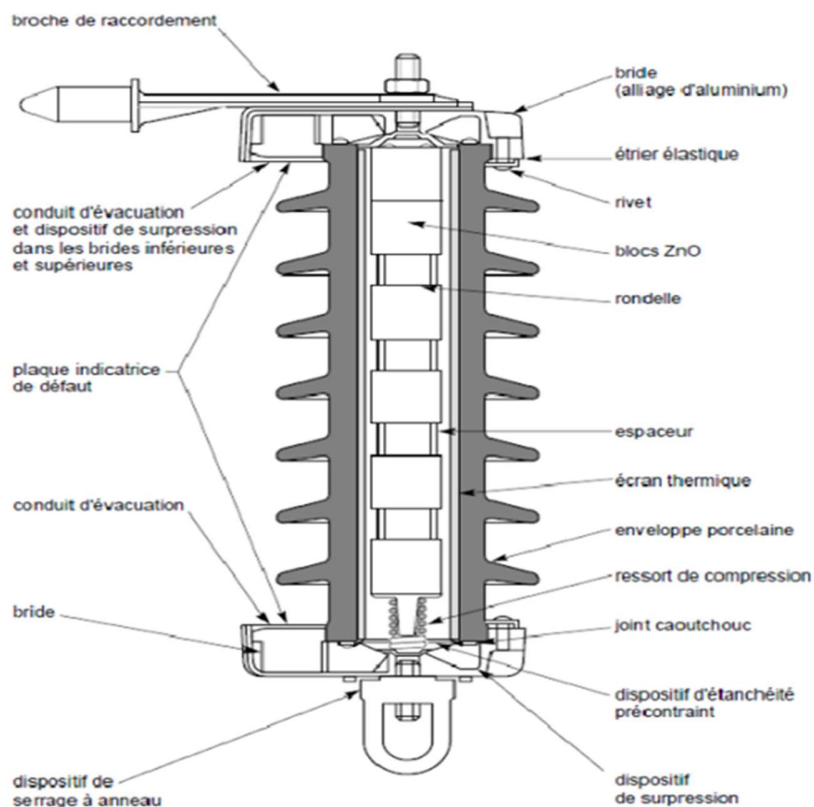


Figure I.10: Parafoudre à oxyde de zinc ZnO

## CHAPITRE I

### CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

---

Cette simplicité de constitution n'est pas pour autant synonyme de facilité de construction. La fabrication de ces céramiques requiert en effet beaucoup de soin et de savoir-faire, car leurs caractéristiques et leur fiabilité dépendent des paramètres de fabrication de façon très sensible. Elles sont principalement constituées d'oxyde de zinc (90% en masse) et d'un mélange d'autres oxydes (oxyde de bismuth, de cobalt, de manganèse, de chrome, d'étain, ...) de pureté et de granulométrie soigneusement contrôlées, qui sont mélangés en phase aqueuse. Ce mélange est ensuite asséché et la poudre résultante est compactée sous forme de disques. Les pièces sont alors frittées à très haute température (1000°C et plus) de façon à densifier l'ensemble et obtenir l'effet de non-linéarité recherché.

Les disques sont finalement revêtus, en périphérie, d'une couche isolante assurant la tenue diélectrique de la varistance, puis métallisés sur chacune de leurs faces par projection d'un alliage métallique en fusion.

#### I.4.3.1 Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO

Les parafoudres à oxyde métallique protègent l'isolation des équipements dans les systèmes électriques contre les surtensions internes et externes.

Sous tension de fonctionnement permanente, l'impédance du parafoudre ZnO est très élevée et le courant de la varistance est très faible (moins de 1 mA). Lorsqu'une surtension (commutation ou surtension de foudre) se produit, la résistance diminuera rapidement et la varistance coupera la surtension, formant ainsi un chemin préférentiel pour que l'énergie correspondante s'écoule vers la terre, et donc à limiter le niveau de la contrainte résiduelle.

Par suite, la caractéristique V-I de l'appareil est fortement non-linéaire. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de 0.1 mA à 1 kA pour les surtensions de manœuvre et 20 kA pour les surtensions de foudre, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal. [6]

Les parafoudres à oxyde métalliques ont rapidement remplacé les parafoudres SIC, cela est dû à la forte non-linéarité de leurs caractéristiques (V-I ou E-J) comme montré dans la figure (I.11), ce qui a pour effet d'éliminer les éclateurs qui étaient présents dans leurs prédécesseurs et les caractéristiques électriques sont exclusivement déterminées par les propriétés des blocks à oxyde métallique.

## CHAPITRE I CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

On augmente la tension assignée en ajoutant des varistances en série par contre pour avoir de plus forte énergie on augmente le diamètre des varistances ou on réalise des colonnes parallèle. Le niveau de protection d'un d'un parafoudre ZnO correspond à sa tension résiduelle au courant nominal de décharge qui le caractérise

A partir des caractéristiques élémentaires d'une varistance, dimensionner un parafoudre ZnO consiste à définir le nombre de varistances élémentaires à associer en série.

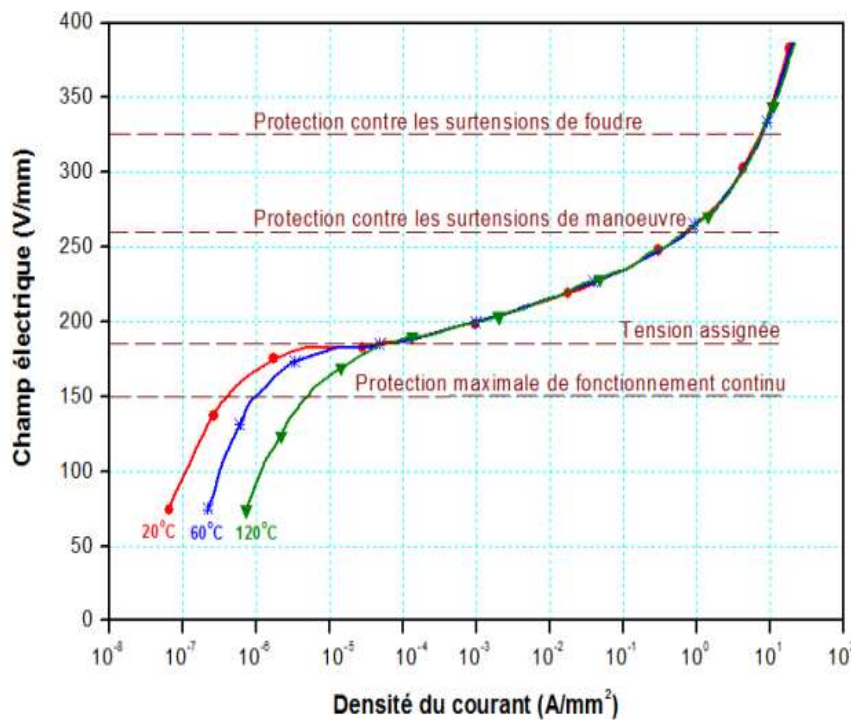


Figure I.11 Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO [7]

Deux exigences influent sur le nombre de varistances à placer en série :

- Un bas niveau de protection (un nombre maximal)
- La tenue à une tension de service donnée (un nombre minimal).

Par ailleurs, le parafoudre doit être capable en toutes circonstances de dissiper, sous forme de chaleur, l'énergie qui lui est injectée. Lors de l'écrêtage d'une surtension, l'échauffement des varistances peut être considéré comme adiabatique. Il est donc nécessaire que la puissance dissipable par le parafoudre soit, à tout instant, supérieure à la puissance qu'il

## CHAPITRE I

### CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

---

absorbe, sachant que celle-ci croît fortement avec la température. Dans le cas contraire, un phénomène appelé "emballement thermique" conduit à la défaillance du parafoudre.

En dehors des décharges de foudre, le parafoudre écrête toutes les surtensions du réseau. La norme CEI 60099-4 définit ainsi des classes de décharge de ligne de 1 à 5 correspondants à des capacités d'énergie croissantes. Pour les réseaux de distribution moyenne tension, la classe habituelle est la classe 1. Les classes 2 et 3 se retrouvent usuellement sur des réseaux de 60 à 225 kV et les classes 4 et 5 pour les réseaux 225kV, 400kV et au-delà.

#### I.4.3.2 Caractéristiques des parafoudres ZnO

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les parafoudres fixées par les spécifications d'essai tableau I.2, [9], [10], [11]

<b>Tension nominale de réseau (kVeff)</b>	63	90	225	400
<b>Tension nominale d'exploitation (kVeff)</b>	42	58	142	243
<b>Tension assignée du parafoudre (kVeff)</b>	72	96	192	360
<b>Tension résiduelle au courant nominal (kVmax)</b>	180	235	475	850
<b>Courant nominal, onde 8/20<math>\mu</math>s (kA)</b>	5	5	10	10

**Tab. I.2** Exemple de caractéristiques des parafoudres ZnO [7].

- La tension assignée ( $U_r$ ), qui est la valeur spécifiée maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement. Cette tension peut être appliquée de façon continue au parafoudre sans que cela modifie ses caractéristiques de fonctionnement.
- La tension maximale de service permanent ( $U_c$ ) La tension maximale de régime permanent  $U_c$  est la tension AC efficace maximale pouvant être appliquée de façon continue au parafoudre, avec marge de sécurité.
- Le courant nominal de décharge ( $I_n$ ) est la valeur de crête d'une onde de courant de forme bi-exponentielle 8/20  $\mu$ s, qui sert à classer le parafoudre. En moyenne tension,

## CHAPITRE I CONCEPTS DE BASE & GENERALITES SUR LA Foudre

Il peut prendre la valeur 5 kA ou 10 kA. Le niveau de protection du parafoudre est défini à ce courant.

- La capacité d'absorption énergétique est traduite par la tenue aux ondes de courant de forme bi-exponentielle 4/10 et par la tenue aux ondes de courant de forme rectangulaire dont la durée et l'amplitude définissent la sévérité.
- La surtension temporaire (UT) est la valeur maximale efficace acceptable par le parafoudre pendant 5 secondes et 120 minutes en mode tenue ou en fin de vie contrôlée (déconnexion). Le paramètre UT est supérieure à la tension ( $U_c$ ).
- Le courant de suite est le courant fourni par le réseau et qui subsiste un temps plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler de lui-même à la fin d'une alternance de la tension [8]

### I.4.3.3 Avantages par rapport aux parafoudres SiC :

Les parafoudres à ZnO présentent de nombreux avantages par rapport aux parafoudres SiC :

Ils sont capables d'absorber des courants de forte intensité tout en maintenant une tension à leurs bornes beaucoup plus faible que celles des parafoudres à SiC. Comme le montre la figure (I.12)

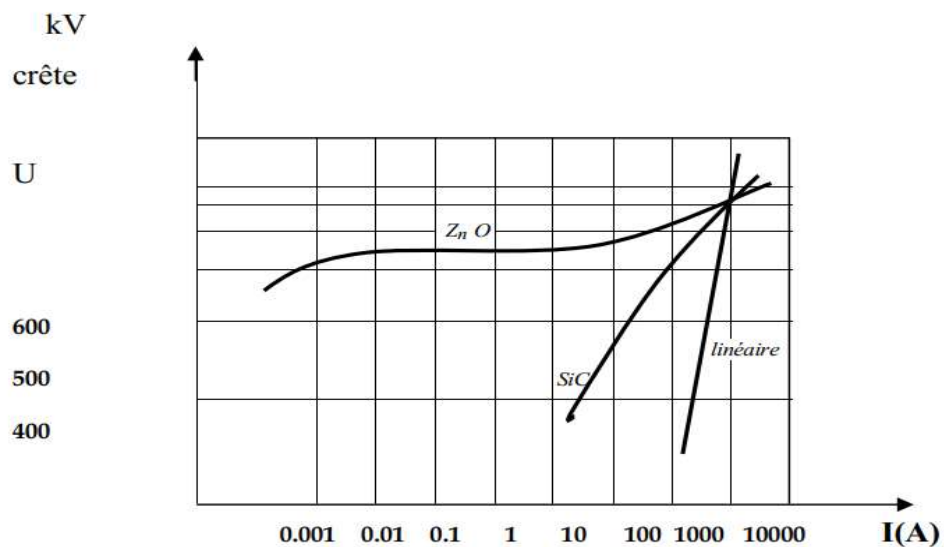


Figure I.12 : Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection. [4]

En raison de leur architecture, ils peuvent être utilisés dans différents environnements.

En général, la surface des varistances est d'environ la moitié de celle des SiC pour fournir la même protection.

Les parafoudres à ZnO ne sont pas soumis aux limitations introduites par les éclateurs, par exemple la probabilité de décharges inattendues dues à la contamination des éclateurs est existante, meilleure stabilité des caractéristiques électriques de céramique de ZnO après absorption des chocs énergétiques de très fort courant (quelques dizaines de nanosecondes). En éliminant les éclateurs et la céramique ZnO a un temps de réponse court. L'écèlement des surtensions à des valeurs plus faibles par les parafoudres à ZnO se traduit par une meilleure protection du matériel. [8]

#### **I.4.3.4 Les inconvénients des parafoudres à oxyde de zinc :**

Malheureusement, ce n'est pas parfait et cela présente quelques inconvénients::

- Les risques d'emballlement thermique [8] peuvent intervenir lors d'une dégradation de la caractéristique électrique du fait de l'absorption de courants de très forte intensité.
- Le prix de revient est élevé par rapport aux éclateurs. Cependant, cet inconvénient est tout relatif, car la qualité sans cesse croissante des parafoudres a diminué de façon très sensible le nombre d'interventions et de dépannages sur les lignes.
- Dans la zone de fonctionnement normal, un accroissement de la température qui entraîne l'augmentation de la puissance consommée pouvant conduire à l'emballlement thermique.

### **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre on a donné des informations générales sur les parafoudres à base d'oxyde métallique , ainsi que la tendance mondiale à les utiliser comme protection contre toute forme de surtension pouvant affecter le réseau de transport, pour assurer le fonctionnement normal du système et pour les clients. Fournir une protection. Pour assurer la continuité des services, il est nécessaire de comprendre les différentes contraintes électriques qui apparaissent dans le réseau, ainsi que la réponse de l'isolement à ces contraintes, les caractéristiques des équipements de protection, et enfin les concepts et méthodes utilisés dans le réseau. l'exécution réelle de la coordination des isolements.

## **Chaptire II**

# **COORDINATION DES ISOLEMENTS**

#### II.1 Introduction

Les appareillages des postes et des réseaux de distribution à haute tension sont soumis en exploitation à des surtensions d'origine atmosphérique ou de service provenant de manœuvres, de mises à la terre, de courts-circuits ou d'autres incidents conduisant à des phénomènes transitoires.

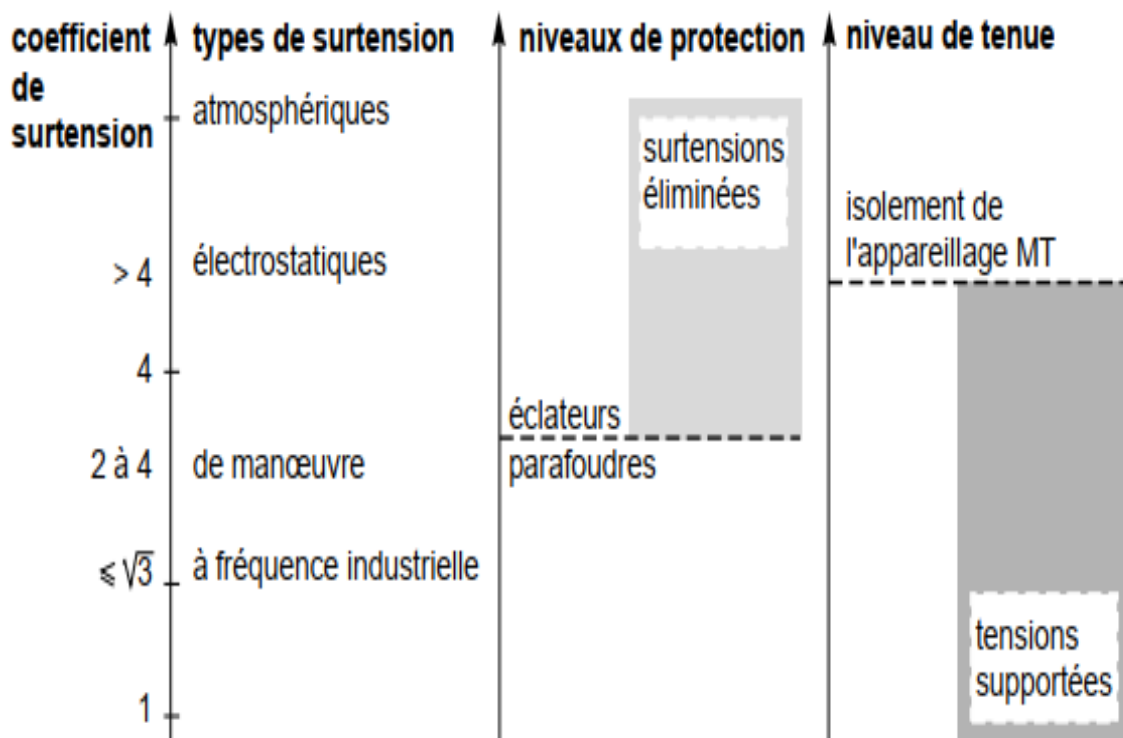
On entend par coordination de l'isolement, l'ensemble des mesures qui sont prises pour éviter des décharges disruptives de perforation ou de contournement dans le matériel des installations.

La coordination de l'isolation est le processus de connaissance des niveaux d'isolation des composants du système électrique. En d'autres termes, c'est le processus de détermination de la résistance d'isolement de l'équipement. L'isolation interne et externe de l'équipement électrique est exposée à une tension normale continue et à une tension anormale temporaire. Il vise à déterminer la rigidité diélectrique des transformateurs et d'autres composants du poste électrique dans les réseaux soumis aux surtensions. Après avoir évalué les caractéristiques de l'isolement, le concepteur de l'équipement peut choisir un système de protection à même de réduire ou de supprimer les risques de défaillance suite à un choc de foudre. [19]

Dans ce chapitre discutera le principe ,la procédure et les méthodes pour la coordination des isolements.

## **II.2 Principe de coordination des isolements**

Étudier la coordination de l'isolement d'une installation électrique c'est donc définir, à partir des niveaux de tensions et surtensions susceptibles d'être présents sur cette installation, un ou des niveaux de protection contre les surtensions. Les matériels de l'installation et les dispositifs de protection sont alors choisis en conséquence (Figure II.1). Le niveau de protection est déduit des conditions : d'installation, d'environnement, et d'utilisation du matériel. [15]



**Figure II.1** : Détermination exacte du niveau de protection et d'isolement. [15]

L'exigence d'isolation est déterminée en tenant compte des facteurs suivants:

### **II.2.1 Tension du système à fréquence d'alimentation la plus élevée:**

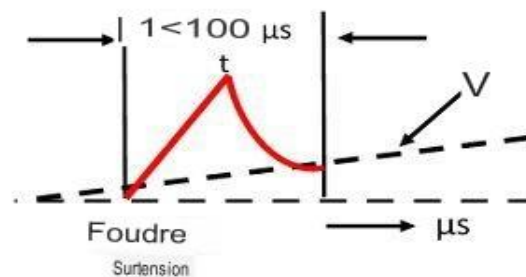
Le réseau d'alimentation AC a un niveau de tension de fréquence d'alimentation nominale différent comme 400V, 3,3KV, 6,6k, etc. Lorsque le système est légèrement chargé, la tension de fréquence d'alimentation à l'extrémité de réception de la ligne augmente. L'équipement du système d'alimentation est conçu et testé pour résister à la tension du système à fréquence d'alimentation la plus élevée (440 V, 3,6 K, 7,2 K, etc.) sans défaillance d'isolation interne ou externe. [14]

### **II.2.2 Surtensions temporaires de fréquence de puissance:**

La surtension temporaire dans le réseau électrique peut être causée par la décharge de charge, les défauts, la résonance, etc. Leur fréquence est d'environ 50 Hz et des pics moindres, le taux de montée le plus faible et la durée plus longue (seconde ou même minutes). La protection contre les surtensions temporaires à la fréquence du réseau est assurée par le relais IDMT. [14]

### **II.2.3 Surtension transitoire:**

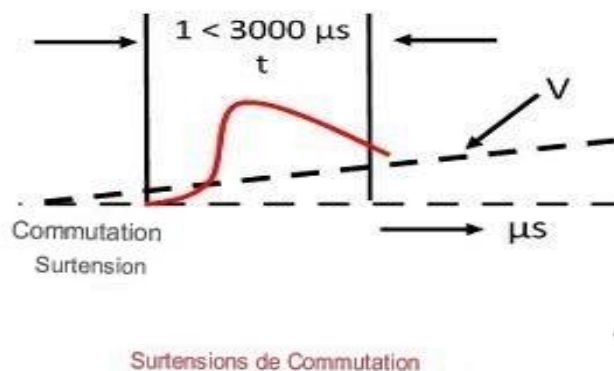
Les surtensions transitoires dans le système d'alimentation peuvent être causées par la foudre, la commutation, la réamorçage des ondes progressives, etc. La surtension du système d'alimentation a le pic élevé, le taux élevé de montée et dure quelques dizaines / centaines de microsecondes et sont Cette surtension peut provoquer des surtensions et des éclairs dans les angles vifs, entre phase et terre, au point le plus faible, la rupture de l'isolation gazeuse / liquide / solide, la panne d'un transformateur et des machines électriques tournantes.



Les Surtensions De Foudre

**Figure II.2** Surtension de foudre

Le taux de défaillance dû à la foudre (Figure II.2) et à la commutation a été minimisé par une coordination de l'isolation et un parafoudre appropriés (Figure II.3). Les différents types de dispositifs de protection sont installés sur le réseau pour intercepter les coups de foudre et minimiser le taux de crête de montée de la surtension atteignant l'équipement.



**Figure II.3** Surtension de commutation

### II.2.4 Niveaux de tenue de l'équipement

Le BIL (niveau d'isolation aux impulsions de base) est spécifié et d'autres niveaux de tenue sont ensuite sélectionnés à partir des tableaux pertinents fournis dans les spécifications standard. Les niveaux d'impulsion de base sont des niveaux de référence exprimés en tension de crête d'impulsion avec une onde standard ne dépassant pas 1,2 / 50  $\mu$ s. L'appareil / l'équipement doit être capable de résister aux ondes d'essai au-dessus de la BIL. [14]

Classe de référence kV	Niveau d'impulsion de base standard kV	Niveaux d'isolation réduits kV
23	150	aucun
34.5	200	aucun
46	250	aucun
69	350	aucun
92	450	aucun
115	550	450
138	650	550
161	750	650
196	900	aucun
230	1,050	900
287	1,300	1,050
345	1,550	1,300

**Tab II.1** le BIL pour différentes tensions de classe de référence (kV) [14]

#### II.3 Procédure de coordination des isolements

L'objectif de l'étude de coordination des isolements est de minimiser le risque de défaillance de l'équipement et de pannes dues à des surtensions dans la mesure du possible.

La procédure de coordination de l'isolement consiste en la sélection de la tension la plus élevée pour l'équipement avec un ensemble correspondant de tensions de tenue assignées standard qui caractérisent l'isolation de l'équipement nécessaire à l'application.

Il doit prendre en compte les facteurs qui influencent la résistance de l'isolation: la polarité des surtensions, la forme des ondes de surtension, le type d'isolation, les conditions atmosphériques (en cas d'isolation externe) et enfin l'état physique des équipements. La procédure proposée dans la norme [1] consiste à sélectionner le niveau d'isolation normalisé et à déterminer les distances dans l'air, à partir des tensions représentatives (surtensions) et des facteurs qui influent sur la résistance de l'isolation. La méthode de la coordination des isolements à appliquer dépendra des informations disponibles sur les surtensions. Les sections suivantes détaillent les principes des méthodes de la coordination des isolements et les étapes à suivre dans la procédure proposée par la CEI (Commission électrotechnique internationale) [12]

La procédure générale peut être résumée par les étapes suivantes pour la coordination de l'isolation:

## CHAPITRE II COORDINATION DES ISOLEMENTS

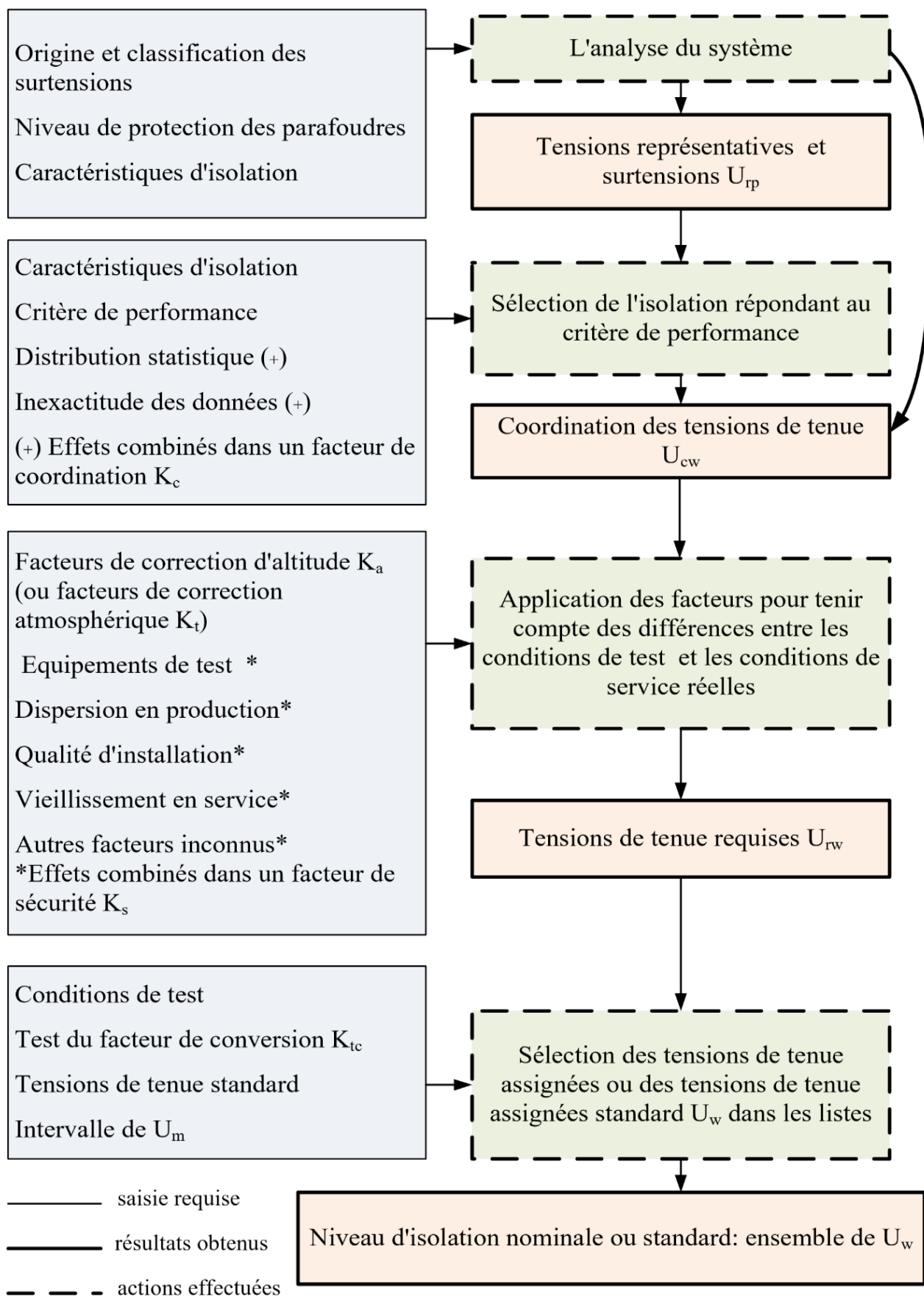


Figure II.4 Procédure de coordination des isolements [1]

#### II.4 Role des parafoudre sur la coordination des isolements

La coordination des isolements consiste à prendre une série de mesures afin d'empêcher des dommages sur le matériel électrique dus aux surtensions, et de localiser les amorçages (écoulement à terre des surtensions) en des points choisis où ils ne produiront aucun dommage.

En pratique, la coordination consiste à créer des corrélations entre la force de l'isolant de l'instrument et aussi les surtensions potentielles, de même que les caractéristiques des limiteurs de tension (éclateurs et parafoudres). Les résultats d'un événement d'isolement sont ensuite réduits à un niveau de probabilité approprié.

Dans cette optique, les risques de défaillance devraient être bien nuls pour les transformateurs et vraiment faibles pour l'isolation d'un jeu de barres de station, partout où les implications du contournement sont graves. En revanche, les contournements accidentels sont souvent tolérés sur la route d'un réseau fortement maillé, en particulier si la technique de réenclenchement rapide est utilisée. Les excellentes caractéristiques de limitation des surtensions obtenues avec les parafoudres à ZnO permettent de diminuer les surtensions à des niveaux nettement inférieurs à ceux obtenus avec les dispositifs conventionnels (éclateurs et parafoudres à  $20\text{-SiC}$ ).

Dans l'analyse de la coordination des isolements il est nécessaire de tenir compte de toutes les surtensions que le matériel est susceptible de supporter, et en particulier les surtensions de foudre et de manoeuvre. Dans ces conditions, les bonnes limitations de tension phase-terre obtenues avec les parafoudres à ZnO pourraient avoir un effet négligeable sur les surtensions phase-phase, car elles peuvent avoir des amplitudes similaires et des polarités opposées. Il en résulterait une tension phase-phase égale à deux fois la surtension phase terre [21].

La distribution de l'énergie électrique doit être réalisée dans un souci de qualité, afin de donner pleine satisfaction aux exigences de tous les usagers de l'électricité.

La qualité de service est souvent définie par :

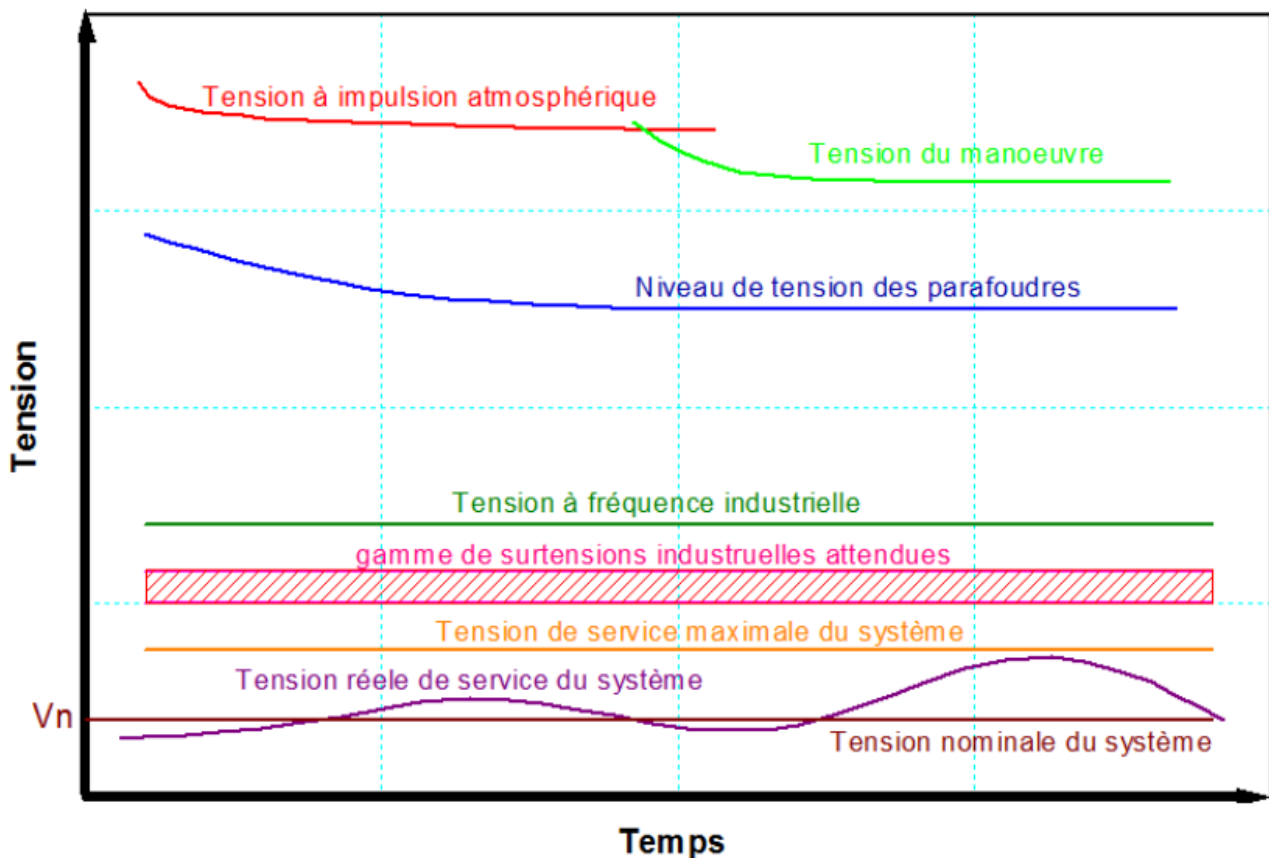
- la qualité du réglage de la fréquence et de la tension
- les anomalies dans la forme et l'amplitude des surtensions
- la continuité du service
- les creux de tension et les coupures brèves

L'amélioration que les parafoudres à ZnO peuvent apporter sur la qualité de service réside principalement dans le dernier point cité ci-dessus. Actuellement, les réseaux aériens,

sont normalement protégés contre les surtensions atmosphériques par des éclateurs. Ces dispositifs, ainsi que le réseau lui-même sont sensibles aux contraintes climatiques et aux éventuels agents externes, nuisibles à la qualité de service. Ils sont souvent le siège des défauts de très courte durée (défauts fugitifs), se traduisant par des coupures brèves.

### II.5 Coordination des isolements d'un équipement

Les critères généraux de coordination de l'isolement appliqués séparément à chaque équipement sont présentés au moyen d'une courbe tension-temps telle que présentée dans la figure II.5, les tensions impulsionnelles sont situées dans la partie supérieure de la figure, tandis que les courbes de tension de fréquence industrielle sont situées dans la partie inférieure, dans un ordre correcte pour la coordination des isolements [18]



**Figure II.5** Schéma général de coordination de l'isolement individuelle [18]

Lors de l'analyse des niveaux d'isolement, une distinction doit être faite entre l'isolement externe et l'isolement interne. Il est également nécessaire de faire la distinction entre l'isolement auto-régénératrice et l'isolement non auto-régénératrice, en fonction de sa réponse aux tests diélectriques. [12]

Dans le cadre de la coordination des isolements, le critère de l'amélioration de la protection des équipements les plus importants du système sera pris en compte, ce qui, dans le cas des postes, correspond au transformateur de puissance. Pour cela, des parafoudres spécifiques sont nécessaires. Pour le reste des équipements, il faut vérifier qu'ils s'intègrent bien dans la zone de protection des parafoudres existants. De plus, dans les postes qui contiennent des générateurs, l'utilisation de parafoudres spécifiques pour leur protection doit être définie par des études et des simulations appropriées [19].

#### II.6 Coordination des isolements d'une installation

La première étape consiste à déterminer la tension nominale dans les équipements ou dans l'installation à concevoir, en tenant compte des niveaux de protection fournis par les dispositifs de protection installés et de la valeur maximale de la tension du fonctionnement [1]:

- Pour les installations de type I (entre 1 kV et 245 kV), les surtensions temporaires et d'origine atmosphérique sont analysées
- Pour les installations de type II (>245 kV), les surtensions à fronts lents et d'origine atmosphérique sont analysées ;

L'équipement peut avoir une combinaison d'isolation interne et externe. Par exemple, les traversées de transformateurs et d'interrupteurs.

Le niveau d'isolation de base étant choisi, c'est-à-dire le niveau d'isolation attribué dont les tensions supportées normalisées sont associées à la tension de service la plus élevée selon la classification CEI.[12]

L'objectif ultime de la coordination des isolements est de déterminer la rigidité diélectrique minimale nécessaire de l'équipement et les dégagements pour obtenir un système électrique techniquement et économiquement acceptable, sur la base d'un taux de défaillance raisonnable adopté comme critère de conception du système. Par conséquent, pour les études de coordination de l'isolation, il est important de déterminer quel est le taux de défaillance acceptable ou la fiabilité souhaitée pour le système.

##### II.6.1 Coordination des isolements de la ligne

Pour la coordination des isolements des lignes, la tâche consiste à spécifier toutes les dimensions ou caractéristiques des pylônes de la ligne de transport ou de distribution qui affectent la fiabilité de la ligne[19]:

- Les distances ou dégagements entre le conducteur de phase et les côtés et la poutre supérieure de la tour mis à la terre.
- La longueur de la chaîne d'isolant.
- Le nombre et le type d'isolateurs.
- La nécessité et le type de mise à la terre supplémentaire de la tour.
- L'emplacement et le nombre de câbles aériens de mise à la terre ou de blindage.
- Le dégagement intermédiaire phase-sol.
- La distance ou le dégagement de frappe phase-phase.
- La nécessité, la valeur nominale et l'emplacement des parafoudres de ligne.

La conception des câbles de garde et de la mise à la terre sera imposée par les surtensions provoquées par la foudre, tandis que le niveau d'isolation à choisir dépendra des surtensions des manœuvres de commutation et de celles provoquées par la foudre. Le niveau de pollution peut être déterminant dans le choix des isolants. Enfin, l'installation de parafoudres dépendra des surtensions dues aux opérations et aux décharges atmosphériques, ainsi que la mise à la terre peut être réalisée, en fonction du type de masse sur laquelle la ligne est installée. Le choix des valeurs nominales des parafoudres dépendra de la tension permanente maximale à fréquence industrielle et des surtensions temporaires pouvant provenir de la ligne.[12]

#### II.6.2 Coordination de l'isolement dans les postes

L'étude de la coordination de l'isolement d'un poste de travail est multiplexée en raison du nombre et de la catégorie d'éléments examinés. Les objectifs des études des postes sont les suivants [19]:

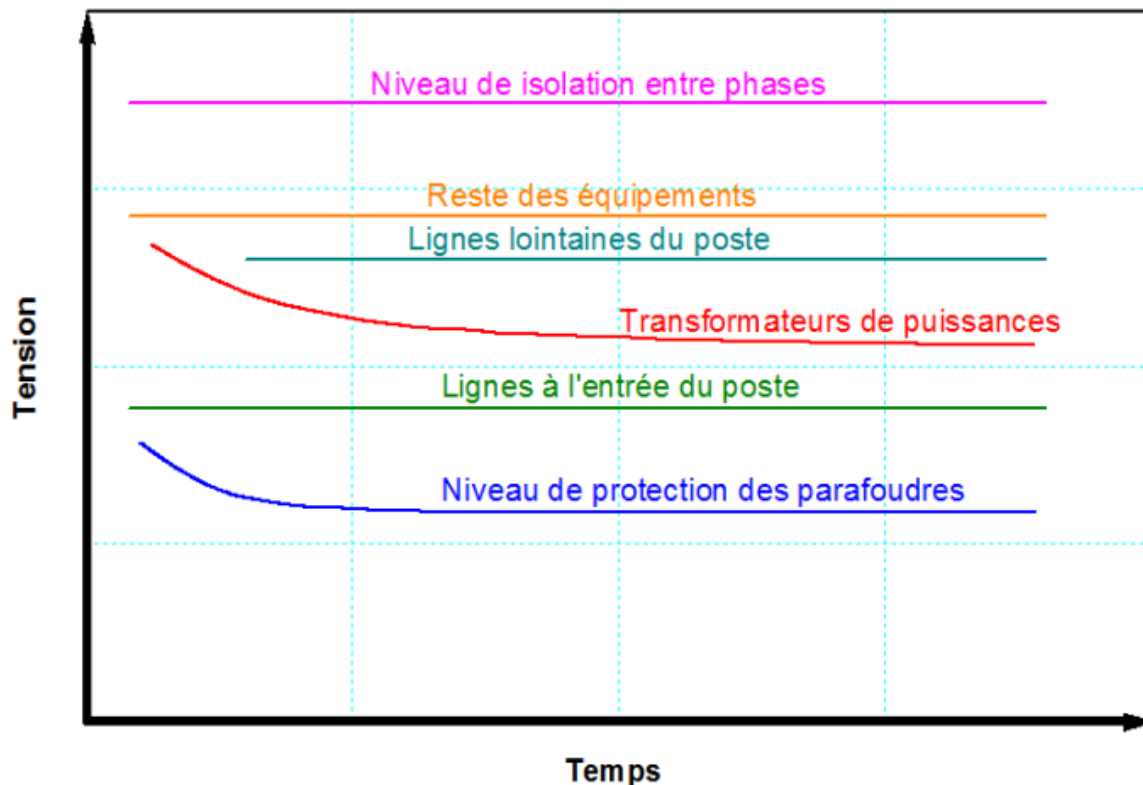
- La rigidité diélectrique (niveaux d'isolation, tensions de tenue) nécessaire aux différents équipements du poste.
- Les distances de dégagement phase-terre et entre phases.
- Le besoin et l'emplacement de les caractéristiques nominales des parafoudres.
- Le besoin et l'emplacement de la configuration des lacunes.
- Le besoin et l'emplacement des fils et /ou des mâts de terre.
- La nécessité d'améliorer le comportement des lignes aériennes reliées au poste, contre la foudre.

Comme dans les lignes aériennes, la notion de blindage sera infligée par les surtensions provoquées par la foudre, tandis que le niveau d'isolation à sélectionner

dépendra des surtensions de commutation et de celles provoquées par la foudre. Il sera également inévitable de prendre en considération le niveau de pollution dans le choix des isolants. Les surtensions provoquées par les décharges atmosphériques imposent le nombre et la position des parafoudres, leurs valeurs nominales seront choisies en fonction de la tension permanente maximale à la fréquence du réseau et des surtensions temporaires pouvant être générées dans le poste.

Les pannes des équipements d'un poste peuvent être provoquées, comme dans le cas des lignes aériennes, par des surtensions de manœuvre et d'origine atmosphérique, bien qu'elles puissent également être dues à certaines surtensions temporaires, telles que celles provoquées par une Ferro-résonance. L'effet d'une panne dans un poste peut être beaucoup plus important que dans une ligne aérienne. En tant que critère de conception, le temps moyen entre défaillances (qui correspond à l'acronyme anglais MTBF, Temps moyen entre les défaillances) est généralement utilisé. La valeur du MTBF dépendra de la technologie utilisée: pour les postes blindés au SF<sub>6</sub> (poste à isolation gazeuse également appelées GIS), on choisit généralement un MTBF compris entre 300 et 1000 ans, tandis que dans les postes avec isolation à l'air, la valeur du MTBF sera comprise entre 100 et 400 ans [19].

Les critères généraux de coordination des isolements applicables à un poste sont indiqués à la figure II.6. Le niveau d'isolation de l'appareil électrique, c'est-à-dire l'instrument le mieux protégé, est pris comme référence. Ensuite, la quantité d'isolation du reste de l'équipement est supérieure à celle du transformateur car cette isolation n'est pas directement protégée par des parafoudres.



**Figure II.6** Schéma général de la coordination des isolements pour un poste [18]

Pour les lignes reliées à la poste, deux isolations sont considérées, une meilleure valeur comme la ligne en tenant compte de sa distance à la poste et une valeur inférieure à la porte de la poste, ceci à cause des ondes d'impulsion sont déchargées vers le bas avant vers l'intérieur au poste. Le niveau de protection du parafoudre est toujours inférieur au niveau d'isolation des autres équipements et à l'isolation de la ligne. Enfin, le niveau d'isolation entre les phases est supérieur au niveau d'isolation entre phase et terre [18].

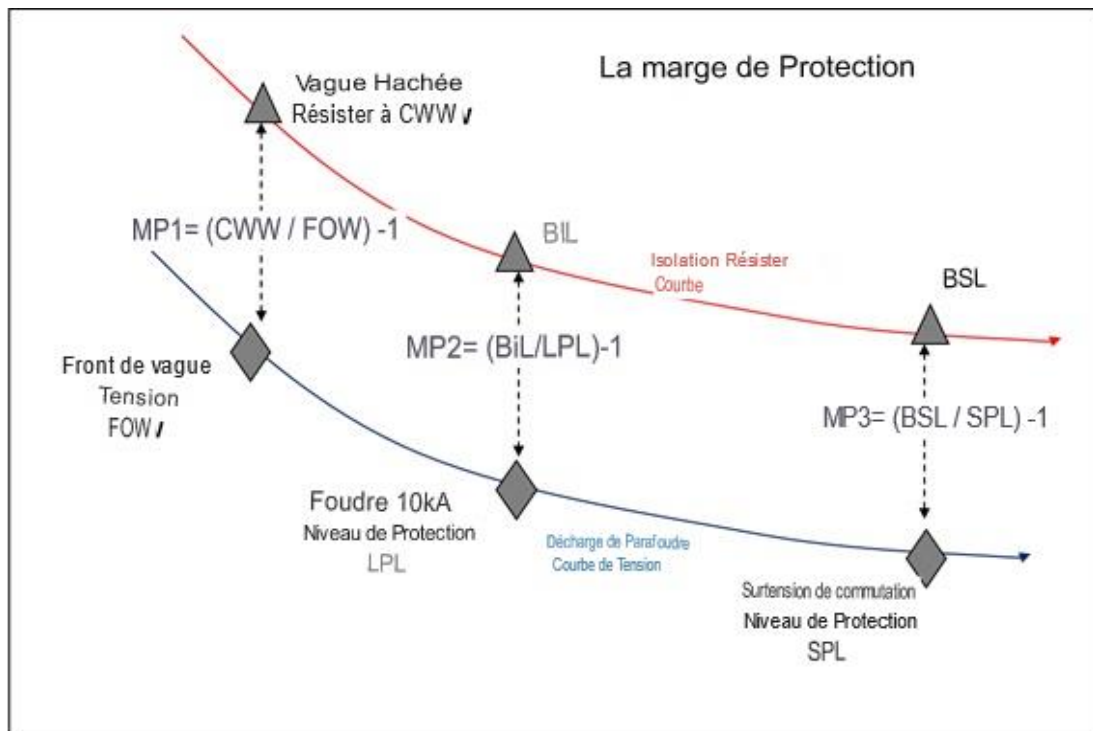
## II.7 Stratégie de coordination des isolements:

Il existe deux méthodes de coordination des isolements, conventionnelle et statistique. Leur application dépendra des informations disponibles sur le système ou l'installation à étudier et des informations permettant d'estimer les surtensions. [17] Les surtensions d'un réseau électrique à haute tension, principalement causées par des manœuvres et des décharges partielles, sont de nature mathématique appliquée et sont généralement caractérisées par une fonction de densité aléatoire.

### II.7.1 Méthode de la coordination conventionnelle

La méthode conventionnelle ou déterministe, s'applique lorsque la résistance minimale de l'isolation est égale ou supérieure aux contraintes de surtension maximales.

Afin d'éviter une défaillance de l'isolation, le niveau d'isolation des diverses variétés d'instruments connectés au système doit être supérieur à l'amplitude des surtensions transitoires qui apparaissent sur le système. L'amplitude des surtensions transitoires est parfois limitée à un niveau de protection par des dispositifs de protection. par conséquent, le niveau d'isolation doit être au-dessus du niveau de protection par une marge sûre telle que présentée dans la figure II.7, sans particularité, le niveau d'isolation par impulsions est établi à un prix 15-25% au-dessus du niveau de protection. [20]



**Figure II.7** Marge de protection et niveau de tenue d'isolement [20]

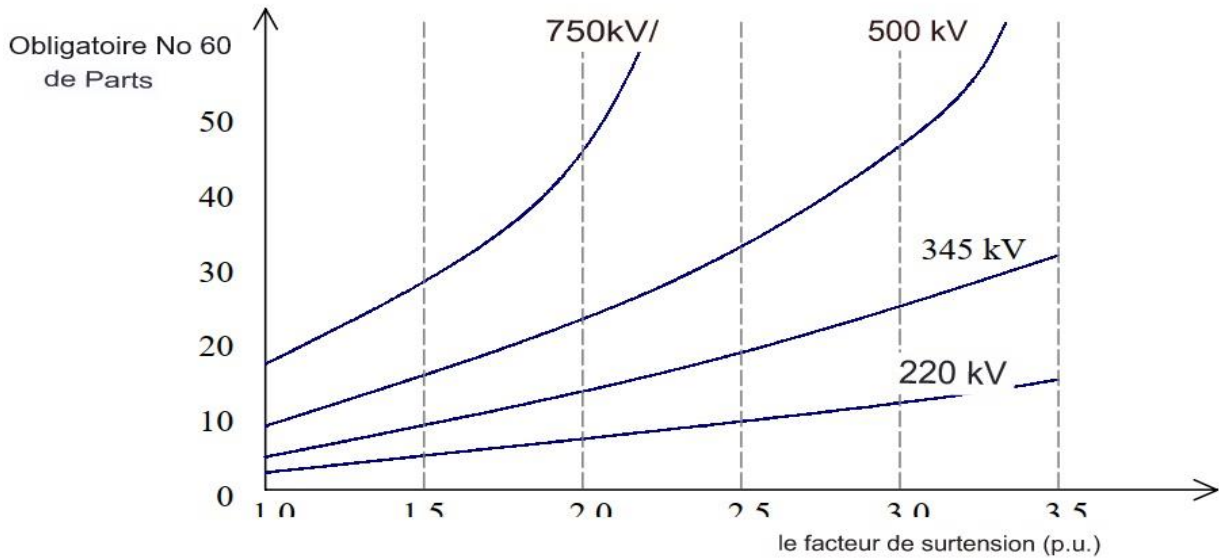
Un ensemble typique de caractéristiques pour la coordination de l'isolation par des méthodes conventionnelles, dans lequel les tensions de choc de foudre sont la principale source de défaillance de l'isolation. Pour les tensions de système plus élevées, l'approche simple utilisée ci-dessus est inadéquate. En outre, des considérations économiques imposent que la coordination de l'isolation soit placée sur une base plus scientifique.

### **II.7.2 Méthode de la coordination statistique**

La méthode de la coordination statistique consiste à sélectionner le niveau d'isolation en fonction d'un critère de fiabilité spécifique. Puisque la force d'isolation de l'air est de nature statistique. Aux tensions de transmission plus élevées, la longueur des chaînes d'isolateurs et les jeux dans l'air n'augmentent pas linéairement avec la tension mais

## CHAPITRE II COORDINATION DES ISOLEMENTS

approximativement à V1.6 Le nombre requis d'unités de suspension pour différents facteurs de surtension est indiqué telle que présentée dans la figure II.8.



**Figure II.8** - Exigence du nombre d'unités pour différentes tensions

Dans une étude statistique, ce qu'il faut savoir, ce n'est pas la surtension la plus élevée possible, mais la distribution statistique des surtensions. La probabilité de surtension de commutation dans une ligne typique est indiquée. On voit que la probabilité de surtension diminue très rapidement. Ainsi, il n'est pas économique de fournir une isolation au-dessus d'une certaine valeur de surtension. En pratique, la caractéristique de distribution des surtensions est modifiée par l'utilisation de résistances de commutation qui amortissent les surtensions de commutation ou par l'utilisation de parasurtenseurs réglés pour fonctionner sur les surtensions de commutation les plus élevées. Dans de tels cas, la probabilité de défaillance serait extrêmement faible.

A partir de là, on peut conclure que la méthode statistique de la coordination des isolements, contrairement à la méthode déterministe, permet d'estimer le taux de défaillance en fonction des facteurs de conception à l'aide de méthodologies plus complexes et des études plus élaborées. Cependant, un bon nombre des procédures appliquées combinent les deux méthodes. Par exemple, certains facteurs utilisés dans la méthode déterministe ont été dérivés d'expériences statistiques et certaines considérations statistiques peuvent être omises dans la méthode statistique, faisant ainsi d'une méthodologie hybride. [12]

## **II.8 Conclusion**

Ce chapitre a traité des points fondamentaux et nécessaires pour les études de coordination des isolements. Ce procédé permet d'obtenir un ensemble de tensions de tenue qui établissent le niveau d'isolation à spécifier dans l'équipement du poste. Il a été démontré et le rôle de parafoudre sur coordination des isolements que l'une des difficultés majeures de la coordination d'isolement réside dans le fait incontestable que les contraintes des tensions appliquées à l'instrumentation ainsi que les résistances isolantes de ces équipements sont de nature probabiliste, cette incertitude rend difficile la régulation des forces de l'isolant pour être spécifique en tant que réalisation des contraintes. Pourtant, nous avons conclu que la méthode statistique de coordination de l'isolation évalue le taux de défaillance en fonction des facteurs du modèle.

## **Chapitre III**

**Modélisation des éléments du  
système et les modèles pour la  
coordination des isolements**

#### III.1 Introduction

Les surtensions dues à la foudre sont les plus gênantes et les sous-stations d'appareils électriques les plus restrictives sont soumises en raison de la haute fréquence impliquée. La coordination d'isolement du poste très haute tension est nécessaire et il faut s'assurer de la bonne tenue diélectrique des éléments de la chaîne du système électrique. Ces éléments ont des niveaux d'isolement fondamentaux (BIL) différents.

La coordination des isolements nécessite une prédiction correcte des surtensions en différents points d'un poste de transformation du point de vue protection des équipements. Pour cet objectif, un des aspects les plus importants est de considérer les caractéristiques dynamiques des parafoudres à ZnO.

Les spécifications utilisées pour modéliser la ligne de transmission (conducteurs de phase, câble de garde et pylône.....etc) telles que les caractéristiques géométriques et électriques sont résumées dans les sections suivantes.

**III.2 Modélisation des lignes de transmission**

La ligne foudroyée est représentée par des modèles multi-phases en considérant la nature distribuée de ses paramètres et leur dépendance en fonction de la fréquence. Les conducteurs de phase et les câbles de garde sont explicitement modélisés entre les pylônes et seulement quelques portées sont considérées. Les données nécessaires au modèle de la ligne sont la configuration géométrique des conducteurs, leurs diamètres, géométries des faisceaux, etc. La ligne est considérée de longueur infinie du côté opposé. Cela évitera les réflexions aux extrémités de la ligne. (Tableau III.1).

	Type	Rext (mm)	R <sub>0</sub> (Ω/km)	Nombre de fils	Diamètre d'un fil (mm)	Distance entre conducteurs élémentaires (cm)
<b>Conducteur de phase</b>	Almélec 2 x 570 mm <sup>2</sup>	15,525	0,0523	61	3,54	50
<b>Câble de garde</b>	Fibre optique – OPGW 185mm <sup>2</sup>	9.92	0.185	-----	-----	-----

**Tab III.1** Caractéristiques des conducteurs de la ligne [36]

La figure III.1 représente à la fois la géométrie de la ligne et le modèle du pylône. Les distances de la configuration de cette ligne sont indiquées sur la figure, on souligne que les valeurs entre parenthèses représentent les hauteurs des conducteurs au milieu de la portée. La distance entre les conducteurs élémentaires constituant une phase est égale à 50 cm. [36]

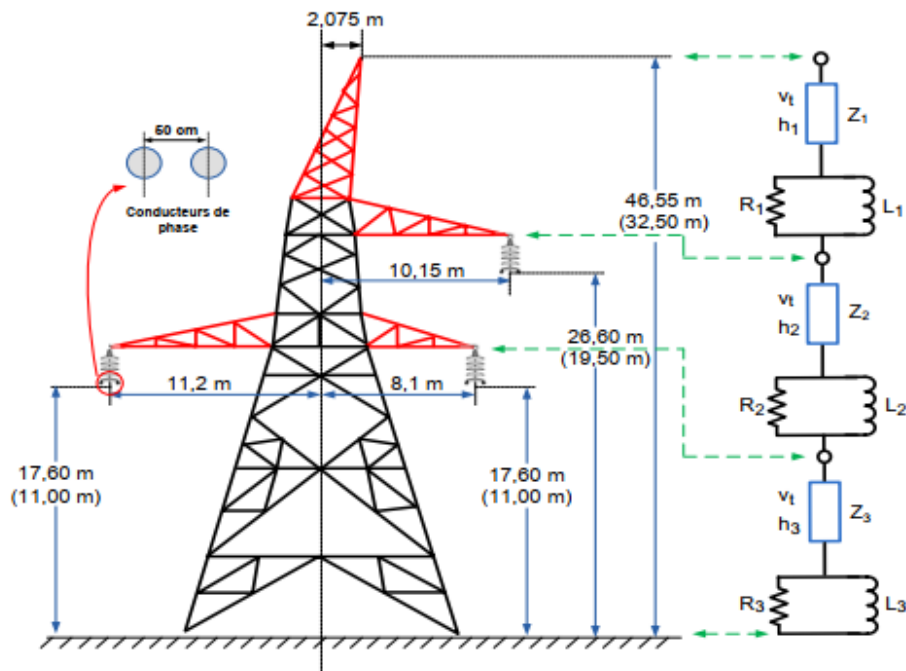


Figure III.1 Modèle multi-étages du pylône

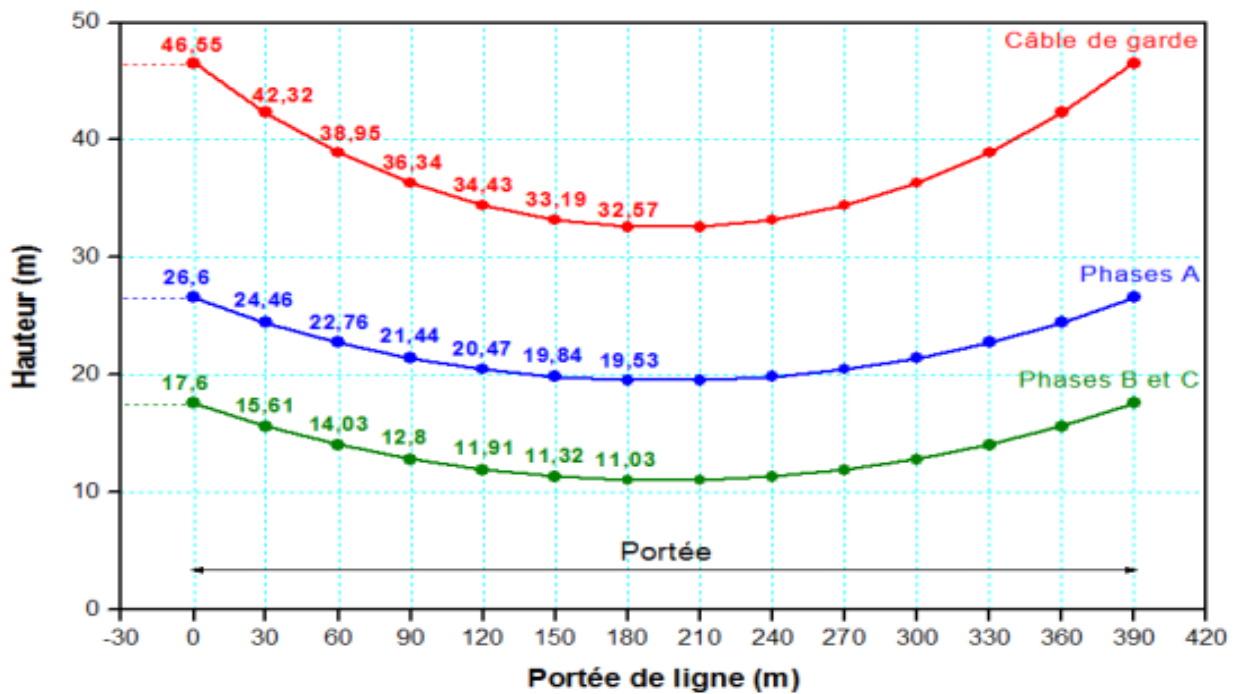


Figure III.2 Concaténation des conducteurs

La concaténation des conducteurs de phases et de garde (Figure III.2) est prise en considération dans la modélisation de la ligne de transmission.

#### III.3 Modélisation et représentation des pylônes

Les pylônes sont des supports qui portent les câbles de garde et les conducteurs de phase par les isolateurs (figure III.3). Les pylônes des lignes haute tension sont constitués des éléments tels que les bras horizontaux, verticaux et inclinés. De plus, en générale les bras sont modélisés par la théorie des lignes de transmissions composé d'une résistance, d'une impédance, d'une capacité et ou d'une admittance. Ils relient le câble de garde à la terre pour écouler une partie du courant en cas de défaut.



Pylône 220 kV

Pylône 400 kV

**Figure III.3** Photos réelle des pylônes utilisés

Ces derniers peuvent être de type :

- D'arrêt qu'on trouve juste à la sorte du poste et à chaque extrémité du canton (toutes les portées existes enter deux pylônes d'arrêt), le conducteur de phase est porté par une chaîne d'isolateur quelque soit sa forme (chapeau, en V, ou simple), les deux partie de conducteur sont reliées par une bretelle qui assure la conductivité des charge.
- D'alignement utilisé dans la partie de la ligne de transport sans angle. La phase est portée par une seule chaîne d'isolation montée verticalement.

- D'angle utilisé dans la partie où il est nécessaire de changer la direction de la ligne. Le conducteur de phase est porté par deux chaînes d'isolation [22].

Ce modèle est adopté et est composé de trois sections qui représentent les parties entre les bras du pylône (Figure III.1). Chaque section est modélisée par une ligne monophasée sans perte en série avec un filtre R-L, il est utilisé pour atténuer les ondes transitoires. Afin de pouvoir utiliser ce modèle, on a besoin d'introduire pour la ligne monophasée la vitesse de propagation du courant, généralement de l'ordre 300 m/μs et les impédances Z1, Z2 et Z3 prises égales à 220Ω, 220Ω, et 150Ω respectivement. Les paramètres des éléments des filtres peuvent être déterminés de la manière suivante [III.1, III.2, III.3, III.4]:

$$R_i = \frac{-2Z_i \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2} h_i, \quad i = 1, 2 \quad \text{III.1}$$

$$R_3 = -2Z_i \ln \sqrt{\gamma} \quad \text{III.2}$$

$$L_i = \frac{\alpha R_i 2H}{V_t}, \quad i = 1, 3 \quad \text{III.3}$$

$$H = \sum_{i=1}^3 h_i \quad \text{III.4}$$

L'impédance caractéristique [23, 24] peut être calculée par :

$$Z_t = 60 \left[ \ln \left( \sqrt{2} \cdot \frac{2H}{r} \right) - 1 \right] \quad \text{III.5}$$

avec :

$R_i$  : Les résistances des tronçons en [Ω] ;

$L_i$  : Les inductances des tronçons en [H] ;

$V_t$  : La vitesse de propagation [m/s] ;

$\alpha$  : Le coefficient d'amortissement de l'inductance. Il est généralement pris égal à l'unité;

$\gamma$  : Le coefficient d'atténuation de la résistance, sa valeur peut être prise égale à 0.8;

$H$  : La hauteur totale du pylône [m] ;

$h_i$ : Les hauteurs des tronçons du pylône.

$r$  : est la distance horizontal au haut du pylône.

**III.4 Modélisation de la résistance de terre**

Le modèle de la résistance des pieds du pylône est l'un des principaux paramètres qui influent sur le taux d'amorçage. C'est également un paramètre important pour la limitation des occurrences des surtensions à front rapide, il existe plusieurs types de modèles pour la résistance des pieds du pylône. Les plus utilisés sont les modèles simples et non-linéaires. Un modèle efficace de l'impédance des pieds du pylône ou de terre (figure III.4), doit prendre en considération la dépendance de cette résistance en fonction du courant de décharge. Il est accepté que cette résistance soit non linéaire et suit la loi donnée par :

$$R_t = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad \text{III.6}$$

Dans cette équation :

$R_0$  : Résistance de terre à faible courant et faible fréquence ( $\Omega$ ).

$R_t$  : La résistance actuelle de la terre ( $\Omega$ ).

$I_g$  : La valeur seuil du courant suffisante pour commencer l'ionisation du sol (A).

$I$  : Le courant de foudre à travers le pylône (A).

L'expression du courant d'ionisation  $I_g$  est donnée par :

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{E_0 \rho}{R_0^2} \quad \text{III.7}$$

Avec :

$\rho$  : La résistivité de sol.

$E_0$  : Le champ d'ionisation du sol (de 300 à 400 kV/m)

Dans ce modèle la résistance des pieds de pylône sont représentée par une résistance non linéaire type-91 dans lequel les équations III.6 et III.7 sont implantées.

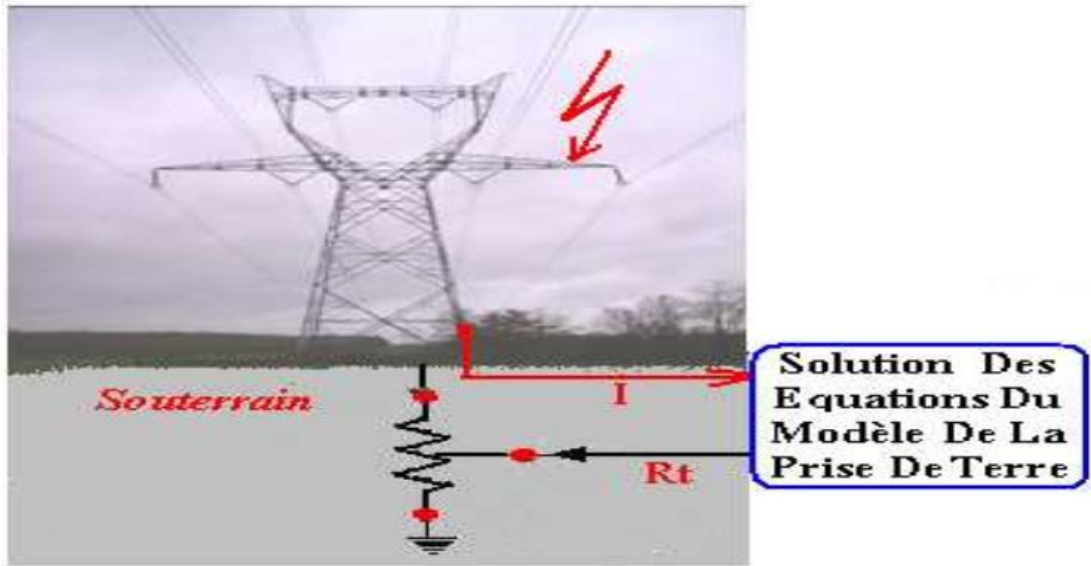


Figure III.4 Modèle de la résistance de terre

La figure III.5 présente la caractéristique de la résistance de terre en fonction de la décharge du courant de foudre

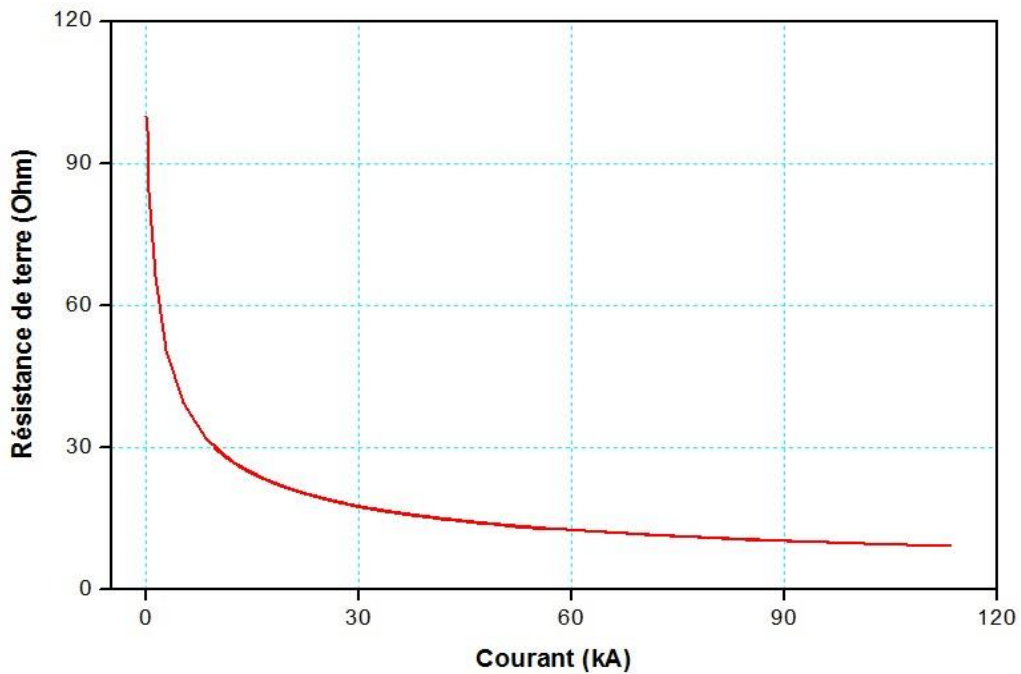


Figure III.5 Caractéristique non-linéaire de la prise de terre

**III.5 Amorçage des isolateurs.**

La fonction principale des isolateurs est d'assurer l'isolement des conducteurs sous tension par rapport à des masses qui sont généralement chargées du rôle de support. Leurs caractéristiques dépendent en particulier [23] :

- de la tension nominale du réseau;
- du courant de court-circuit du poste ;
- des caractéristiques mécaniques recherchées;
- de la sévérité de pollution du site.

La tension d'amorçage de l'isolateur peut être calculée en utilisant l'équation (III.8) L'amorçage de l'isolateur aura lieu au moment où la tension à ses bornes dépasse la tension critique d'amorçage. [20]

$$V_{fo}(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right) \cdot W \quad \text{III.8}$$

Où:

$V_{fo}$  : La tension d'amorçage en [kV].

$W$  : La longueur totale de chaîne des isolateurs [m].

$t$  : Temps de l'amorçage [ $\mu$ s].

**III.6 Modélisation des jeux de barres**

La figure III.6 présente une photo réelle des jeux de barres utilisés dans les postes de transformations. Ces jeux de barre omnibus sont de type AGS x/y, (x (diamètre extérieur)  $\times$  y (diamètre intérieur) en [mm]) qui contient, outre l'aluminium, 0.6% de silicium et 0.7% de magnésium, leurs flèche est négligeable [25]. Ils sont représentés par des tronçons de lignes type Clark triphasées.



**Figure III.6** Photo réelle d'un jeu de barre 225 KV

#### III.7 Modélisation des parafoudres

La modélisation du parafoudre en domaine fréquentiel est bien connue. Les auteurs ont conclu plusieurs travaux dans un modèle pour représenter la caractéristique dynamique du parafoudre ZnO en général. Nous présenterons les nombreux modèles (circuits équivalents) proposés dans la littérature pour décrire ces phénomènes dynamiques en faisant une étude explicative de quelques modèles. [22]

##### III.7.1 Modèle conventionnel ou à résistance non-linéaire.

Le but de l'étude transitoire est de valoriser et d'évaluer le ZnO. Un modèle du parafoudre à oxyde métallique convenable pour ces études pourra être une résistance non-linéaire.

Une résistance non-linéaire (figure III.7) n'a pas les mêmes formes de tension et de courant quand elle fonctionne dans le domaine non-linéaire, mais on préfère généralement utiliser la résistance non linéaire dont la variation est exponentielle

$$i = p \left( \frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad [kA] \quad \text{III.9}$$

Dans cette équation :

- **i**: le courant du parafoudre en (kA);
- **v**: la tension aux bornes du parafoudre en (V) ou (kV);
- **p**, **q** et  **$V_{ref}$** : des constantes propres de l'appareil.

Nous avons remarqué que  $V_{ref}$  est la tension de référence peut être choisie arbitrairement et a pour fonction de normaliser l'équation (III.9) et prévient les débordements numériques pendant l'exponentiation. Les paramètres p et q sont uniques pour l'appareil. Le premier segment de l'appareil est linéaire.



Figure III.7 Modèle à résistance non-linéaire.

### III.7.2 Modèle de Tominaga et al.

La caractéristique dynamique de ce modèle (figure III.8) est introduite similairement à l'effet d'hystérésis à travers l'ajout d'une inductance série L. La valeur de cette inductance peut être estimée une fois que le courant du parafoudre est approximativement connu en utilisant de la méthode Essai-Erreur.

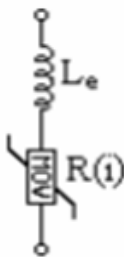


Figure III.8 Modèle à inductance linéaire [37].

III.7.3 Modèle proposé par W. Breilmann.

En 1987 Breilman propose un modèle de parafoudre pour les études en présence de contraintes transitoires rapides (figure III.9). Dans ce modèle, la résistance non-linéaire totale est divisée en trois résistances non-linéaires  $A_0$ ,  $A_1$  et  $A_2$  qui peuvent être dérivées à partir des caractéristiques statiques V-I et calculé par des formules. Ces résistances sont séparées par des filtres passe bas. Les paramètres  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ , et  $L_0$  sont proportionnels à la hauteur du parafoudre et déterminées par des formules empiriques. Les autres paramètres  $R_0$ ,  $C_p$  et  $Z$  sont utilisés seulement pour but de stabiliser la procédure d'intégration numérique. [38]

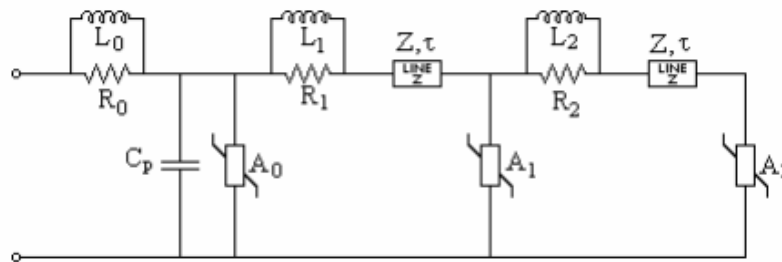


Figure III.9 Modèle de W. Breilmann [38]

III.7.4 Modèle de Ozawa et al.

Ce modèle représente la caractéristique tension-courant non-linéaire pour le courant nominal (figure III.10). Le circuit parallèle  $R_1$ ,  $L_1$  représente le retard de conduction observé dans le comportement du parafoudre. La capacitance  $C_1$  et l'inductance  $L_2$  désignent la capacitance propre et l'inductance résiduelle des éléments de parafoudre à oxyde métallique. [39]

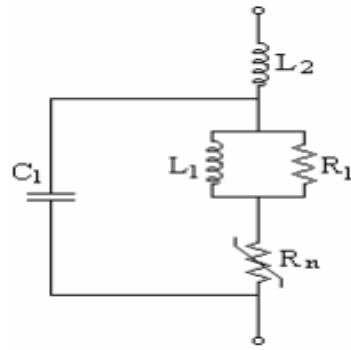


Figure III.10 Modèle de Ozawa [39]

### III.7.5 Modèle proposé par T. Hagiwara et al.

Ce modèle est montré dans la figure (III.11). Il se compose d'une inductance linéaire  $L_r$  représentant l'épaisseur de la varistance ( $1\mu\text{H/m}$ ) en série avec une résistance non-linéaire  $R_n$  simulant la caractéristique V-I statique de la varistance, le tout en série avec une source de tension  $V_n$  qui a pour objectif de représenter la caractéristique d'une différence de tension entre les formes  $8/20\mu\text{s}$  et  $1/2,5\mu\text{s}$ . Cette différence peut prendre une forme exponentielle. [40]

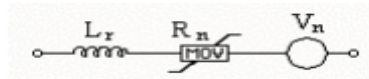


Figure III.11 Modèle proposé par Hagiwara et al [40]

### III.7.6 Modèle recommandé par le groupe IEEE

Dans ce modèle (figure III.12) la caractéristique non linéaire (V-I) du parafoudre est présentée deux sections non – linéaires séparées par un filtre R-L, nous avons deux situations:

- Pour les contraintes lentes, l'impédance des filtres R-L est extrêmement faible et par suite les résistances du modèle sont pratiquement connectées en parallèle.

## CHAPITRE III

### Modélisation des éléments du système et les modèles pour la coordination des isolements

- Pour les ondes très rapides l'impédance des filtres R- L deviennent plus importante et de ce fait les courants à haute fréquence sont forcés par les filtres R-L à circuler plus dans la section désignée par A0 que dans la section désignée par A1.

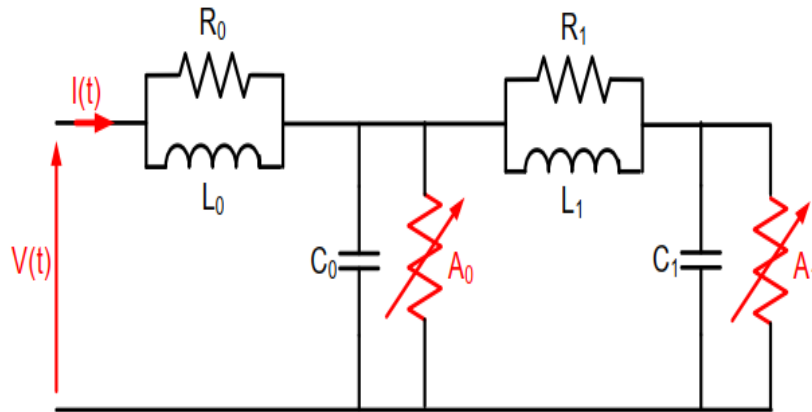


Figure III.12 Modèle IEEE du parafoudre.

Selon la 1ère approche, les paramètres sont estimés dans une première étape en utilisant les équations suivantes :

$$L_1 = 15 * \frac{X}{n} \quad [\mu H] \quad \text{III.10}$$

$$R_1 = 65 * \frac{X}{n} \quad [\Omega] \quad \text{III.11}$$

$$L_0 = 0.2 * \frac{X}{n} \quad [\mu H] \quad \text{III.12}$$

$$R_0 = 100 * \frac{X}{n} \quad [\Omega] \quad \text{III.13}$$

$$C = 0.2 * \frac{n}{X} \quad [pF] \quad \text{III.14}$$

Avec :

$X$  : est la longueur totale de parafoudre à oxyde métallique en mètre.

$n$  : est le nombre de colonnes en parallèle des parafoudres à oxyde métallique.

$L_0$ : Représente l'inductance associée avec le champ magnétique dans le voisinage immédiat des parafoudres.

$R_0$ : La résistance utilisée pour stabiliser l'intégration numérique.

$C$  : Représente la capacité totale du parafoudre.

**III.8 Le modèle électro-géométrique**

Le modèle électro-géométrique (MEG) est composé d'un ensemble d'outils de décision qui permettent de calculer la probabilité qu'un coup de foudre tombant sur une ligne de transmission aérienne. En outre, il détermine le point d'impact pour le stade final du coup de foudre. Plusieurs approches ont été utilisées au cours des dernières décennies. Le modèle présenté dans cette section est une approximation hybride incluant l'approche traditionnelle présentée par IEEE et une interprétation sphérique en 3D pour la décision finale [20].

L'analyse est commencée en prenant en considération une portée de ligne, puis on généralise l'étude sur toute la ligne. Lors d'un événement de foudre, la première décision prise par le modèle électro-géométrique est le point d'impact du coup de foudre. Par conséquent, le modèle doit décider si le coup de foudre est dirigé vers les pylônes de transmission, vers la portée de ligne ou se termine sur la terre. Pour prendre cette décision, des zones d'attraction pour les conducteurs et pour la terre sont imposées ; elles sont déterminées en se basant sur le rayon théorique qui est en fonction de l'amplitude du courant de foudre [12].

Les expressions utilisées pour calculer les rayons théoriques pour déterminer les distances d'amorçage sont [20]:

$$r_c = \alpha I^\gamma \qquad r_g = \beta I^\delta \qquad \text{III.15}$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\delta$  sont des constantes qui dépendent de l'objet et est le courant de crête de la foudre ;

$r_c$ : est le rayon théorique créé par le champ autour des conducteurs des phases et le câble de garde en [m] ;

$r_g$ : est le rayon théorique créé par le champ du plan horizontal du sol en [m] ;

$I$  : Amplitude du courant de coup de foudre en [kA].

Le tableau III.2 résume les expressions les plus utilisées.

Auteur	Distance d'amorçage au conducteur de phase et de câble garde (m)	Distance d'amorçage au sol (m)
Wagner [27]	$r_c = 14.2 * I^{0.42}$	$r_g = 14.2 * I^{0.42}$
Young [29]	$r_c = 27 * I^{0.32}, h < 18m$ $r_c = \frac{444}{462-h} 27 * I^{0.32}, h > 18m$	$r_g = 27.0 * I^{0.32}$
Brown & Whitehead[29]	$r_c = 7.1 * I^{0.75}$	$r_g = 6.4 * I^{0.75}$
Love [30]	$r_c = 10 * I^{0.65}$	$r_g = 10 * I^{0.65}$
Anderson and IEEE-1985 [16][ 31]	$r_g = 8.0 * I^{0.65}$	$r_g = 8.0 * \beta I^{0.65} \begin{cases} \beta = 0.64, UHV \text{ lignes} \\ \beta = 0.8, EHV \text{ lignes} \\ \beta = 1 \text{ pour autre} \end{cases}$
IEEE Std. 1243 [32]	$r_c = 10.0 * I^{0.65}$	$r_g = [3.6 + 1.7 \ln(4.3 - h)] * I^{0.65}, h < 40m$ $r_g = 5.5 * I^{0.65}, h > 40m$
Mousa & IEEE-1995 Substations Committee [33][ 34]	$r_c = 8.0 * I^{0.65}$	$r_g = 8.0 * I^{0.65}$
Eriksson [35]	$r_c = 0.67 * h^{0.65} * I^{0.75}$	None

Tab III.2 Expressions pour les distances d'amorçage [20]

#### III.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation de différents éléments du poste de transformation, et les lignes de transmission alimentant ce poste. La modélisation des différents éléments de la ligne de transmission est essentielle pour étudier un système électrique, les chercheurs ont développé plusieurs modèles avec des équations mathématiques système électrique, Ces éléments ont nécessité dans cette partie du chapitre une modélisation des différentes approches rencontrés dans la littérature.

**CONCLUSION**  
**GÉNÉRALE**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Les parafoudres à oxyde métallique ZnO sont les moyens de base utilisés pour la protection contre les surtensions transitoires. Leur principe consiste à écrêter la surtension en gardant la tension à leurs bornes égale au niveau de protection supporté par le matériel. Les parafoudres doivent être installés le plus près possible de l'appareillage à protéger.

Les effets du courant de foudre avec la position du point d'impact doivent être pris en considération dans les études de la protection contre les surtensions et de coordination des isolements. En outre, une protection efficace et convenable exige que le parafoudre soit installé le plus proche du transformateur.

Le travail exposé dans cette thèse concerne l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres à oxyde métallique ZnO.

Dans le présent travail, nous avons présenté en premier lieu les contraintes de surtension que le système électrique peut subir ainsi que les moyens employés pour assurer sa protection telle que le parafoudre à oxyde métallique. De plus nous avons présenté des informations généralités concernant le thème pour mieux comprendre le but de ce travail.

Dans la deuxième partie nous étudions les généralités de la coordination des isolements puis ses procédures et méthodes, La coordination des isolements vise à trouver un juste équilibre entre la fiabilité des matériels du point de vue diélectrique d'une part et de leur dimensionnement, donc de leur coût, d'autre part, Le processus de la coordination des isolements permet d'obtenir un ensemble de tensions de tenues qui constituent le niveau d'isolation normalisé à spécifier dans les équipements du poste. Cependant, il a été conclu que la méthode statistique de la coordination des isolements permet d'estimer le taux de défaillance en fonction des facteurs de conception.

Dans la dernière partie, la modélisation de différents éléments du poste de transformation et les lignes de transmission qui l'alimentent a été présentée, une modélisation correcte et adéquate de ces caractéristiques est très importante pour les études de coordinations des isolements et de la fiabilité des systèmes.

Nous espérons que notre travail sera utile pour les futures promotions.

## Références Bibliographiques

---

- [1] Louis-Jonardan Gallin, “Caratérisation acoustique des éclairs d’orage”, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, Paris, 2014
- [2] Benoît de Metz–Noblat, “La foudre et les installations électriques HT”, Cahier Technique Merlin Gerin, N° 168 / p.5, édition juillet 1993.
- [3] P.Alto, “Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above”, Second Edition, Electric Power Research Institute, California, 1982.
- [4] J.Affolter, “Haute Tension”, IEVD (école d’Ingénieurs du Canton de Vaud) Yverdon-lesBains, Octobre 2000.
- [5] F. Maciela, “Parafoudres”, Technique de l’ingénieur, [D4755], 1998
- [6]- Frédéric Maciela : Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension HTB, Technique de l’Ingénieur D4755v2.
- [7] Christophe Séraudie, “Surtensions et parafoudres en BT-coordination de l’isolement en BT-” Cahier Technique Merlin Gerin, N° 179 / p.15, édition septembre 1995
- [8] : Manuel SERRANO : « Etude du comportement électrique et thermique de parafoudres à Oxyde de Zinc » thèse de doctorat 1988.
- [9] : F. MACIELA, "Parafoudres à moyenne tension HT et à haute tension HTB," Technique de l’ingénieur, vol. 2, pp. D4755-1-D4755-11, 2009
- [10] R. Karhik, "A novel analysis of voltage distribution in zinc oxide arrester using finite element method,"International Journal of Recent Trends in Engineering, vol. 1, no. 4, May 2009.
- [11] "Céramiques à base d'oxyde de zinc utilisées dans les parafoudres des réseaux à moyenne, haute et très haute tension," EDF/Centre de Normalisation rapport scientifique, 1990.
- [12] S. BEDOUI, "Contribution à l’étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l’emploi de parafoudres ZnO," Eelectrotechnique, Université FERHAT Abbas Sétif thèse de doctorat, 2018
- [13] BS EN 60071-1: 1996, IEC 71-1: 1993, Insulation-Co-ordination part 1: Definition, principles and rules.
- [14] J.B. Gupta. “A course in Electrical Power”, S.K. Kataria Part III pp 457 – 463, 2007-08.

## Références Bibliographiques

---

- [15] D. Fulchiron, “Overvoltages and insulation coordination in MV and HV”, Cahier Technique Merlin Gerin, N° 151 / p.3, édition Février, 1995.
- [16] P.Alto, “Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above”, Second Edition, Electric Power Research Institute, California, 1982.
- [17] BS EN 60071-2, “Insulation Co-ordination part 2, Application Guide”, 1997.
- [18] AYORA Paúl, “Selección y Coordinación de Aislamiento, Diseño de Alto Voltaje”, Quito, Clases Dictadas, 2008.
- [19] Tomasz Chmielewski, Akram Abdel-Latif, “Coordination de l’isolement dans les postes à haute tension”, ABB REVIEW, 2017.
- [20] A. R. Hileman. “ Insulation Coordination for Power Systems”. CRC Press, Taylor and Francis group pp 11 – 13, 1999.
- [21] K. H. WECK " Principles and Procédures of Insulation Coordination", IEE PROCEEDINGS, Vol. 134, No. 2, March 1987.
- [22] Samir Bedoui, Abdelhafid Bayadi, « Atténuation des surtensions dans les postes de transformation haute tension par l’emploi des parafoudres ZnO », 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP’2007, Sétif, 03-04 November 2007.
- [23] J. G. Anderson, Surge impedances of shield wires and voltage coupled to the phase conductors, Transmission line reference book 345 kV and above, second edition, Appendice 12.3, pp 578-589, 1982.
- [24] J. G. Anderson, Lightning Performance of Transmission Lines, Transmission line reference book 345 kV and above, second edition, pp 545-578, 1982.
- [25] SONELGAZ, “Jeux de barres ”, Cahier de charge, 2004.
- [26] A.Bayadi, K.Zehar, S.Semcheddine, R.Kadri, “A Parameter Identification Technique for Metal Oxide Surge Arrester Model Based on Genetic Algorithms”, Wseas Transactions on Circuit and Systems, Issue A, Vol. 5, April 2006.
- [27] C. F. Wagner and A. R. Hileman, “The Lightning Stroke II”, IEEE Transactions on Power Apparatus System, pp. 622-642, 1961.
- [28] F. S. Young, J. M. Clayton, and A. R. Hileman, “Shielding of Transmission Lines”, American Institute of Electrical Engineers Transaction, pp. 132-154, 1951

## Références Bibliographiques

---

- [29] G. E. Brown and E. R. Whitehead, “Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding II”, IEEE Transactions on Power Apparatus System, pp. 617-626, 1969.
- [30] E. R. Love, “Improvements on the Lightning Stroke Modeling and Application to Design of EHV and UHV Transmission Lines”, M.Sc. thesis, University of Colorado, 1973.
- [31] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, “A Simplified Method for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Apparatus System, pp. 919-932, 1985.
- [32] IEEE Working Group, “Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines II updates to Analytical Models”, IEEE Transactions on power Delivery, pp. 1254-1267, 1993.
- [33] A. M. Mousa and K. D. Srivastava, “A Revised Electrogeometric Model for the Termination of Lightning Strokes on Grounded Objects”, Proceedings of International Aerospace Conference on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, pp. 342-352, 1988.
- [34] IEEE Standard 998-1996, “IEEE Guide for Direct Stroke Shielding of Substations”.
- [35] A. J. Eriksson, “An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis,” IEEE Transactions on power Delivery, pp. 871-886, 1987
- [36] Sonelgaz Engineering Subcommittee, “Specifications for the Construction of HV Electrical Substations”, 2004.
- [37] IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1997.
- [38] IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1991.
- [39] IEEE Std C62.11, IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating Current power circuits, 1993.
- [40] BS EN 60099-1, IEC 60099-1(1991), incorporating amendment n°1 Surge arresters — Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems, 1994