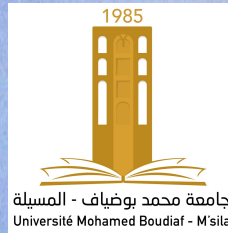


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur
et de la recherche Scientifique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER

SPÉCIALITÉ :
RESEAUX ELECTRIQUES

**ETUDE DES PERFORMANCES DES PARAFODRES ET
PARATONNERRES A DISPOSITIFS D'AMORÇAGE**

Réalisé par :
Cherif Achouak
Amara Aya



Dirigé par :
Dr. CHOUCOU
ABD ELMADJID

24 juillet 2022



REMERCIEMENTS

Nous voulons tout d'abord à remercier notre Dieu, le Plus Miséricordieux, qui nous a enseigné ce que nous ne savions pas, qui nous a donné la santé et la patience pour accomplir ce Modeste travail ,En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur M. Chouchou Abdelmadjid pour sa présence tout au long de ce travail, et nous le remercions encore une fois pour son aide précieuse en termes de conseils et d'orientation .Nous tenons tout particulièrement à remercier les enseignants du département Génie électrique pour leurs disponibilité et encouragement , Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.





Dedicace:

*A ma Chère Mère Hssina ,A mon Père Boualam ,A mon mari
Ahmed ,A mon petit fils Abderrahmen
Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines
m'ont permis de vivre ce jour.
,A mon Frères et mes sœurs ilyas ,haytam,maroua ,hiba
,A ma tante Massouda
(Cherif Achouak)*





Dedicace :

*Je dédie ce message à mes chers parents ,mon père Abd elaziz
et ma mère Saliha . Mes frères Faiz et Nadji, à mes sœurs
bouchra ,Rima et Randa pour leur patience, leur amour et leur
soutien. A Mon fiancé Hicham pour ses encouragements à
moi, à tous mes amis sans exception, en particulier Ayat,
Amina ,Nour ,hadjer
(Amara Aya)*



Table des matières

1	Chapitre I :Etude de la physique de la décharge de foudre	3
1.1	Introduction	3
1.2	les surtensions	4
1.2.1	Surtensions directes (conduits)	4
1.2.2	Surtensions induites (indirectes)	5
1.3	Surtension résultant du coup de foudre direct	5
1.4	Surtension résultant de coup foudre indirect	6
1.5	L'origine des surtensions de la foudre	7
1.6	Les différents types de surtensions :	7
1.6.1	surtensions temporaires	7
1.6.2	Les surtensions de manœuvre	8
1.6.3	Les surtensions par décharge électrostatique	8
1.6.4	Les surtensions atmosphériques	8
1.7	Formation de la foudre	9
1.8	Différents types de décharges	9
1.8.1	Décharges intra – nuages	10
1.8.2	Décharges entre nuages :	10
1.8.3	Décharges nuage – sol :	10
1.9	Nuage orageux	10
1.10	Courant de la foudre	12
1.11	Propagation d'onde	12
1.12	Onde de foudre	12
1.13	Les caractéristiques électriques de coup de foudre	13
1.14	Types de coup de foudre	14
1.14.1	Coup de foudre ascendant	14
1.14.2	Coup de foudre descendant	14
1.14.3	Coup de foudre ascendant négatifs	15
1.14.4	Coup de foudre ascendant positifs	15
1.15	Les phénomènes précurseurs	16
1.16	Formation des charges :	17
1.17	Répartition des charges :	17
1.18	Comment la foudre impacte les installations électriques des bâtiments :	17
1.18.1	Vieillessement accéléré du matériel	19
1.19	Les effets de la foudre :	19
1.19.1	Les effets directs :	19
1.19.2	Les effets indirects :	19
1.20	Conclusion :	20
2	Chapitre II :Protection contre la foudre et moyen de protection	21
2.1	Introduction	21
2.2	Protection contre la Foudre	21
2.2.1	Installation Extérieure de Protection contre la Foudre (IEPF)	21
2.2.2	Installation Intérieure de Protection contre la Foudre (IIPF)	21
2.2.3	Une partie sera consacrée aux procédures et notices de vérification	21

2.2.4	Une dernière partie sera consacrée au carnet de bord :	22
2.3	Type de Système de Protection Foudre (SPF)	22
2.3.1	Choix du type de l'Installation Extérieure de Protection Foudre	22
2.3.1.1	Installation non isolée :	22
2.3.1.2	Installation isolée :	22
2.4	Principes d'Installations Extérieures de Protection Foudre	23
2.5	La protection primaire	23
2.5.1	Le paratonnerre à tige simple (protection non isolée)	24
2.5.2	Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA) (protection non isolée)	26
2.5.2.1	Le principe d'avance à l'amorçage	26
2.5.2.2	Différents types de PDA	27
2.5.3	Le paratonnerre à cage maillée : (cage de Faraday - protection non isolée)	31
2.5.4	Le paratonnerre à fils tendus (protection isolée)	32
2.6	Modèle électrogéométrique de base	33
2.6.1	Mise en œuvre du modèle électrogéométrique	33
2.6.1.1	Méthode de la sphère fictive	33
2.6.1.2	Les différentes zones de protection	34
2.6.2	Application du modèle électrogéométrique	35
2.6.3	Critique du modèle électrogéométrique	37
2.7	Protection secondaire	38
2.7.1	Eclateurs	38
2.7.1.1	Avantage	39
2.7.1.2	Inconvénients	39
2.7.2	Les parafoudres	39
2.7.3	Parafoudre à carbure de Silicium (SiC)	39
2.7.3.1	Principe de fonctionnement	40
2.7.4	Parafoudres à oxyde de zinc (ZnO)	40
2.7.5	Choix des parafoudres	42
2.8	Conclusion :	42
3	chapitre III :Parafoudre á oxyde de zinc (Zno)	44
3.1	Introduction	44
3.2	Parafoudre à Oxyde de Zinc :	44
3.3	Constitution :	44
3.4	Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO :	44
3.5	Principe de la protection :	46
3.6	Caractéristiques des parafoudres ZnO :	47
3.7	Types des parafoudres ZnO :	50
3.7.1	Parafoudre de poste	50
3.7.2	Parafoudre de ligne	51
3.8	Mécanisme de conduction dans les varistances	51
3.9	Propriétés thermiques de l'enveloppe des parafoudres ZnO :	51
3.10	Caractéristiques électriques U-I des parafoudres ZnO	52
3.11	Modèle électrique équivalent simplifié de la varistance ZnO :	54
3.12	Microstructure réelle de la varistance ZnO :	55

3.13	Détermination des caractéristiques électriques du parafoudre ZnO : . . .	56
3.13.1	Conductivité électrique	56
3.13.2	Permittivité relative :	58
3.13.3	Permittivité constante dans le temps :	58
3.13.4	Permittivité temporellement variable	59
3.13.5	Dérivation d'une permittivité complexe :	59
3.14	Vieillessement du parafoudre :	61
3.15	Avantages par rapport aux parafoudres SiC	62
3.16	Les inconvénients des parafoudres à oxyde de zinc	62
3.17	Conclusion	63
4	Chapitre IV : Modélisation des parafoudres Zno	64
4.1	Introduction :	64
4.2	Modélisation des parafoudres ZnO :	64
4.2.1	Modèle conventionnel ou à résistance non-linéaire :	64
4.2.2	Modèle proposé par Ozawa et al :	65
4.2.3	Modèle de Tominaga et al :	65
4.2.4	Modèle recommandé par le groupe IEEE :	66
4.2.4.1	Calcul des paramètres du schéma équivalent	67
4.2.5	Modèle proposé par T. Hagiwara et al :	67
4.2.6	Modèle proposé par W. Breilmann :	68
4.3	Application de calcul des paramètres du schéma équivalent pour quelques modèles réelles de parafoudres :	68
4.3.1	Parafoudres à oxyde de zinc PEXLIM R-Z (72 – 145kV) :	68
4.3.1.1	les Caractéristiques de modèle	69
4.3.1.2	Le calcul des paramètres du schéma équivalent suivant le modèle IEEE donne les valeurs suivantes	69
4.3.1.3	Etude de caractéristique vis-à-vis des essais des tensions	70
4.3.2	Parafoudres à oxyde de zinc PEXLIM P-Y (300 - 550 kV) :	72
4.3.2.1	les Caractéristiques de modèle :	72
4.3.2.2	Le calcul des paramètres du schéma équivalent suivant le modèle IEEE donne les valeurs suivantes	72
4.3.2.3	Etude de caractéristique vis-à-vis des essais des tensions	73
4.3.3	Parafoudres à oxyde de zinc HS PEXLIM P-T (245 - 550 kV) :	75
4.3.3.1	les Caractéristiques de modèle :	75
4.3.3.2	Le calcul des paramètres du schéma équivalent suivant le modèle IEEE donne les valeurs suivantes	75
4.3.3.3	Etude de caractéristique vis-à-vis des essais des tensions	76
4.4	Conclusion	77
5	Conclusion générale	78

Table des figures

1	surtensions directes[9]	4
2	Surtensions induites (indirectes)[9]	5
3	Coup de foudre direct sur une ligne.[20]	6
4	Distribution statistique de l'intensité des coups de foudre directs et intensités minimales d'amorçage en fonction du niveau de tension du réseau. [2]	6
5	Coup de foudre sur le câble de garde[21]	7
6	coupe de foudre[1]	9
7	Différents types de décharges[13]	10
8	Distribution des charges électriques et répartition du champ électrique dans un nuage orageux en fonction de la distance horizontale et de l'altitude [18]	11
9	Onde normalisée de foudre type 8/20 μ s [7]	13
10	Représentation d'une coup de foudre négatif [8]	13
11	Représentation schématique d'un coup de foudre négatif descendant[1]	16
12	constitution du nuage [1]	16
13	Formation et répartition des charges.[1]	17
14	Coup de foudre proche de bâtiments (surtension due au rayonnement électromagnétique)	18
15	Coup de foudre sur une ligne aérienne (électrique ou téléphonique)	18
16	Coupe de foudre proche de bâtiments (remontée de potentiel de terre)	19
17	Détermination de l'angle de protection en fonction de la hauteur de la tige du paratonnerre et du niveau de protection[1]	24
18	Paratonnerre à tige simple [1]	25
19	Zone de protection d'un paratonnerre à tige simple. [1]	25
20	Paratonnerre à dispositif d'amorçage. [1]	26
21	La description du phénomène de foudroiement au sol [23]	27
22	Représentation schématique des différents types de PDA[22]	30
23	Paratonnerre à cage maillée[1]	31
24	Schéma de câbles de garde[24]	32
25	Méthode de la sphère fictive[24]	34
26	Zone de protection d'un paratonnerre horizontal[24]	35
27	zone de protection d'un paratonnerre vertical[24]	36
28	zone de protection d'un paratonnerre vertical de hauteur hl[24]	36
29	Détermination des zones de protection de deux coups avec des courants de deux intensités différentes[24]	37
30	Eclateurs[25]	38
31	Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs[1]	40
32	Parafoudre à Oxyde de Zinc ZnO[1]	41
33	Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO [28]	45
34	Exemple d'utilisation d'une varistance V pour la protection d'un élément X[29]	47

35	Application de parafoudres ZnO dans les réseaux à haute tension. (a) : Parafoudres simple, (b) : parafoudres sans éclateur, (c) : parafoudres avec éclateur.	50
36	Représentation schématique de la caractéristique U-I d'un parafoudre ZnO.	53
37	Image au microscope électronique d'une varistance ZnO et son schéma de circuit équivalent simplifié [15].	54
38	Microstructure des varistances ZnO avec ses trois principales phases : grains de ZnO, grains de spinelles (Sp), zone intergranulaire (Z.I.) et Pore P.[1]	56
39	Détermination des valeurs de crête du courant résistive en dessous du maximum de tension nominale d'une varistance ZnO.	57
40	Conductivité électrique d'une varistance ZnO en fonction du champ électrique et de la température	58
41	Permittivité relative d'une varistance ZnO en fonction de l'intensité du champ électrique et de la température.	60
42	Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection. [4]	62
43	Modèle à résistance non-linéaire	65
44	Modèle proposé	65
45	Modèle à inductance linéaire	66
46	Modèle IEEE du parafoudre.	66
47	Modèle proposé par Hagiwara et al	68
48	Modèle de W. Breilmann[38].	68
49	Photo réelle de PEXLIM R-Z et Géométrie simplifiée	69
50	Courbes des essais pour l'onde (30/60 μ s)	70
51	Courbes des essais pour deuxième onde (8/20 μ s)	71
52	Géométrie simplifiée et Photo réelle de PEXLIM P-Y	72
53	Courbes des essais pour l'onde (30/60 μ s)	73
54	Courbes des essais pour l'onde (8/20 μ s)	74
55	Photo réelle de HS PEXLIM P-T et Géométrie simplifiée	75
56	Courbes des essais pour l'onde (30/60 μ s)	76
57	Courbes des essais pour l'onde (8/20 μ s)	77

Liste des Symboles :

U_{ind}	tension d'induit
h	hauteur du conducteur
d	distance entre la ligne et le point d'impact de la foudre.
Z_c	Impédance caractéristique de la ligne
I	courant de la foudre
$I(t)$	Le courant injecté
R	Résistance de la prise de terre.
L	Inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre
I	Courant traversant le parafoudre
V	Tension aux bornes du parafoudre
J	Densité de courant résistif
α	Coefficient de non-linéarité (mesure de non-linéarité)
Ka	Constante dépend du type de parafoudre
A	Surface de la varistance ZnO
σ	Conductivité électrique
ε	Permittivité électrique
ε'	Partie réelle d'une permittivité relative à valeurs complexes
ε''	Partie imaginaire d'une permittivité relative à valeurs complexes
ε_r	Permittivité relative
ε_0	Constante de champ électrique
D	Densité de flux électrique
D_{eff}	Densité de flux électrique efficace
a_0	Constante qui dépend du matériau
W_c	Énergie d'activation
n	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

Liste des Acronymes :

Acronymes	
IEPF	Installation Extérieure de Protection contre la Foudre
IIPF	Installation Intérieure de Protection contre la Foudre
SPF	Système de Protection Foudre
PDA	paratonnerre à dispositif d'amorçage
HT	haute tension
SiC	Carbure de Silicium
ZnO	Parafoudres à oxyde de zinc
CC	courant continu
CA	courant alternatif
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

Liste des tableaux :

TABLEAUX	TITRES	N
(2.1)	les niveaux de protection	30
(2.2)	Largeur des mailles et distances habituelles entre les descentes et le ceinturage en fonction du niveau de protection	39
(3.1)	Tableau Caractéristiques des parafoudres ZnO	58
(3.2)	Tab Exemple de caractéristiques des parafoudres ZnO	58

INTRODUCTION GENERALE :

Les lignes de transport aérienne et toutes les installations ou équipement électriques sont soumis aux perturbations naturelles telles que la foudre, cette dernière ayant un impact direct sur les réseaux électriques par l'impact direct sur les lignes ou indirectement par rayonnement électromagnétiques

La foudre est un phénomène naturel bien connu, spectaculaire et dangereux. cette foudre provoque des dégâts matériels et humaines (incendie, coupures d'électricité. . . ,etc.) Les réseaux aériens restent les plus touchés par les surtensions surintensité atmosphérique

La Foudre est un éclair qui tombe au sol c'est un phénomène fréquent qui se comporte comme un générateur parfait de courant électrique. Pour se protéger dans 95% des cas, le courant à prendre en compte est de 100kA avec un temps de montée très bref. En plus du phénomène de conduction, le canal ionisé de la foudre se comporte comme un fil long qui rayonne un champ électromagnétique. Ce champ induit dans les grandes boucles de masse des tensions qui se compte en kilovolts. Ces surtensions peuvent détruire des composants d'interface. La foudre n'est donc pas un phénomène à craindre uniquement lors d'un «coup au but» ; l'effet induit par le champ importe.

Des dysfonctionnements ont été observés par des impacts éloignés d'au moins 1Km. De plus, de part leur probabilité d'occurrence plus grande, les coups de foudre indirects constituent une cause plus importante des microcoupures que les amorçages directs
La protection des matériels reliés au réseau électrique contre les surtensions provoquées par la foudre était auparavant assurée par de simples dispositifs appelés éclateurs à cornes, puis par des systèmes plus complexes comme les parafoudres constituent le meilleur investissement pour parvenir aux résultats attendus. Leur impact sur la qualité de l'énergie distribuée est indéniable et ils contribuent fortement à renforcer la sécurité à la fois pour les matériels et les personnes ainsi qu'à diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance, on peut résumer les moyens de protection autres : les paratonnerre, parafoudre ZnO.

Les varistances à base d'oxyde de zinc sont des céramiques polycristallines. Ce sont des pastilles d'oxydes métalliques, composées essentiellement d'oxyde de zinc dopé par d'autres oxydes métalliques comme ceux de bismuth, de manganèse, de cobalt, et d'antimoine. Leur principale propriété est la forte non linéarité de leur caractéristique courant-tension. Ce qui a permis de les utiliser pour la protection contre les surtensions électriques. Elles constituent l'élément actif des parafoudres à varistances ZnO. Notre travail se compose de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous essayerons d'étudier le phénomène de la foudre, la physique de la décharge et les paramètres d'influence sur l'intensité et le point d'impact de la foudre.

Dans le deuxième chapitre nous analyserons les différents moyens de protection contre ce phénomène qui reste très mystérieux pour la plupart des gens depuis des décennies.

Dans le troisième nous détaillerons en particulier, le parafoudre à oxyde de Zinc son fonctionnement et ses caractéristiques.

Dans le dernier chapitre, nous allons étudier les différents modèles des parafoudres a oxyde de Zinc et le calcul des différents paramètres qui entrent dans le schéma équivalent.

Nous terminons notre mémoire avec une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués et les perspectives à envisager.

1 Chapitre I :Etude de la physique de la décharge de foudre

1.1 Introduction

La foudre est une violente décharge électrique provenant de l' atmosphérique qui se développe en un ou plusieurs coups entre les nuages et la terre.

La foudre affecte l'appareil équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100kA et plus), Ces surtensions sont très dangereuses car elles peuvent causer des dommages importants à l'isolation des lignes de transmission système du pouvoir . La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres :

- Elle peut être à l'origine des perturbations momentanées dans la continuité de service, donc de dégradation de la qualité des alimentations,
- Elle peut causer des destructions de matériel, et en conséquence de longues interruptions de service des installations,
- Elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre). La foudre a toujours été une cause de perturbation dans l'utilisation de l'électricité [1]

1.2 les surtensions

Toutes les tensions appliquées à un équipement dont la valeur de crête présentent des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de quatre natures : Temporaires (à la fréquence industrielle) ; de manœuvre ; par décharge électrostatique ; d'origine atmosphérique (foudre). Elles peuvent apparaître selon deux modes : mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase-phase ou phase-neutre) et mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la Terre).[19]

1.2.1 Surtensions directes (conduits)

L'impact direct sur une ligne électrique ou téléphonique, génère une onde de tension qui se propage. Cette onde, qui est amortie par l'effet couronne et la longueur de la ligne, est coupée soit par l'isolateur a cornes soit par les moyens de protection au poste. Comme le courant de la foudre est rarement inférieur à 10kA, et que l'impédance caractéristique d'une ligne aérienne est environ 300R, l'onde de tension atteindra 1500 kV.[9]

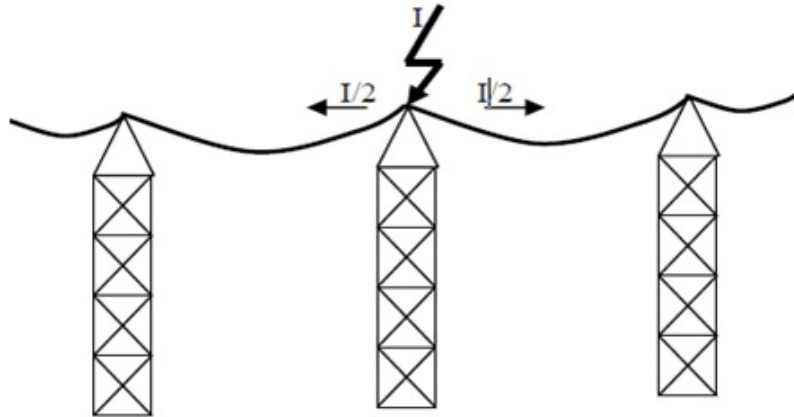


FIGURE 1 – surtensions directes[9]

1.2.2 Surtensions induites (indirectes)

Si la foudre tombe a proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situes loin du point d'impact. Ses effets se font sentir a plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres. [9]

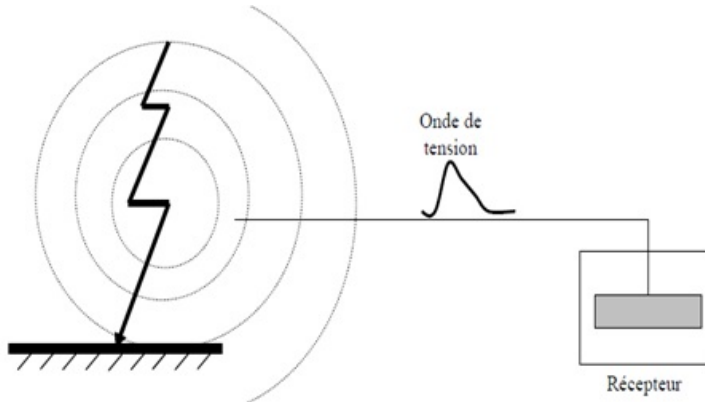


FIGURE 2 – Surtensions induites (indirectes)[9]

Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude a celles obtenues par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la microseconde), et leur amortissement très rapide. Ce rayonnement est d'autant plus important que le front de montée est raide (20 a 100 kA/ μ s). Un coup de foudre tombant a proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important pour y créer une surtension induite, dont l'ordre de grandeur peut être estimé par la formule suivante :[9]

$$U_{ind} = Z_0 I h / d$$

avec

$$Z_0 = (0.25/\pi)(\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}) \approx 30\Omega$$

h : hauteur du conducteur

d : distance entre la ligne et le point d'impact de la foudre.

I : courant de la foudre.

1.3 Surtension résultant du coup de foudre direct

Il se manifeste par l'injection dans la ligne, d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. Cette onde de courant, qui peut faire fondre des conducteurs en se propageant de part et d'autre du point d'impact (figure 3), provoque une augmentation de la tension U donnée[1]

$$\text{par la formule : } U(t) = Z_c \frac{I(t)}{2}$$

Z_c : Impédance caractéristique de la ligne.

I (t) : Le courant injecté

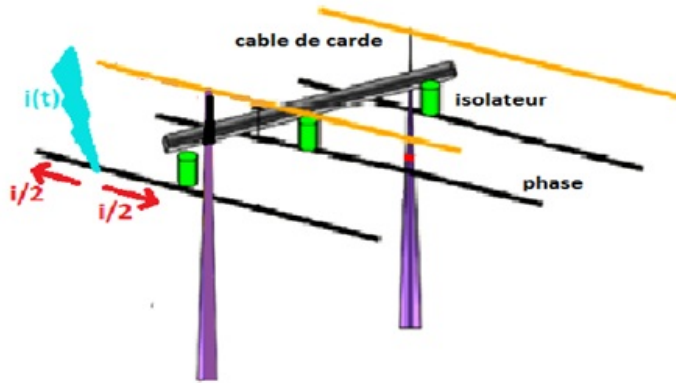


FIGURE 3 – Coup de foudre direct sur une ligne.[20]

U atteint donc des valeurs de plusieurs millions de Volts, ce qui n'est supportable par aucune ligne. Pour différentes tensions de réseau, il n'y a pas amorçage au-dessous du courant critique indiqué par la droite de la figure (4).

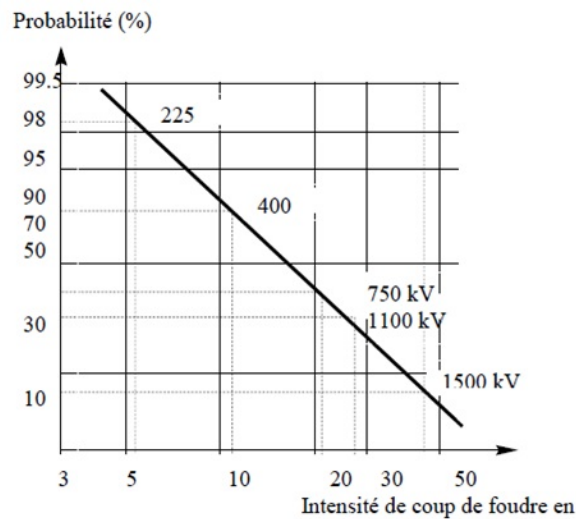


FIGURE 4 – Distribution statistique de l'intensité des coups de foudre directs et intensités minimales d'amorçage en fonction du niveau de tension du réseau. [2]

1.4 Surtension résultant de coup foudre indirect

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. À cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs kilomètres. [1]

La surtension correspondante peut atteindre des centaines de kV.

$$U(t) = R\frac{i}{2} + L\frac{di}{2dt}[2]$$

R : Résistance de la prise de terre.

L : Inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre

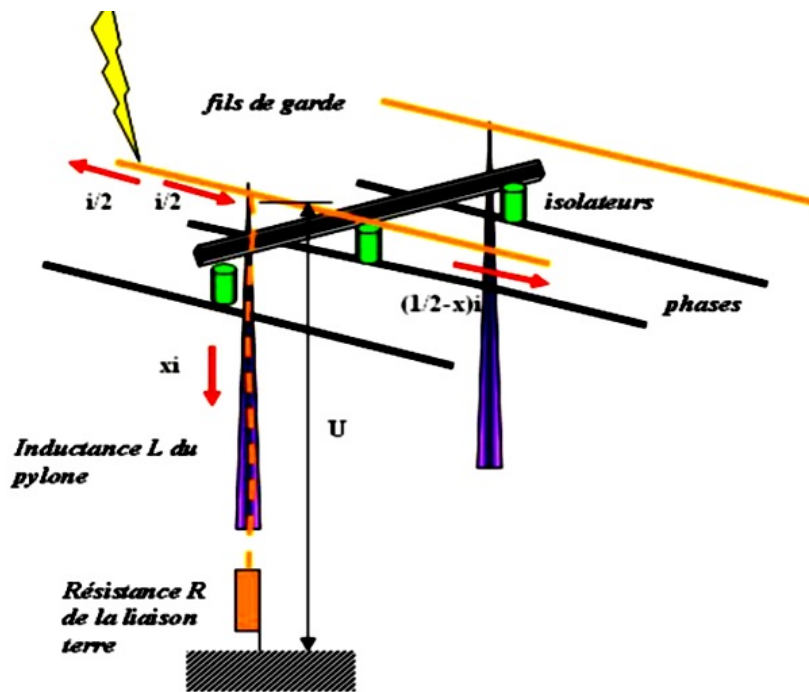


FIGURE 5 – Coup de foudre sur le câble de garde[21]

1.5 L'origine des surtensions de la foudre

a La foudre sur les lignes aériennes :

En touchant une ligne, la foudre crée une onde de courant de plusieurs milliers d'Ampères qui provoque une surtension sur les appareils raccordés à la ligne.

b La foudre sur la terre :

En touchant le sol, la foudre provoque une remontée de potentiel électrique de la terre qui entraîne des surtensions dans les câbles souterrains et les prises de terre.

c La foudre par rayonnement :

Le champ électromagnétique créé par la foudre (plusieurs milliers de Volts par mètre à plus d'un kilomètre de son point d'impact) crée des surtensions sur les équipements électriques qui sont à plusieurs kilomètres autour du point de chute[1]

1.6 Les différents types de surtensions :

1.6.1 surtensions temporaires

Les surtensions temporaires ou à la fréquence industrielle prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et Terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une Ferro-résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur. La caractéristique principale de ces surtensions est la fréquence qui épouse celle du réseau : en général 50, 60 ou 400 Hz [19].

1.6.2 Les surtensions de manœuvre

La modification brusque de la structure d'un réseau électrique provoque l'apparition de phénomènes transitoires. Ceux-ci se traduisent souvent par la naissance d'une onde de surtension ou d'un train d'ondes haute fréquence de type apériodique ou oscillatoire à amortissement rapide. En général, ce type de phénomène apparaît sur des réseaux électriques subissant des modifications rapides de leur structure (ouverture d'appareils de protection, fermeture et ouverture d'appareils de commande). Dans ce qui suit, on illustre quatre types de surtension de manœuvre [19].

- Surtension de commutation en charge normale.
- La commutation de courants inductifs.
- La commutation des circuits capacitifs
- L'interruption d'un fort courant par un organe de coupure

1.6.3 Les surtensions par décharge électrostatique

D'autres types de décharges atmosphériques existent. En effet, si la plupart des surtensions induites sont d'origine électromagnétique et certaines sont d'origine électrostatique. Par exemple, dans un milieu très sec, il est fréquent qu'un être humain chargé électro-statiquement par frottement (notamment sur une moquette synthétique) atteigne une tension de plusieurs dizaines de kilovolts. Sa décharge est un courant impulsionnelle de quelques dizaines d'ampères. Des perforations de composants électroniques ont été observées suite à ces décharges dont les fronts de montée sont très raides (quelques nanosecondes au maximum). Au niveau d'installations électriques, durant les minutes qui précèdent un coup de foudre, lorsqu'un nuage chargé à un certain potentiel se trouve au-dessus d'une ligne, celle-ci prend une charge de sens contraire. Avant que ne se produise le coup de foudre, qui permet la décharge du nuage, il existe donc entre la ligne et le sol un champ électrique E pouvant atteindre $30kV/m$ sous l'effet duquel se charge le condensateur ligne/terre à un potentiel de l'ordre de 150 à 500kV selon la hauteur de la ligne par rapport au sol. Il en résulte des risques de claquages peu énergétiques au niveau des composants. Lors de l'amorçage entre le nuage et la terre, le champ électrique ayant disparu, les capacités se déchargent [19].

1.6.4 Les surtensions atmosphériques

Les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre. En effet, la foudre est un phénomène naturel dont les effets sont spectaculaires et dangereux. Les effets des coups de foudre font l'objet de deux approches : lorsque l'élément étudié est celui qui reçoit la foudre, c'est le cas du coup de foudre direct, et lorsque l'élément étudié ne subit que des effets, c'est le coup de foudre indirect. Ainsi, lorsque la foudre tombe sur une structure, le courant de foudre génère une surtension impulsionnelle. En outre, les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique. Une particularité des coups de foudre est leur polarisation : ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif). Environ 10% sont de polarité inverse, mais ce sont les plus violents [19]

1.7 Formation de la foudre

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque de l'électricité statique s'accumule entre un nuage et la terre. La différence de potentiel électrique entre les deux points peut aller jusqu'à 100 millions de volts et produit un plasma lors de la décharge, causant une expansion explosive de l'air par dégagement de chaleur. En se dissipant, ce plasma crée à la fois un éclair de lumière (la foudre) et un son (le tonnerre). La formation ou l'arrivée d'un nuage orageux provoque la création d'un champ électrique entre le nuage et le sol. Ce champ électrique au sol augmente jusqu'à des valeurs de 10 kV/m, initiant ainsi la création de décharges couronne à partir des irrégularités du sol ou des masses métalliques. L'éclair entre le nuage et le sol est constitué par des traceurs descendants, mais également par des traceurs ascendants.

Le traceur descendant négatif (cas le plus général), prend naissance au sein des masses négatives du nuage. Ce traceur progresse ensuite en direction du sol, par bonds successifs (contrairement au traceur positif qui, lui, progresse de façon quasi continue) de quelques dizaine de mètres et avec des temps d'arrêts de 40 à 100 μ s entre bonds.

Au fur et à mesure de la progression du traceur négatif, on assiste à de nombreuses ramifications orientées vers le bas. [5]

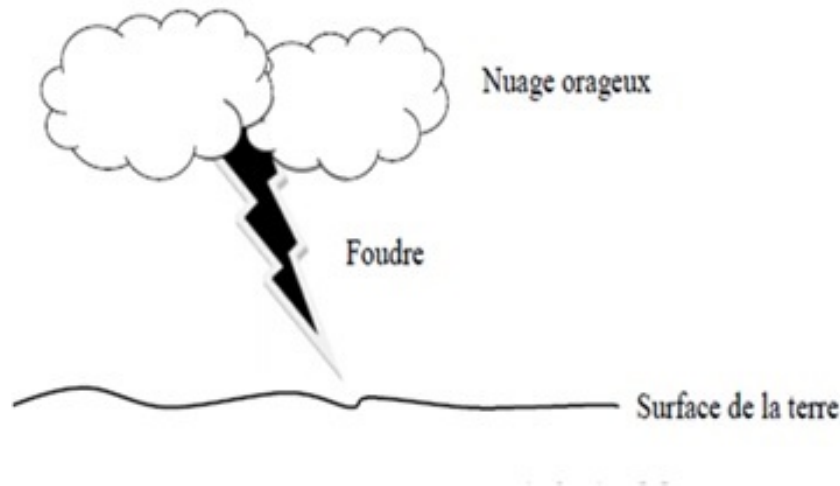


FIGURE 6 – coupe de foudre[1]

1.8 Différents types de décharges

La foudre est un ensemble de phénomènes physiques et électriques complexes qui se présentent dans la nature sous différentes formes : Les décharges entre nuage (Fig.a). Les décharges à l'intérieur du nuage ou intra-nuages (Fig .b). Les décharges entre nuage et terre, sont les coups de foudre (Fig. c).

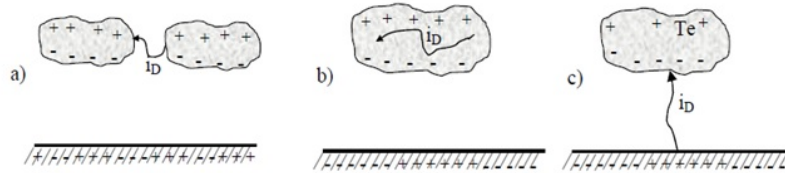


FIGURE 7 – Différents types de décharges[13]

1.8.1 Décharges intra – nuages

Contrairement aux décharges nuage - sol, la décharge intra - nuages (Fig.a) est de loin la plus fréquente mais la moins étudiée. Elle se présente sous la forme d'une succession d'arcs électriques qui se tendent entre une ou plusieurs poches de charges opposées contenues dans un même nuage. En règle générale, ces arcs sont fortement ramifiés et se produisent à l'intérieur du nuage. Mais il arrive parfois qu'ils sortent du nuage pour y revenir en passant par l'extérieur, formant ainsi une espèce de pont très lumineux et visible de la terre. La durée de ces décharges est de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes et leurs effets sont plutôt minimes [14].

1.8.2 Décharges entre nuages :

Ces décharges se développent entre deux ou plusieurs nuages orageux différemment chargés se trouvant à une distance telle que l'ionisation de l'air qui les sépare devient possible (Fig.b).. Elles se produisent généralement à de très grandes altitudes, et elles sont d'autant plus fréquentes que la densité de l'air est faible. Ces décharges inquiètent surtout les engins aéronautiques et les systèmes de transmission par satellite.

1.8.3 Décharges nuage – sol :

Parmi toutes les formes de décharges atmosphériques, la décharge nuage - sol (Fig.c) est la moins fréquente mais certainement la plus contraignante et la mieux étudiée. Elle représente à peu près le tiers de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe terrestre. Ce pourcentage est fonction des conditions météorologiques et physiques (humidité, température, localisation des charges dans le nuage,...), et enfin de l'altitude. Elle se présente sous la forme d'une succession de décharges "nuage - sol - nuage" appelées coups de foudre [15].

1.9 Nuage orageux

Les nuages orageux sont d'énormes masses en forme d'enclume, les cumulo-nimbus, qui occupent une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Leur épaisseur peut atteindre plusieurs kilomètres, l'extrémité inférieure étant située à une altitude d'environ 2 km [16][17]. Selon la nature des régions (conditions de température, de pression et d'humidité) où ils se forment, les nuages sont classés en deux catégories :

Les nuages de chaleur qui se développent dans les régions tropicales. La combinaison d'une très forte humidité de l'atmosphère et de réchauffements locaux du sol engendre

la formation d'une masse d'air à la fois chaude et humide pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant laquelle, sous l'action de courants atmosphériques, prend un mouvement ascendant. La température diminuant en fonction de l'altitude par rapport au sol, cette masse d'air se condense lorsqu'elle atteint environ 2 km et forme le nuage orageux.

Les nuages orageux qui résultent dans les régions à climat tempéré, de la rencontre entre deux masses d'air importantes ayant des températures et des pressions différentes. Cette rencontre produit également des courants ascendants accompagnés de condensation. Contrairement aux nuages de chaleur dont la durée n'excède pas une heure et demie, les nuages ainsi formés peuvent subsister plusieurs jours et se propager sur des milliers de kilomètres. Parallèlement à ces phénomènes thermodynamiques, il se produit une séparation des charges électriques au sein du nuage. Il n'existe pas encore de théorie satisfaisante pour expliquer les faits observés : la partie supérieure du nuage, constituée de cristaux de glace, est chargée positivement, tandis que la partie inférieure, constituée de gouttelettes d'eau, est chargée négativement. Souvent, un îlot de charges positives est inclus dans cette masse négative. Le nuage constitue ainsi un véritable dipôle dont la charge totale, distribuée dans le volume de 50Km^3 , peut atteindre plusieurs dizaines de milliers de coulombs [16]. Cette séparation de charge crée des contraintes électriques entre les différentes couches intérieures du nuage ainsi qu'entre sa partie inférieure et le sol (Figure 8). Lorsque la valeur limite de claquage dans l'air est atteinte, il se produit une décharge électrique à l'intérieur du nuage ou entre nuages (les éclairs), ou encore entre le nuage et le sol (la foudre).

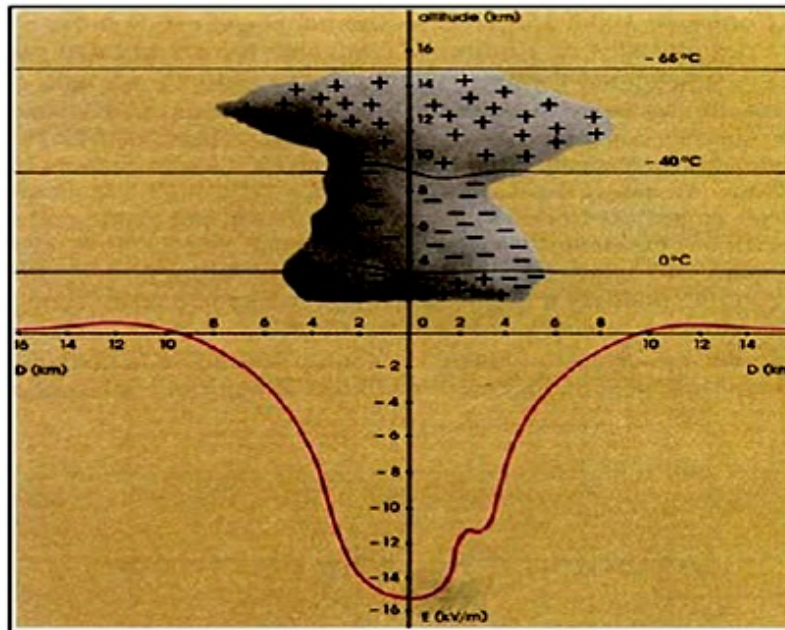


FIGURE 8 – Distribution des charges électriques et répartition du champ électrique dans un nuage orageux en fonction de la distance horizontale et de l'altitude [18]

1.10 Courant de la foudre

Le coup de foudre est équivalent à un générateur de courant. Le courant est en fait constitué par les charges superficielles du sol qui remontent le canal ionisé du traceur : on observe alors un fait fortement lumineux qui progresse du sol en direction du nuage, avec une vitesse estimée à 108 m / s. c'est l'arc en retour ou return stroke .

Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé . Lorsque la décharge principale est terminée, après une durée environ de 100 ms apparaît une ou plusieurs décharges secondaires.

Quelques chiffres concernant le courant :

- L'amplitude des courants des CdF positifs peut être considérable, supérieure à 150 kA dans 10% des cas. Dans 50% des cas, l'intensité du courant est de 25 kA.
- L'amplitude des CdF négatifs est moins grande. Dans 10% des cas, elle est de l'ordre de 50 kA. Dans 50% des cas, l'intensité des CdF négatifs est de 18 kA.[9]

1.11 Propagation d'onde

La foudre est un concept auquel l'électrotechnicien a peu à faire dans ses travaux quotidiens. Qu'en est-il en réalité ? Toute modification de l'état électrique d'un conducteur en l'un de ses points se propage à grande vitesse, de 150 000 à 300 000 km/s selon le diélectrique entourant le conducteur, soit à la fréquence industrielle de 50 Hz une distance parcourue de 3 000 à 6000 km en une période. Dans le domaine industriel, cette distance est, sauf cas particulier, sans commune mesure avec la longueur des conducteurs concernés. Il est alors légitime de simplifier en considérant que la transmission d'onde est instantanée en tout point de l'installation. Dans le cas de la foudre, il s'agit de phénomènes à «haute fréquence» : de quelques dizaines de kHz à plusieurs MHz, à comparer avec la «basse fréquence» industrielle de 50 Hz ou 60 Hz [6]

1.12 Onde de foudre

Le spectre de l'onde de foudre est beaucoup plus large (fréquences très élevées), que celui de l'onde de manœuvre. Un coup de foudre comporte plusieurs décharges (4 en moyenne) et chaque décharge est précédée par des milliers de précurseurs ou traceurs, créant des milliers de surtensions, chacune pouvant être décomposée en série de Fourier pour former le spectre. La configuration du réseau produit des effets encore plus aléatoires sur ces milliers d'ondes générées par la foudre. En laboratoire, on se borne à simuler la foudre par des ondes biexponentielles, mais cela ne correspond pas à la réalité du spectre observé sur un site donné et résultant d'une multitude de couplages[7]

Exemple : Onde normalisée de foudre type 8/20 μs

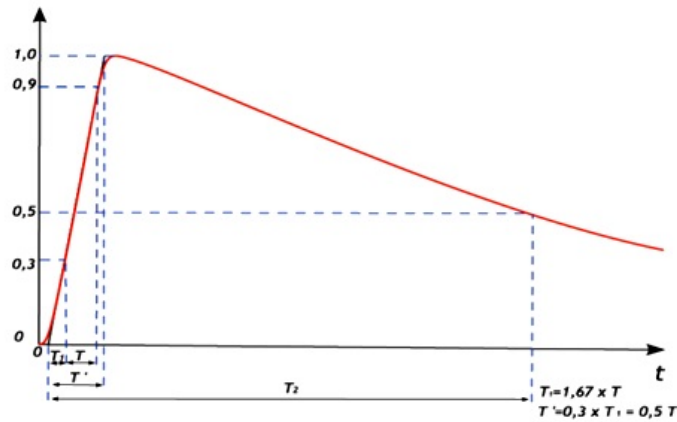


FIGURE 9 – Onde normalisée de foudre type 8/20 μs [7]

1.13 Les caractéristiques électriques de coup de foudre

Un coup de foudre est composé en général de plusieurs décharges électriques, s'écoulant par le même canal ionisé les principales caractéristiques d'un coup de foudre sont les suivantes Durée totale : 0.2 à 1 seconde . Nombre de décharge : 4 en moyenne. Courant : 2000 à 200 000 ampères (50% des coups de foudre < 20 000 A). Quantité de charges injectées 5 à 200 coulombs. Valeur maximale dI/dt : 40 000 à 150 000 ampères par microseconde. Durée locale d'un orage : 2 heures maximum . Etendue du spectre : le courant de décharge a une fréquence de quelque MHz ; elle peut atteindre quelques GHz [8].

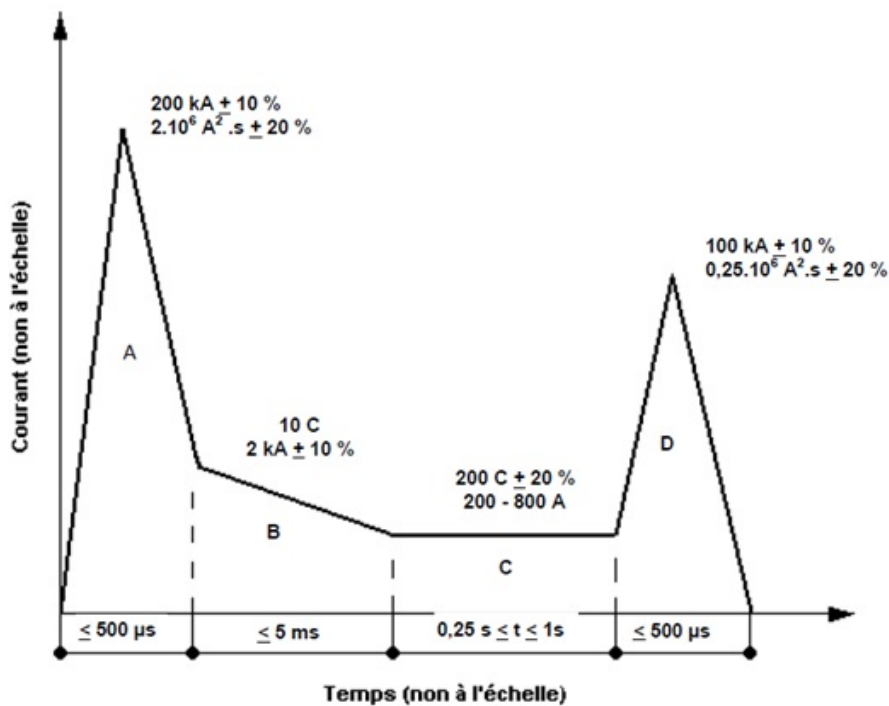


FIGURE 10 – Représentation d'une coup de foudre négatif [8]

1.14 Types de coup de foudre

Un Coup de Foudre -CdF-, entre nuages et terre, se décompose en deux phases : le développement d'une prédécharge ou traceur (leader en anglais), canal ionisé, qui provoque le coup de foudre proprement dit, décharge d'arc visible de courant intense. Les CdF se distinguent selon deux critères principaux qui sont leur sens de déplacement et leur polarité :

1.14.1 Coup de foudre ascendant

: Les coups de foudres ascendants sont généralement produits dans des endroits d'importantes prééminences, où les effluves d'effet couronne apparaissent au sommet des aspérités. Ces effluves se développeraient d'autant plus loin et avec plus d'intensité que la dimension de la prééminence est importante.

A partir d'une certaine intensité d'effluves, le phénomène se modifie brusquement et peut se développer plus loin pour atteindre le nuage, c'est le coup de foudre ascendant. Ceci est fréquemment observé à partir des tours dont la hauteur dépasse 300m, et à partir des gratte-ciels. La chronologie des événements pour le cas le plus fréquent (ascendant positif) est la suivante :

Aux premiers temps on observe l'apparition de filaments couronnes issus d'un tronc ionisé commun, qui est l'amorce d'un traceur. A partir d'une certaine valeur du champ électrique, ce traceur se développe brusquement en direction du nuage avec une vitesse moyenne de 2 à $6 \cdot 10^4 \frac{m}{s}$

Au cours de cette progression, le traceur se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'une arborescence. Au moment où ces ramifications lèchent la base de nuage, il s'établit une décharge, dont la durée peut atteindre la seconde, et qui écoule des courants de l'ordre du millier d'ampères [11].

1.14.2 Coup de foudre descendant

L'inverse du traceur positif, le traceur d'un coup de foudre descendant négatif [11] [2] se développe en progressant vers la terre par bonds successifs de 50 à 100m (Stepped leader). Entre les bonds, on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 ms, avec une vitesse de progression moyenne de 0,15 à 0,20 m/ms (deux fois plus grande que celle du traceur ascendant positif). Dès que la pointe du traceur se rapproche du sol, des prés décharges ascendantes se développent généralement depuis un arbre, une salie, en direction du traceur descendant, alors qu'elles n'existaient auparavant que sous forme d'effluves d'effet couronne localisées.

Lorsque l'une de ces pré décharges et le traceur par bonds se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol, qui va permettre le passage d'un courant de forte intensité, neutralisant les charges de ce dernier ; on observe alors un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage avec une vitesse estimée à 108 m/s. C'est l'arc de retour ou (return stroke).

Lorsque la première décharge cesse de s'écouler, il peut se passer 100 ms avant qu'une seconde décharge n'apparaisse. Cette seconde décharge commence par l'apparition d'un traceur (dart leader) qui progresse d'une façon continue (contrairement au stepped leader) en suivant le même chemin établi par le stepped leader dont la vitesse de propagation est de l'ordre de 106 m/s et plusieurs décharges successives peuvent ainsi avoir lieu selon ce type de mécanisme. La figure (11) montre l'évolution temporelle d'un coup de foudre descendant négatif.

1.14.3 Coup de foudre ascendant négatifs

Le bas de nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées. Une première décharge partielle de durée de front de $10\mu\text{s}$ à $15\mu\text{s}$, succède des décharges d'attaque plus raides et de descente plus douce

1.14.4 Coup de foudre ascendant positifs

Le bas de nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant une durée de 0.1 à 0.2 s. La durée d'attaque varie entre $20\mu\text{s}$ à $50\mu\text{s}$ et l'amplitude du courant des coups positifs est généralement supérieure à celle des coups de foudres négatifs. [3]

90% des coups de foudres sont de types négatif descendant, les mécanismes particuliers de ce type de coup de foudre sont présentés schématiquement ci-dessous :

Le bas du cumulo-nimbus est chargé négativement, le sol positivement (a). Le coup de foudre est donc de type négatif. Un traceur chargé négativement se propage par bonds successifs du nuage vers le sol, déterminant le caractère descendant du coup de foudre (b). Lorsque ce traceur négatif approche du sol, le champ électrique est amplifié (les particules de charges opposées s'attirent) et un traceur positif apparaît, ce canal se crée entre le sol et le nuage, dont la différence de charge électrique est importante. Ce canal permet le passage d'un courant électrique de forte intensité : c'est l'arc retour ou coup de foudre (d). Après le premier éclair ainsi généré, d'autres coups de foudres peuvent se produire utilisant le même canal conducteur jusqu'à la décharge complète du nuage. Signalons qu'une phase de courant persistant fait suite au premier arc de retour. Ce courant est souvent à l'origine des effets thermiques les plus importants

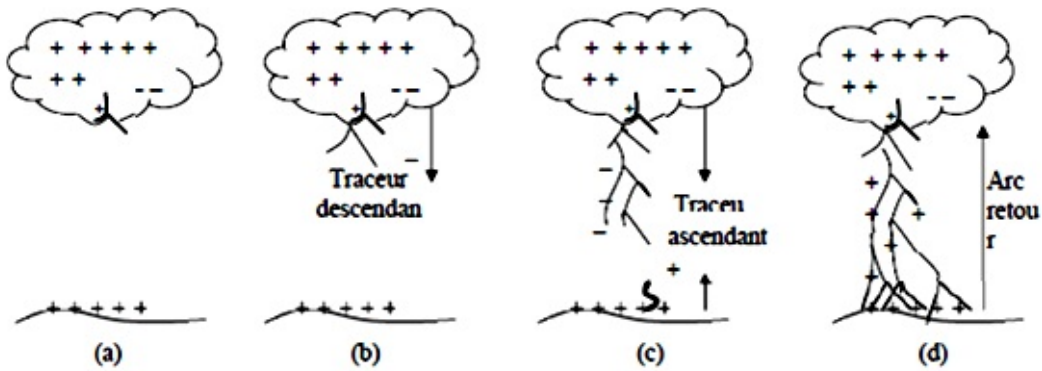


FIGURE 11 – Représentation schématique d’un coup de foudre négatif descendant[1]

1.15 Les phénomènes précurseurs

Le nuage orageux est généralement du type cumulo-nimbus (forme d’enclume, à base de couleur sombre). Il constitue une gigantesque machine thermique dont la base est à 2 km et le sommet à 14 km d’altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l’élévation d’air chaud en provenance du sol, lors de son ascension, cette masse d’air se charge d’humidité jusqu’à devenir un nuage. La partie supérieure où il fait plus froid est occupée par les particules de glace, tandis que les gouttes d’eau s’établissent dans la partie inférieure; Ces dernières se chargent négativement tandis que les particules de glace prennent une charge positive (figure 12).[1]

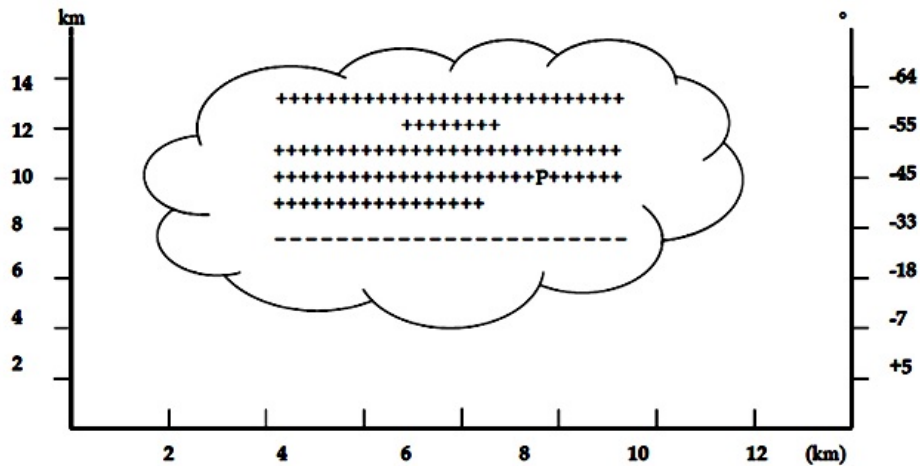


FIGURE 12 – constitution du nuage [1]

1.16 Formation des charges :

Les violents courants d'air ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les microparticules de glace, ce qui provoque la création des charges électriques par frottement.[9]

1.17 Répartition des charges :

Les microparticules des glaces plus légères et chargées positivement, sont emportées par le courant d'air ascendant vers le haut, occupant la partie supérieure du nuage et forment le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement établissent dans la partie inférieure et créés le pôle négatif. Une petite quantité de charges positives demeures à la base du nuage.[9]

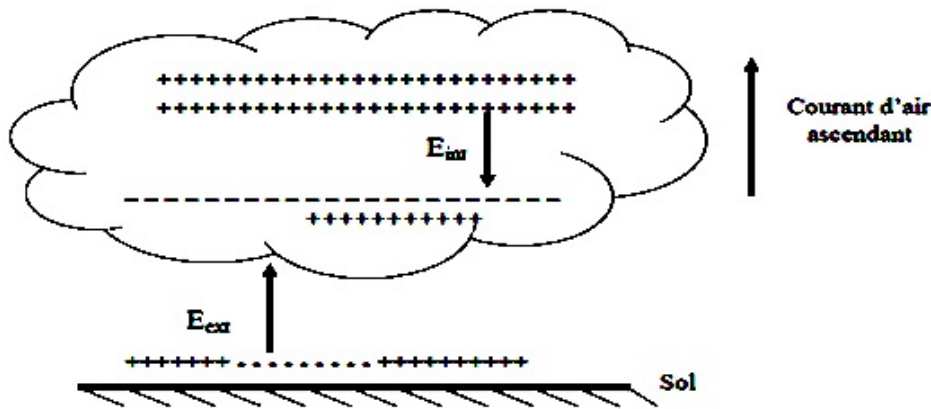


FIGURE 13 – Formation et répartition des charges.[1]

Le nuage fait apparaître sur la terre, par influence électrique, une charge de signe opposé est créée ainsi deux véritables dipôles électriques. Un dipôle interne, généré entre les pôles positif et négatif du nuage : si le champ interne E_{int} devient suffisamment grand, il provoque un claquage interne dans le nuage (E_{clair}).

Un dipôle externe, entre la base du nuage et la surface de la terre : si le champ externe E_{ext} atteint les conditions critiques, il finit par provoquer une grande décharge entre le nuage et la terre (Foudre).[1]

1.18 Comment la foudre impacte les installations électriques des bâtiments :

Les éclairs produisent une énergie électrique impulsionnelle extrêmement importante :

- de plusieurs milliers d'ampères (et de plusieurs milliers de volts),
- de haute fréquence (de l'ordre du mégahertz),
- de courte durée (de la microseconde à la milliseconde)

Les coups de foudre peuvent toucher les installations électriques de trois manières différentes :

- par coup de foudre direct sur une ligne électrique aérienne. La surintensité et la surtension peuvent alors se propager à plusieurs kilomètres du point d'impact,
- par coup de foudre à proximité d'une ligne électrique. C'est le rayonnement électromagnétique qui induit un fort courant et une surtension dans la ligne. Dans ces deux cas, le danger pour l'installation électrique arrive par l'alimentation réseau.
- par coup de foudre à proximité des bâtiments. La terre est alors chargée et monte en potentiel. Le réseau étant à potentiel plus bas, il se crée un courant qui va traverser l'installation électrique en entrant par la terre.

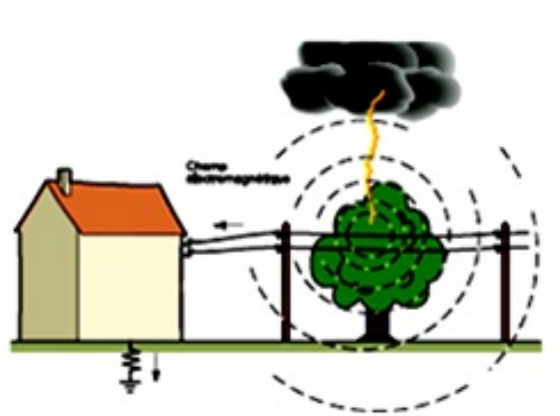


FIGURE 14 – Coup de foudre proche de bâtiments (surtension due au rayonnement électromagnétique)

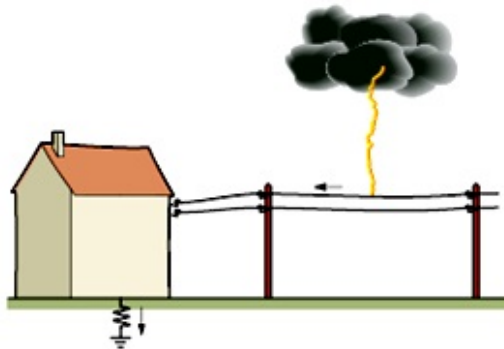


FIGURE 15 – Coup de foudre sur une ligne aérienne (électrique ou téléphonique)

Dans tous les cas, les conséquences pour les installations électriques et les récepteurs peuvent être dramatiques :

- destruction ou fragilisation des composants électroniques,
- destructions des circuits imprimés,
- blocage ou perturbation de fonctionnement des appareils,

1.18.1 Vieillessement accéléré du matériel

:

Les réseaux numériques et analogiques sont affectés de la même manière que les installations électriques basse tension. Les surtensions d'origines atmosphériques sont éliminées à l'aide de parafoudres conçus spécifiquement[5]



FIGURE 16 – Coupe de foudre proche de bâtiments (remontée de potentiel de terre)

1.19 Les effets de la foudre :

1.19.1 Les effets directs :

- Effets mécaniques induits lors d'un impact foudre (déformations, arrachements, destructions,...).
- Effets thermiques (ou "effet Joule") engendrant au point d'impact la fusion voire la destruction par explosion des matériaux ou encore des départs d'incendie.
- Effets électrochimiques se traduisant par la décomposition chimique des matériaux par réactions électrolytiques (négligeables, présents essentiellement au niveau des prises de terre).
- Tensions de pas pouvant provoquer sur les personnes ou les animaux, des brûlures ou des arrêts respiratoires et cardiaques lors de la dispersion du courant de foudre dans des sols hétérogène[5]

1.19.2 Les effets indirects :

- Surtensions induites lors d'un coup de foudre direct sur une ligne électrique ou un pylône. Le courant se propage et atteint toutes les installations distribuées par la ligne même localisées à plusieurs kilomètres du point d'impact.
- Surtensions induites par le rayonnement électromagnétique du courant de foudre sur tous les éléments métalliques proches. Des surtensions et des courants transitoires apparaissent ainsi sur tous les équipements qui leur sont reliés. Les effets sont proportionnels à la puissance et à la proximité du coup de foudre.

- Montées en potentiel de la terre de l'installation, au moment de la dispersion du courant dans le sol, provoquant des différences de potentiels destructrices entre les masses des équipements et les réseaux auxquels ils sont reliés.
- Remontées de terre par dissipation non négligeable du courant de foudre évacué par la terre du paratonnerre, vers la prise de terre de l'installation.[5]

1.20 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait une courte synthèse sur le phénomène de la foudre. La foudre est un phénomène naturel susceptible de détruire une grande diversité de matériels, la quantité d'électricité transportée lors de chaque décharge est extrêmement importante et même dans le cas de petites décharges, provoque des tensions qui excèdent largement les tensions maximum admissibles des matériels électrique.

Nous avons exposé les différents types des surtensions qui peuvent dans les réseaux électriques. Ces surtensions sont classifiées selon leurs origines internes ou externes, ou temporaires, transitoires, selon leurs durées, ou leurs amplitudes, nous avons étudié aussi les caractéristiques électrique de la décharge de foudre en particulier l'onde de foudre réelle et normalisée.

L'étude de différents moyens de protection contre la foudre fera l'objet du chapitre suivant.

2 Chapitre II :Protection contre la foudre et moyen de protection

2.1 Introduction

Les systèmes d'énergie électrique peuvent être assujettis à des surtensions de toute nature. Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants sur les constituants du système d'énergie électrique ; par suite la nécessité de se protéger contre ces surtensions est indispensable. Pour cela, il faut utiliser des moyens de protections très performants et fiables. Dans le transport d'énergie électrique les chercheurs ont été toujours confrontés à la foudre qui est un phénomène perturbateur important sur la gamme de puissance et tous les niveaux de tensions. Les coups de foudre peuvent être direct s'ils tombent directement sur une structure, les moyens de protection dans ce cas sont les paratonnerres (protection primaire), est indirect s'ils frappent le sol au voisinage d'une structure, les moyens de protection dans ce cas sont les parafoudres (protection secondaire)

2.2 Protection contre la Foudre

Le but de protection contre la foudre est de définir les dispositions à prendre contre les coups de foudre directs et indirects pour obtenir, dans l'état actuel des connaissances de la technique et de la réglementation en vigueur, un système de protection satisfaisant des personnes et des structures :

2.2.1 Installation Extérieure de Protection contre la Foudre (IEPF)

Protection contre les effets directs de la foudre. L'étude tient compte des risques inhérents du site.

La solution proposée sera adaptée aux spécificités de chaque bâtiment ou structure étudié.

2.2.2 Installation Intérieure de Protection contre la Foudre (IIPF)

Protection contre les effets indirects de la foudre. Les coups de foudre sur le site ou à proximité peuvent provoquer des effets de claquage et des courants vagabonds qui sont des facteurs déclenchants dans les zones à risque ou bien destructeurs pour les équipements électroniques. Les réseaux de terre doivent être réalisés de manière à s'assurer une montée en potentiel uniforme des terres et des masses sur le site.

Par ailleurs, il faut vérifier que les surtensions transitoires susceptibles d'être transmises par des lignes électriques ne soient pas un éventuel facteur déclenchant dans les zones à risque et prévoir, s'il y a lieu, des parafoudres.

2.2.3 Une partie sera consacrée aux procédures et notices de vérification

L'inspection d'un système de protection doit être menée par une entreprise spécialisée et qualifiée. Les vérifications ont pour objet de s'assurer que :

- l'installation de protection contre la foudre est conforme à la conception de l'étude technique
- tous les composants de l'installation de protection contre la foudre sont en bon état et peuvent assurer les fonctions auxquelles ils sont destinés et qu'il n'y a pas de corrosion
- toutes les dispositions ou constructions récemment ajoutées sont intégrées dans le système de protection contre la foudre.

2.2.4 Une dernière partie sera consacrée au carnet de bord :

Le carnet de bord est un document dans lequel est consigné l'historique de l'installation de protection contre la foudre. il doit être tenu à disposition de l'organisme d'inspection des installations classées.

2.3 Type de Système de Protection Foudre (SPF)

Les types de Systèmes de protection foudre sont déterminés en fonction des caractéristiques de la structure à protéger et des niveaux de protection définis dans l'Analyse du Risque Foudre.

Les correspondances entre les niveaux de protection et les types de SPF sont les suivantes[22]

Niveaux de protection	Types de SPF
<i>I</i>	<i>1</i>
<i>II</i>	<i>II</i>
<i>III</i>	<i>III</i>
<i>IV</i>	<i>IV</i>

Tab(2.1) : les niveaux de protection[22]

2.3.1 Choix du type de l'Installation Extérieure de Protection Foudre

Une installation extérieure de protection foudre permet de protéger une structure contre les impacts directs de la foudre; elle peut être isolée ou non de la structure à protéger.

2.3.1.1 Installation non isolée : dans la plupart des cas, le système de protection extérieur peut être fixé sur la structure à protéger

2.3.1.2 Installation isolée : il est recommandé qu'une installation isolée soit utilisée si l'écoulement du courant de foudre dans les parties conductrices internes peut entraîner des dommages pour la structure. Les SPF isolés sont réalisés avec des tiges ou des mâts de capture installés à proximité de la structure à protéger ou par des fils tendus entre les mâts.

2.4 Principes d'Installations Extérieures de Protection Foudre

La foudre est un phénomène électrique qui véhicule des courants forts avec un spectre de fréquences étendu. Pour assurer une bonne protection contre l'atteinte directe, il faut respecter les principes de base suivants :

- capter et canaliser les courants de foudre vers la terre à travers des conducteurs de faible impédance
- l'installation de protection est conçue de telle manière que le chemin de liaison à la terre soit le plus direct possible
- la valeur des prises de terre paratonnerre recommandée est inférieure à 10 ohms
- l'équipotentialité des différentes prises de terre est réalisée
- les masses métalliques sont reliées à la terre
- l'installation de protection contre la foudre doit permettre un contrôle et un entretien aisés. Une installation IEPF comporte, reliés entre eux :
 - le système de capture
 - le système d'écoulement à la terre
 - les prises de terre.

La probabilité de pénétration d'un coup de foudre dans la structure à protéger est considérablement réduite par la présence d'un dispositif de capture convenablement conçu.

La probabilité de pénétration d'un coup de foudre dans la structure à protéger est considérablement réduite par la présence d'un dispositif de capture convenablement conçu. répétition

Il existe des systèmes de protection qui diffèrent en fonction des dispositifs de capture et du principe d'écoulement des courants de foudre à la terre. Ces dispositifs de capture peuvent être constitués par une combinaison des composants suivants :

- paratonnerre à tige simple
- conducteurs maillés
- paratonnerre à dispositif d'amorçage
- fils tendus
- composants naturels, etc[22]

2.5 La protection primaire

Pour protéger une structure contre les coups de foudre, il convient de privilégier un point d'impact possible afin d'épargner le reste de la structure et de faciliter l'écoulement de courant électrique vers le sol en minimisant l'impédance de parcours utilisée par la foudre. [8] Le dispositif de protection qui répond à cette préoccupation est le paratonnerre. Le paratonnerre est un dispositif inventé en 1752 par Benjamin Franklin. Il était conçu à l'origine afin d'écouler à la terre le fluide électrique contenu dans le nuage et ainsi empêcher la foudre de tomber. [2]

2.5.1 Le paratonnerre à tige simple (protection non isolée)

Ce type d'installation consiste en la mise en place d'un ou plusieurs paratonnerres à tiges, érigés en partie haute des structures à protéger.

L'angle de protection concernant la zone protégée par ces tiges dépend du niveau de protection requis sur le bâtiment concerné et de la hauteur du dispositif de capture au-dessus du volume à protéger.

Le paratonnerre est un conducteur relié à la terre qui présente au sommet une forme pointue. Il est placé sur ou près de l'installation à protéger. Grâce au pouvoir de pointe, une décharge créée au sommet du paratonnerre progresse à la rencontre et la capture de traceur de la foudre pour dévier le courant vers la terre [1]

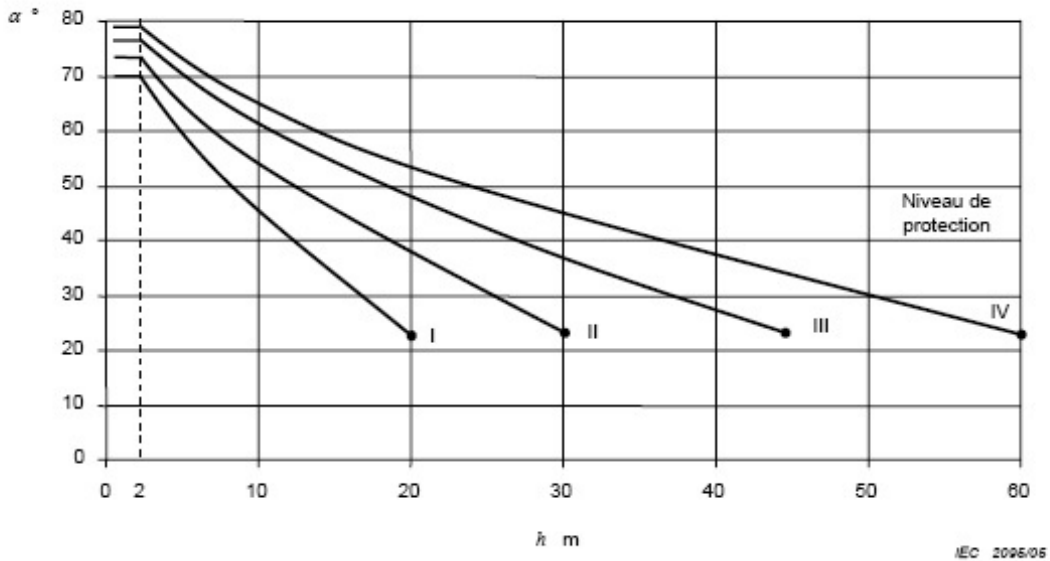


FIGURE 17 – Détermination de l'angle de protection en fonction de la hauteur de la tige du paratonnerre et du niveau de protection[1]



FIGURE 18 – Paratonnerre à tige simple [1]

La zone de capture est définie comme un volume bien déterminé pour lequel l'entrée en contact d'un canal ionisé, provoquera à coup sur l'amorçage du coup de foudre sur le sommet de la tige. [1]

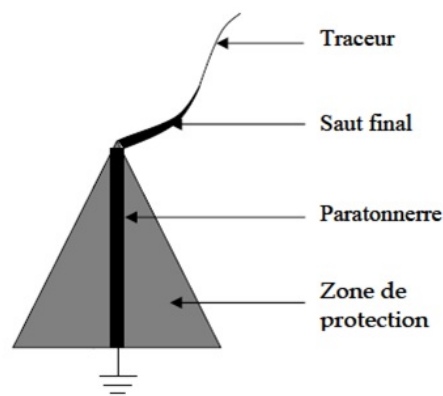


FIGURE 19 – Zone de protection d'un paratonnerre à tige simple. [1]

2.5.2 Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA) (protection non isolée)

C'est un paratonnerre à tige simple, équipé d'un système électrique ou électronique générant une avance à l'amorçage (avance au démarrage de la pré-décharge ascendante), il est mis à l'évidence lorsqu'il est comparé dans les mêmes conditions à un paratonnerre à tige simple. Ce dispositif d'amorçage permet de réduire le temps de propagation et de formation de la décharge ascendante. Il assure une plus grande efficacité pour la capture de la foudre qu'un paratonnerre passif à tige. [5]

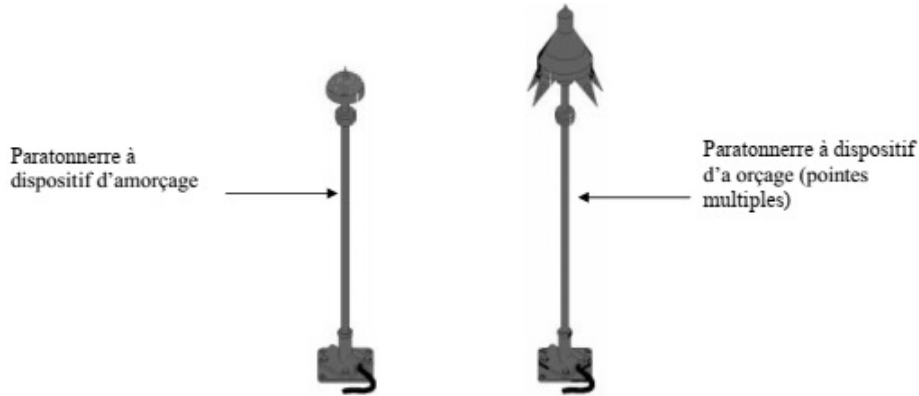


FIGURE 20 – Paratonnerre à dispositif d'amorçage. [1]

2.5.2.1 Le principe d'avance à l'amorçage :

La description du phénomène de foudroiement au sol présentée ci-dessus, montre que des phénomènes précurseurs au niveau du sol annoncent un coup de foudre imminent. Ces phénomènes sont [23] :

- l'accroissement brutal du champ électrique,
- le phénomène de pré-décharge au niveau des proéminences d'objet au sol,
- la compétition des traceurs ascendants.

Le raisonnement simple qui a conduit à développer les PDA est le suivant :

- si un dispositif de protection génère un traceur ascendant avant un objet à proximité, il doit logiquement gagner lors de la compétition des traceurs ascendants. C'est le principe de base du PDA. Il doit montrer une avance d'instant d'amorçage ΔT par rapport à un PTS.
- si un dispositif montre une avance à l'amorçage ΔT , le traceur qu'il génère va parcourir une distance D , plus grande par rapport à un PTS, pour rencontrer le traceur descendant. Il va capter la foudre à une distance plus grande, son rayon d'action est par conséquent augmenté. A partir de la vitesse de propagation du traceur ascendant v , on obtient donc l'accroissement de son rayon d'action. [23]

$$\Delta L = V \cdot \Delta V$$

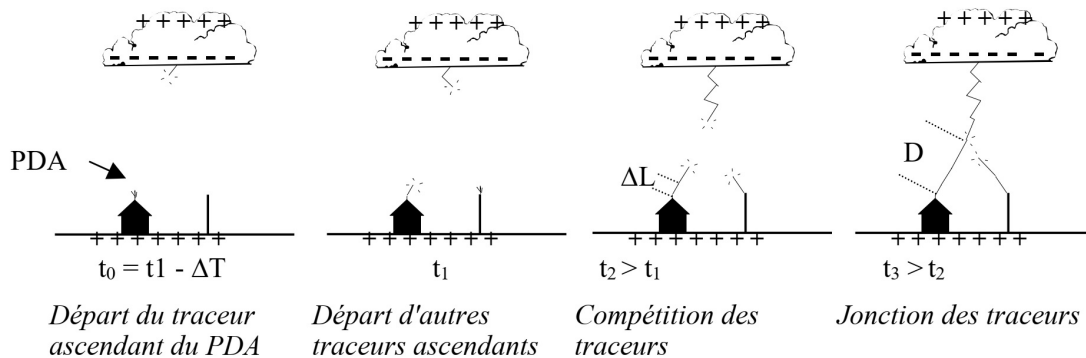


FIGURE 21 – La description du phénomène de foudroiement au sol [23]

2.5.2.2 Différents types de PDA :

Les paratonnerres non conventionnels sont appelés actifs ou à avance à l'amorçage. Différents types de paratonnerres sont appelés PDA. Il est important de distinguer les catégories car les techniques utilisées sont différentes et cela se traduit par des comportements différents.

Il existe quatre types de PDA :

- a- radioactif,
- b- à déclenchement électronique,
- c- piézo-électrique,
- d- à profil spécial.

a Les paratonnerres radioactifs : Le paratonnerre radioactif est un paratonnerre à tige simple auquel est ajouté au voisinage de la pointe une enceinte contenant un élément radioactif. La source radioactive génère une ionisation importante de l'air au voisinage de la pointe du paratonnerre, augmentant ainsi le nombre d'électrons germes capables d'initier la première phase d'attachement de la foudre. Plusieurs dizaines de milliers de paratonnerres radioactifs ont été installés en France depuis 1930.

Depuis 1986, la fabrication et la vente des paratonnerres utilisant des sources radioactives est interdite en France (arrêté publié au J.O. du 23 octobre 1983). Pour remplacer ce produit, les concepteurs de paratonnerres ont imaginé d'autres manières d'ioniser l'air au niveau du paratonnerre [6] ; c'est la raison pour laquelle les paratonnerres à

dispositif électrique sont apparus.

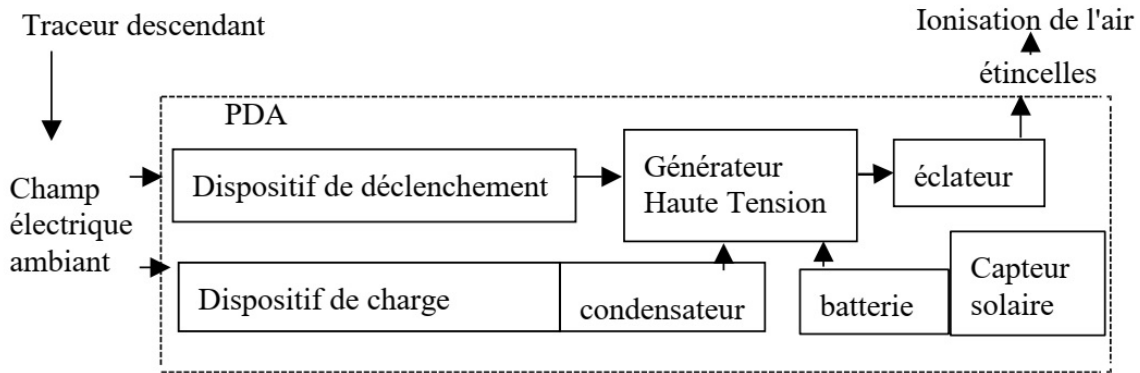
b Les paratonnerres à déclenchement électronique : Le paratonnerre à circuit électronique est un paratonnerre à tige simple auquel a été ajouté un circuit électronique permettant de produire une ionisation de l'air pour générer un traceur ascendant. L'ionisation de l'air est obtenue en générant des étincelles au voisinage immédiat de la pointe du paratonnerre. Des produits en cours de développement utilisent d'autres techniques que la génération d'étincelles pour produire un traceur ascendant déclenché. L'ionisation de l'air au niveau de la pointe va augmenter le nombre d'électrons germes et ainsi accroître la probabilité d'initiation de l'effet Corona si le champ électrique ambiant a atteint une valeur suffisante.

Le perfectionnement apporté par ces paratonnerres, par rapport aux paratonnerres radioactifs, est que l'ionisation de l'air peut être déclenchée à un moment précis. Une grande partie de l'efficacité du système dépend de l'instant de déclenchement ; généré trop tôt le traceur ne pourra pas se propager suffisamment loin car le champ électrique généré par le traceur descendant ne serait pas suffisant ; généré trop tard le PDA n'a plus d'avantage.

Pour créer les étincelles qui vont ioniser l'air, le PDA contient un générateur de haute tension électrique. Ce générateur a besoin d'énergie. Pour l'alimenter plusieurs techniques sont retenues :

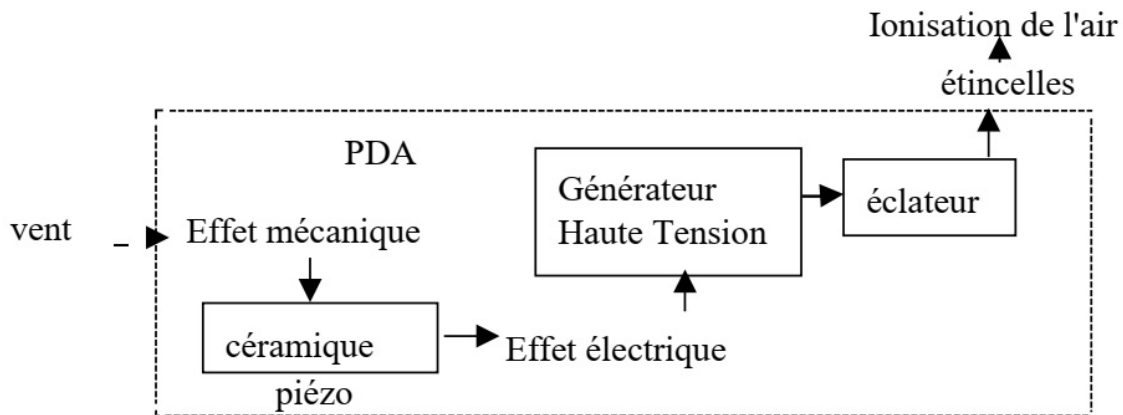
- une batterie utilisée comme réservoir d'énergie, qui sera chargée par un panneau solaire,
- des éléments de capture de l'énergie issus du champ électrique statique ambiant. (le champ électrique est très important en présence d'un nuage orageux, un courant issu d'une antenne charge un condensateur de stockage d'énergie).

Le déclenchement des pré-décharges ascendantes (streamers), suivi d'un traceur ascendant (leader) lorsque les conditions sont réunies, est piloté par un capteur de champ électrique. Le champ électrique augmente, puis varie brusquement à l'approche d'un traceur descendant. La sensibilité de ce capteur et le réglage du seuil de déclenchement sont les paramètres critiques pour l'avance à l'amorçage du PDA à déclenchement électronique.



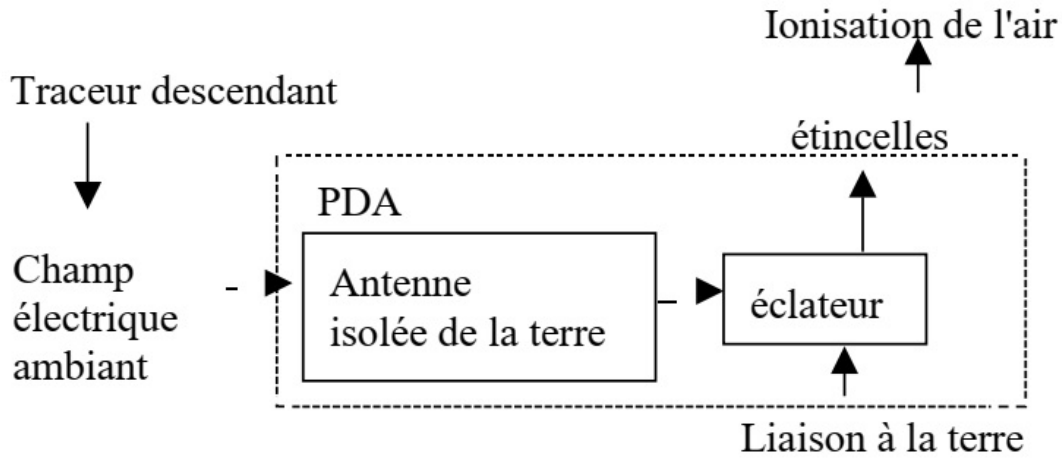
structure(2.1) : Les paratonnerres a déclenchement électronique

c Les paratonnerres piézo-électriques : Le paratonnerre piézo-électrique tire l'énergie nécessaire à son fonctionnement d'un élément piézo-résistif mis en œuvre par les forces éoliennes. La partie supérieure du paratonnerre repose en équilibre sur une céramique. Le vent fait osciller la partie supérieure du PDA qui va comprimer le piézo. La tension mécanique est transformée en tension électrique par l'élément piézo-résistif. Cette tension est appliquée au niveau d'une pointe effilée à l'intérieur du volume creux de la pointe du paratonnerre. Cette pointe auxiliaire est portée suivant les conditions atmosphériques à une tension suffisamment élevée pour générer des ions par effet Corona. Ces ions vont être dirigés vers la pointe du paratonnerre par effet Venturi. Il n'y a pas dans ce cas de circuit de commande du déclenchement du traceur ascendant, mais une augmentation de la densité d'électrons germes au voisinage de la pointe du paratonnerre.



structure(2.2) : Les paratonnerres piézo-électriques

d Les paratonnerres à profil spécial : Ces paratonnerres captent l'énergie rayonnée par le traceur descendant de la foudre par un système composé d'un paratonnerre à tige simple (relié à la terre) et des parties métalliques isolées (au potentiel électrique ambiant). Juste avant le coup de foudre, la tension entre la pointe à la terre et les autres parties métalliques augmente très rapidement pour atteindre plusieurs milliers de volts. Dès que le potentiel a atteint la tension d'ionisation de l'air, des étincelles sont produites au niveau d'un éclateur qui génère les premières phases de l'attachement de la foudre.



structure(2.3) :Les paratonnerres à profil special

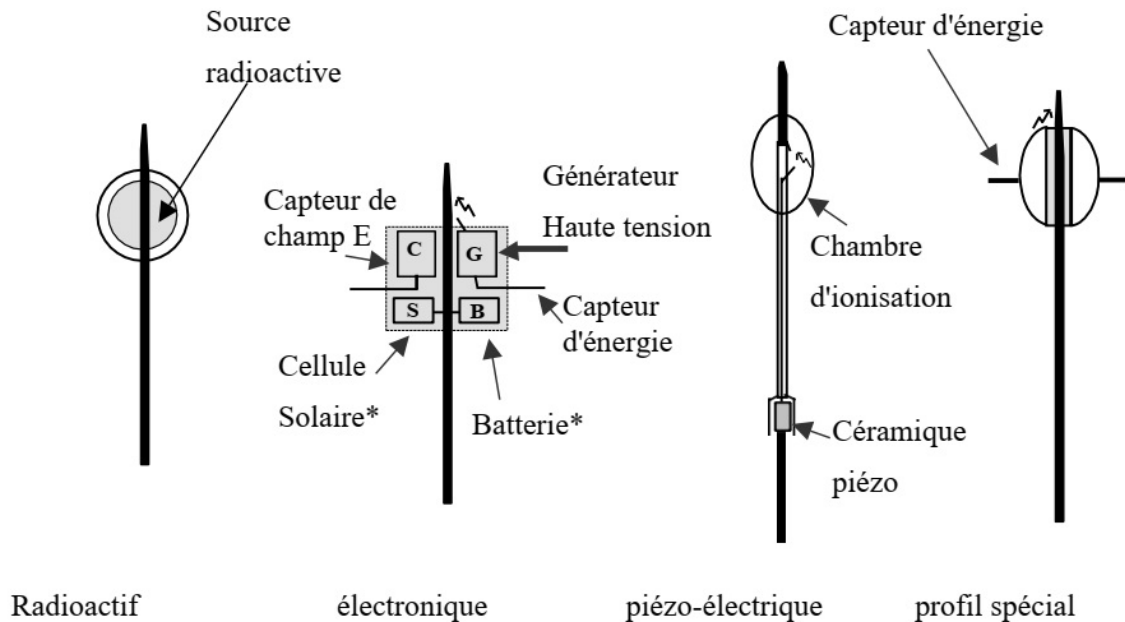


FIGURE 22 – Représentation schématique des différents types de PDA[22]

2.5.3 Le paratonnerre à cage maillée : (cage de Faraday - protection non isolée)

La protection par cage maillée consiste en la réalisation sur le bâtiment d'une cage à mailles reliées à des prises de terre. Le système à cage maillée répartit l'écoulement des courants de foudre entre les diverses descentes, et ceci d'autant mieux que les mailles sont plus serrées. La largeur des mailles en toiture et la distance moyenne entre deux descentes dépendent du niveau de protection requis sur le bâtiment[22].

Le paratonnerre à cage maillée utilise le principe de protection de type cage de Faraday. Il est constitué d'un ensemble des conducteurs entourant une structure ou un bâtiment, il se caractérise par la taille des mailles formées par les conducteurs disposés verticalement et horizontalement. Tant que le maillage est serré, la protection sera meilleure. Tout point d'une cage maillée peut être le siège d'un impact direct.

Tab(2.2) : Largeur des mailles et distances habituelles entre les descentes et le ceinturage en fonction du niveau de protection

Niveau de protection	Taille des mailles en toiture (m)	Distance moyenne entre 2 descentes (m)
II	10 x 10	10
III	15 x 15	15
VII	20 x 20	20

Tab(2.2) : Largeur des mailles et distances habituelles entre les descentes et le ceinturage en fonction du niveau de protection

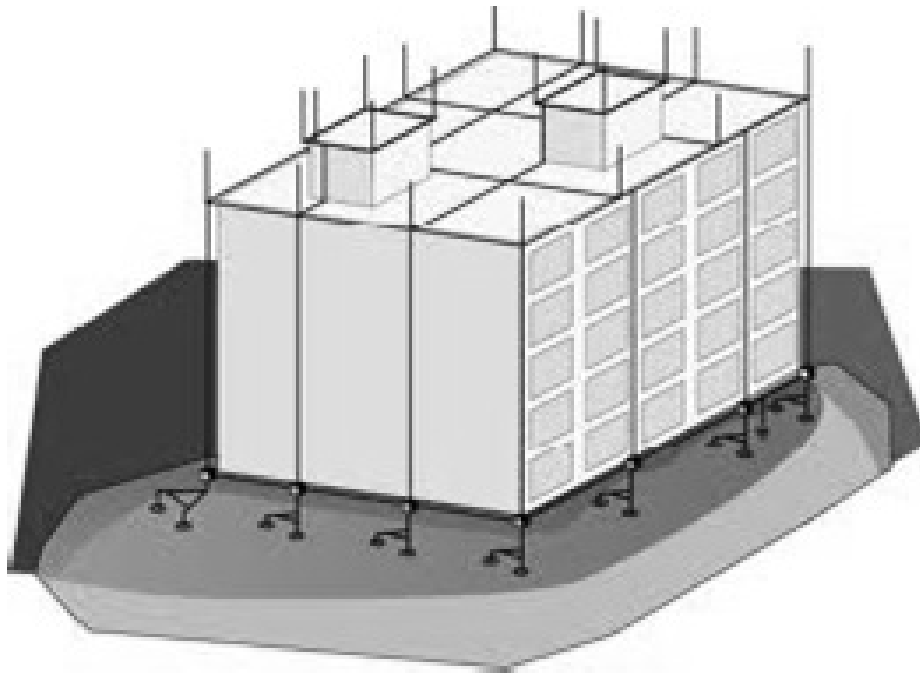


FIGURE 23 – Paratonnerre à cage maillée[1]

2.5.4 Le paratonnerre à fils tendus (protection isolée)

Ce système est constitué d'un ou de plusieurs fils conducteurs tendus au dessus des installations à protéger.

La zone de protection se détermine par application du modèle électro géométrique. Les conducteurs doivent être reliés à la terre à chacune de leur extrémité. L'installation de fils tendus nécessite une étude particulière tenant compte notamment de la tenue mécanique, de la nature de l'installation et des distances d'isolement[22].

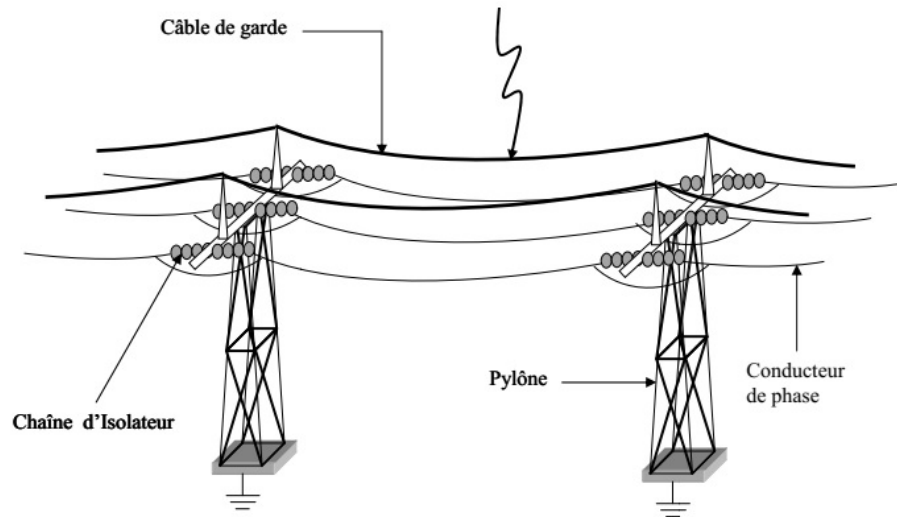


FIGURE 24 – Schéma de câbles de garde[24]

Remarques : Il y a une dizaine d'années, pour les raisons économiques, les câbles de garde sont placés généralement à l'entrée et la sortie des postes. Mais actuellement, comme il est utilisé pour les communications à haute fréquence par SONELGAZ, le câble de garde tend à relier tout le réseau national (HT).

Le câble de garde a un diamètre inférieur ou égal au conducteur de phase. En plus de rôle de protection, il contribue à l'amortissement des ondes de surtension de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phases ainsi que le blindage possible des lignes des télécommunications.

Signalons que la majorité des coups de foudre sur conducteur provoque un amorçage pour les réseaux de tensions inférieures à 400 kV. L'amorçage de la ligne lors d'un coup direct étant certain, on cherche à s'en protéger en plaçant des câbles de garde. [1]

- Pour les lignes de tensions inférieures à 90kV, les fils de garde ne constituent qu'une protection illusoire. [1]

Note : la protection isolée peut également être réalisée au moyen d'un ou plusieurs paratonnerres (tige simple ou paratonnerre à dispositif d'amorçage) positionnés sur des mâts situés à proximité de la zone à protéger.

2.6 Modèle électrogéométrique de base

Le modèle électrogéométrique est un modèle de prédiction physico-mathématique. Son but est de déterminer les points d'impact les plus probables de la foudre, afin de prévoir les dispositifs de protection les plus appropriés (paratonnerres, cages de Faraday, fils tendus) et de minimiser éventuellement les dégâts sur les équipements industriels ou le personnel. Ce modèle est appelé "modèle électro géométrique" parce qu'il combine les paramètres électriques et géométriques. L'application de la méthode de la sphère fictive, a permis de définir la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal [10].

L'électricien a essayé de modéliser, dans une expression analytique simple, la distance entre l'extrémité du traceur par bonds descendant et un objet au sol pour laquelle une décharge ascendante peut se développer à partir de cet objet. Cette distance (D) appelée distance d'amorçage (striking distance) est donnée par l'expression suivantes :

$$D(I) = \alpha \cdot I^\beta \quad (1)$$

Où I est l'amplitude de la crête du futur courant de foudre de l'arc en retour, dit aussi courant prospectif.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle universellement reconnu et les paramètres α et β varient dans d'assez grande proportions : β varie entre 0,6 et 0,8 et α entre 6 et 10, ce dernier étant fonction de la hauteur de la structure susceptible d'attirer la foudre. En accord avec d'autres chercheurs, Whitehead [24] a proposé l'expression donnée par relation (1)

2.6.1 Mise en œuvre du modèle électrogéométrique

2.6.1.1 Méthode de la sphère fictive :

Le modèle électrogéométrique permet de déterminer la zone à protéger par la méthode de la sphère fictive [10]. Pour mettre en relief la notion de zone de protection ou de capture, une méthode graphique simple, appelée méthode de la sphère fictive a été mise au point. Son principe consiste à considérer une sphère de rayon D (distance d'amorçage) et qui a pour centre la tête du traceur par bonds. La sphère se met en mouvement dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact soit avec le sol, soit avec un objet proéminent.

La zone de protection est limitée par une parabole, définie par l'ensemble des points à égale distance de la pointe du paratonnerre et du sol. [11]

Le point d'impact de la foudre est déterminé par l'objet au sol le plus proche de la distance d'amorçage d du traceur. Tout se passe comme si le traceur était entouré d'une sphère fictive de rayon D se déplaçant avec lui. Pour une bonne protection, il faut que la sphère fictive roulant sur le sol atteigne le paratonnerre sans toucher les objets à protéger [18].

Ce modèle (élaboré par Armstrong, Golde, Darvenizia et Whitehead) a été vérifié au cours d'une importante campagne d'investigation sur des lignes de transport d'énergie

électrique à haute tension [18].

La rencontre réelle entre traceur descendant et décharge ascendante s'effectue approximativement à mi-chemin de la distance d'amorçage, d'après ce modèle, l'objet qui se trouvera en premier à la distance d'amorçage de la pointe du traceur constituera le point d'impact [24].

L'application de ce modèle nécessite de le compléter par l'hypothèse que la distance d'amorçage définie auparavant reste applicable quel que soit la nature des objets au sol, que ces objets soient le sol plat lui-même, une pointe du paratonnerre, un fil conducteur tendu horizontalement, les parties externes métalliques d'un bâtiment, ou encore les arbres [24].

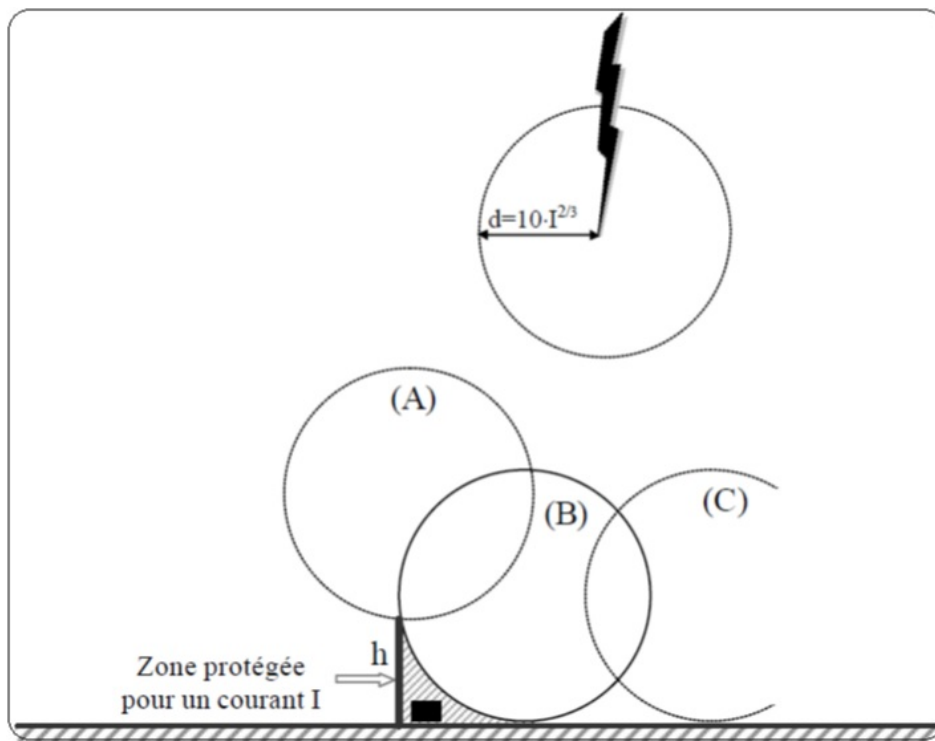


FIGURE 25 – Méthode de la sphère fictive[24]

2.6.1.2 Les différentes zones de protection :

- a Zone de protection de deux tiges verticales.
- b Zone de protection de quatre tiges verticales identiques.
- c Zone de protection de quatre tiges verticales différentes.
- d Zone de protection d'un fil tendu horizontalement.
- e Zone de protection d'une nappe de fils horizontaux.

2.6.2 Application du modèle électrogéométrique

a - Zone de capture d'un paratonnerre horizontal :

Considérons l'ensemble des sphères qui touchent simultanément le paratonnerre horizontal et le sol. Le lien des centres de ces sphères délimite la zone d'attraction du paratonnerre horizontal. Ainsi, on montre que :

Si $D < h$: Effet du paratonnerre horizontal non envisagé.

Si $D \geq h$: $X^2 - 2Yh + h^2 = 0$. Où h est la hauteur du paratonnerre horizontal. En réalité on obtient une surface de symétrie axiale autour du paratonnerre horizontal dont la hauteur maximale d'un objet protégé est : $P = 2D - h$ (figure 26)

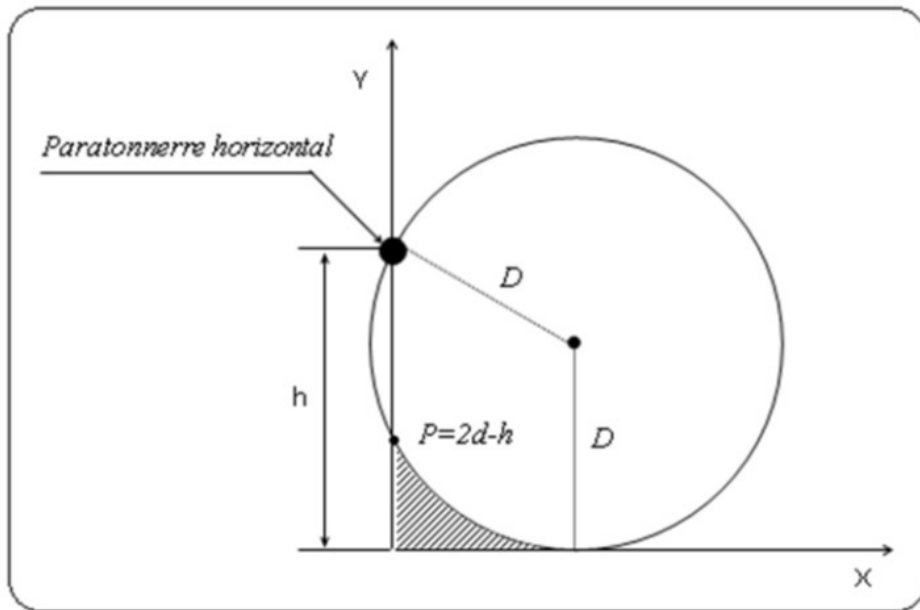


FIGURE 26 – Zone de protection d'un paratonnerre horizontal[24]

b - Zone de capture d'une tige verticale :

La construction géométrique d'une tige verticale (figure 26) est la même que la précédente (5). Sauf que la zone de protection a une symétrie de révolution au lieu d'une symétrie axiale. Donc le volume de capture est constitué d'un cône et d'un parabolôïde, on a :

Si $D < h$: $Y = X$

Si $D \geq h$: $X^2 - 2Yh + h^2$

Où h est la hauteur de la tige verticale. La surface de capture, dans ce cas est définie par :

$$S = \pi h^2 \left[\frac{2D}{h} - 1 \right]$$

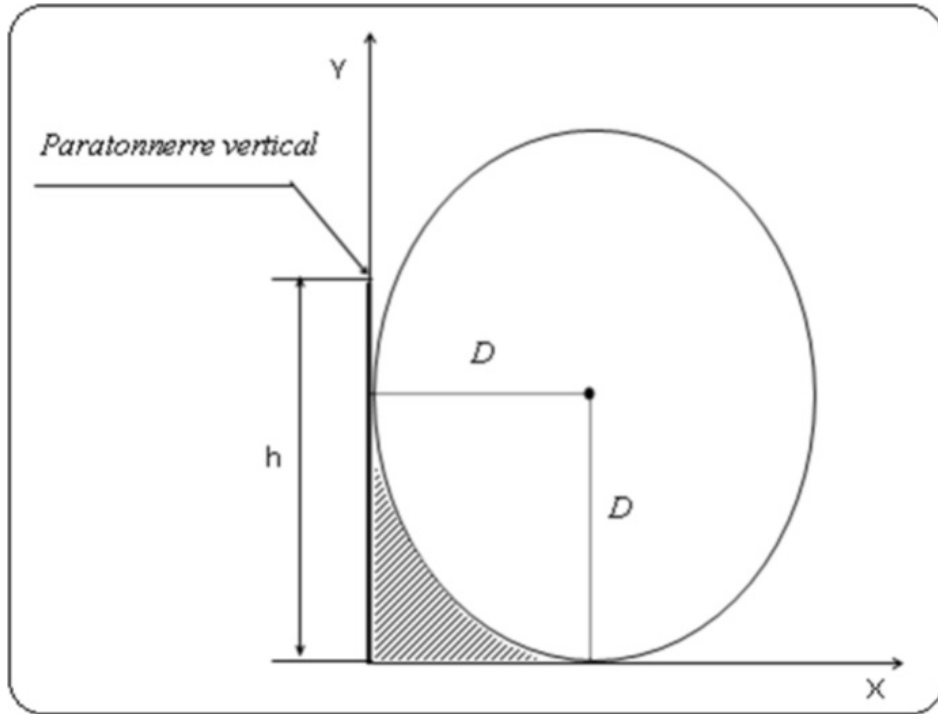


FIGURE 27 – zone de protection d'un paratonnerre vertical[24]

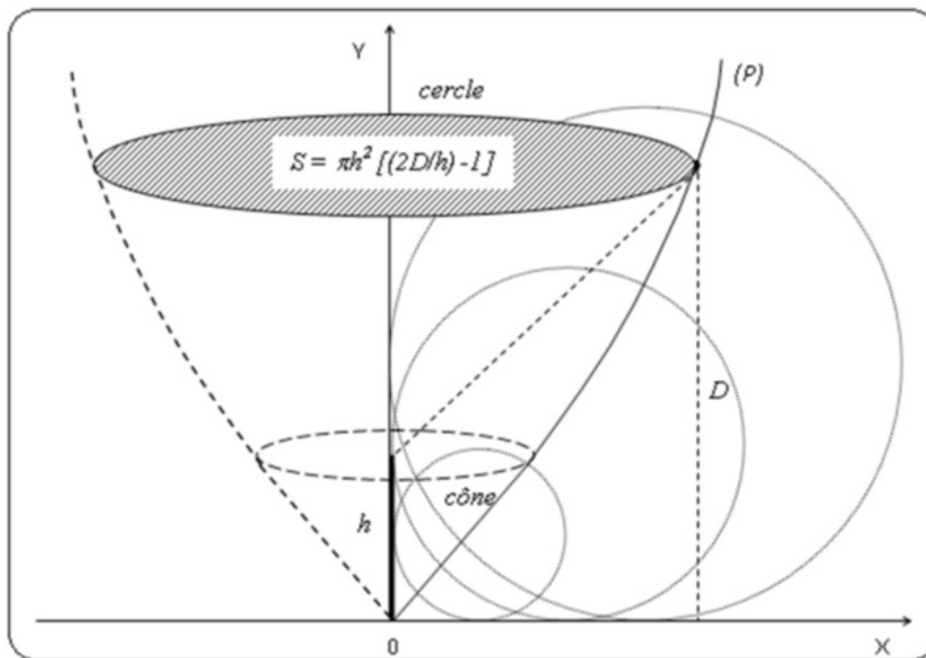


FIGURE 28 – zone de protection d'un paratonnerre vertical de hauteur h [24]

2.6.3 Critique du modèle électro géométrique

Malgré ces dernières considérations, sérieuses objections peut-on porter au modèle électro géométrique, ainsi qu'à la méthode de la sphère fictive aussi. Les unes de ces objections sont présentées dans la littérature de spécialité. Par exemple, Gary observe [16] :

- a Qu'il est invraisemblable que la grandeur et la forme des proéminences qui se trouvent à la surface de la terre n'influencent pas la formation des traceurs ascendants
- b Le modèle électro géométrique, dont la théorie s'appuie sur les propriétés des foudres négatives, est appliqué, sans justification pertinente, aux foudres positives aussi. 'est centrée l'activité du laboratoire de l'ENP depuis plusieurs années.

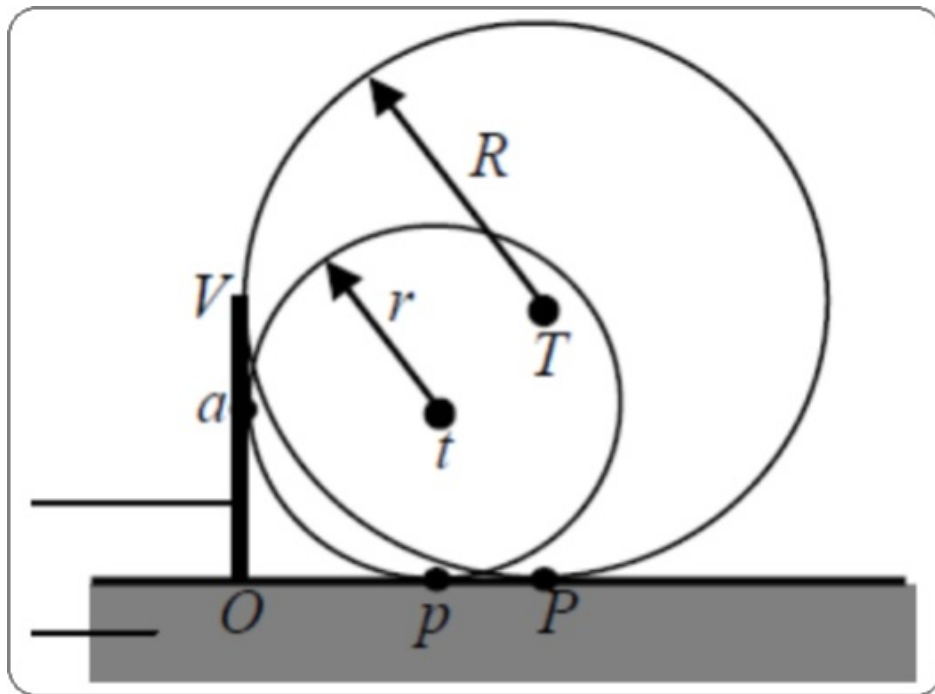


FIGURE 29 – Détermination des zones de protection de deux coups avec des courants de deux intensités différentes[24]

La méthode de la sphère fictive, conduit à des conclusions qui contredisent la réalité et le bon sens technique. Ainsi, comme on peut observer de la Figure (29), la surface de la zone de protection qui correspond à un courant de foudre plus petit (la surface du triangle Oap) est plus petite que la zone qui correspond à un courant plus grand (la surface du triangle OVP). Il résulte la conclusion étonnante que les foudres sont d'autant plus dangereuses, que l'intensité du courant transporté est plus petite. Les foudres d'intensité plus petite se pénètrent dans la zone de protection , offerte par le courant pris en considération lors de la conception de l'installation de parafoudre, en produisant des dégâts matériels ou même des accidents.

D'autre part, on constate que la théorie électrostatique fait totalement abstraction du rôle actif de la terre dans le déroulement des phénomènes. Dans le modèle de monsieur Horvath, les surfaces équipotentiels qui se forment autour de la charge transportée par la foudre sont, toutes, des sphères concentriques, dont les centres se trouvent dans le point où se trouve le sommet du traceur. Une telle géométrie peut exister seulement quand le champ électrique se développe dans un espace infini, loin des surfaces de frontières constituées, par exemple, par la surface de la terre (y compris les surfaces de tous les incidents de terrain, comme sont les constructions aussi). Les charges électriques induites sur la surface conductrice de la terre perturbent cette géométrie, les sphères équipotentiels cessent d'être concentriques [24].

2.7 Protection secondaire

La protection des installations électriques contre les surtensions produites par la foudre sur les conducteurs actifs des liaisons électriques est réalisée par l'utilisation des éclateurs

des parafoudres, qui ont pour but de dévier l'énergie de l'impulsion directement vers la terre et de réduire l'amplitude des surtensions. [8]

2.7.1 Eclateurs

L'éclateur est le plus simple, le plus ancien, le plus robuste et le moins cher des moyens de protection. Il est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger, l'autre à la terre. L'intervalle d'air entre les deux électrodes constitue un point faible dans l'installation du réseau, évitant ainsi qu'un amorçage n'ait lieu en un point du réseau où il pourrait avoir des conséquences graves. La distance entre ces deux électrodes est réglable et détermine la tension d'amorçage [25].

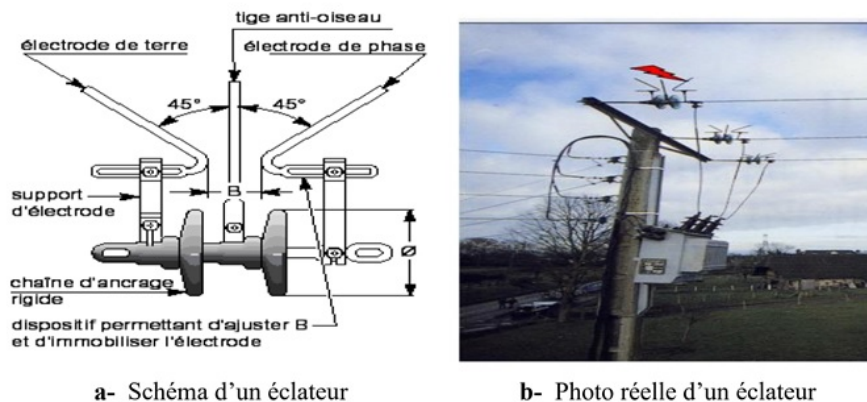


FIGURE 30 – Eclateurs[25]

2.7.1.1 Avantage Les principaux avantages des éclateurs sont :

- 1 Leur faible prix.
- 2 Leur simplicité.
- 3 La possibilité de réglage de la tension d'amorçage[20] .

2.7.1.2 Inconvénients Les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité, pression) qui modifient l'ionisation du milieu diélectrique (l'air) entre les électrodes.

- L'élément d'amorçage dépend de la valeur de la surtension.
- L'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase terre à fréquence industrielle en raison du maintien de l'arc, celui-ci dure jusqu'à son élimination par les appareils de coupure (ce court-circuit s'appelle courant de suite). Cela rend nécessaire l'installation de disjoncteurs shunt ou de dispositifs de réenclenchement rapide sur les disjoncteurs situés en amont. De ce fait, les éclateurs sont inadaptés à la protection d'une installation contre les surtensions de manœuvres.
- L'amorçage provoque l'apparition d'une onde coupée à front raide susceptible d'endommager les enroulements des transformateurs ou des moteurs situés à proximité [20].

2.7.2 Les parafoudres

Pour palier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et une bonne continuité de service. Le nom parafoudre vient de fait que, historiquement, le foudroiement était la première cause de surtension contre la quelle on désirait se protéger. Le parafoudre est un dispositif destiné à limiter les surtensions transitoires et à dériver les ondes de courant vers la terre, afin de limiter l'amplitude de cette surtension à une valeur non dangereuse pour l'installation électrique et l'appareillage électrique. En cas de surtension supérieure au seuil U_c , le parafoudre devient conducteur et évacue rapidement l'énergie à la terre. Les parafoudres à résistances variables avec un ou plusieurs éclateurs sont les plus répandus dans les installations HT et MT en exploitation depuis quelques années. La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleurs. [20]

2.7.3 Parafoudre à carbure de Silicium (SiC)

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

31), l'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote) [25].

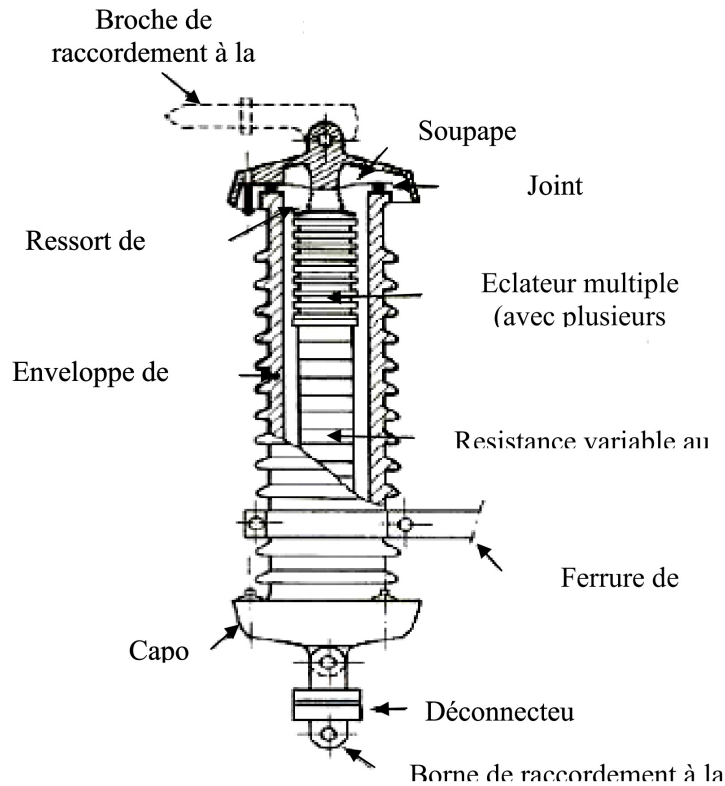


FIGURE 31 – Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs[1]

2.7.3.1 Principe de fonctionnement En fonctionnement normal, les éclateurs ne sont conducteurs. Lorsque une surtension supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers des résistances dont la valeur est d'autant plus faible que la tension 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 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 [20].

2.7.4 Parafoudres à oxyde de zinc (ZnO)

Ils sont constitués uniquement de varistances et remplaçant de plus en plus les parafoudres à résistances variables et éclateurs. L'absence d'éclateur fait que le parafoudre ZnO est continuellement conducteur, mais sous la tension nominale du réseau protégé, Leur principe de fonctionnement est très simple et repose sur la caractéristique fortement non linéaire des varistances ZnO. Cette non-linéarité est telle que la résistance

passe de 1,5 MW à 15 W entre la tension de service et la tension au courant nominal de décharge. Ces parafoudres ont pour avantages des performances de limitation et une fiabilité accrue par rapport aux parafoudres à carbure de silicium [20].

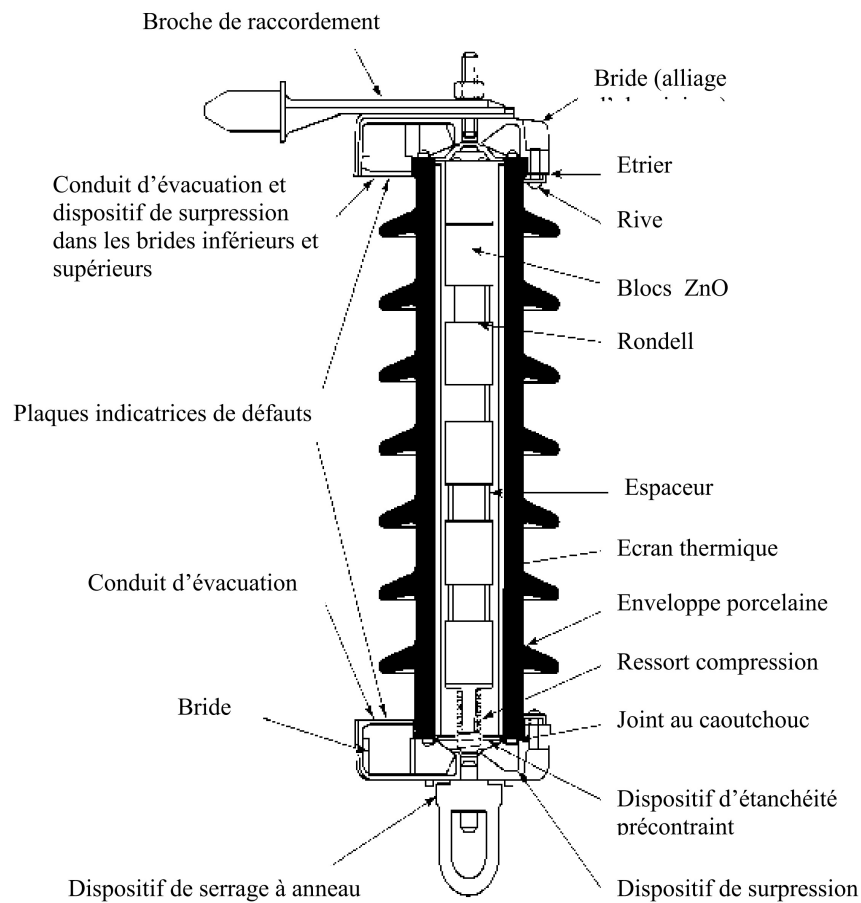


FIGURE 32 – Parafoudre à Oxyde de Zinc ZnO[1]

2.7.5 Choix des parafoudres

Le choix du dispositif de protection, éclateur ou parafoudre, peut être effectué sur la base des critères :

- économique, car l'éclateur est moins cher que le parafoudre.
- technique, car l'éclateur provoque une interruption de service et présente une dispersion importante des conditions d'amorçage (assurant donc une moins bonne protection). Tout dépend ensuite du type de réseau et du niveau d'isolement des différents matériels à protéger.

Le problème du choix d'un parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs ou d'un parafoudre à oxyde de zinc se pose à peine car, très rapidement, les parafoudres à oxyde de zinc ont remplacé leurs homologues au carbure de silicium et à éclateurs, surtout pour les hautes et très hautes tensions. Les parafoudres à oxyde de zinc sont, en effet, usuellement considérés comme plus fiables et plus économiques.

Enfin le choix d'un parafoudre à oxyde de zinc avec une enveloppe de porcelaine ou avec une enveloppe en matériau synthétique ou avec une enveloppe métallique ou intégré dans l'appareillage (dans le transformateur, par exemple) est relativement clair.

- Le parafoudre à enveloppe métallique ne se justifie que dans les postes électriques sous enveloppe métallique à isolation gazeuse (généralement en zone très polluée) ou dans des cas d'encombrement important.
- Le parafoudre intégré, rare en haute et très haute tensions, présente les mêmes possibilités d'utilisation que les parafoudres à enveloppe métallique pour un coût qui devrait être moindre. Toutefois, en cas de défaillance du parafoudre, il faut intervenir aussi sur l'appareil à protéger.
- Le parafoudre à oxyde de zinc à enveloppe synthétique fait maintenant pleinement partie de l'offre industrielle, tout du moins en ce qui concerne les parafoudres pour réseaux de distribution. Son coût est très compétitif par rapport à un parafoudre à enveloppe de porcelaine [25].

2.8 Conclusion :

Le modèle électrogéométrique est largement utilisé, dans le domaine de la protection contre la foudre. Ce modèle qui est basé sur la détermination de la distance d'amorçage en fonction de l'intensité du courant de l'arc en retour, cela permet de d'évaluer la zone de protection d'un paratonnerre. Ce modèle est utilisé pour la protection des lignes de transport d'énergie électrique et pour la protection de structures et des installations

Les différents dispositifs limiteurs des coups de foudre évoqués dans ce chapitre correspondent à une protection d'efficacité croissante :

- les paratonnerres protègent contre les coups de foudre direct par conséquent leur utilité est limitée seulement dans des zones bien déterminées.
- les éclateurs sont réglés pour s'amorcer lors de l'apparition d'une surtension de foudre. Ils ne protègent pas contre les surtensions de manœuvre, ni contre les surtensions temporaires.

- les parafoudres SiC sont capables de protéger le matériel contre les surtensions de foudre et de manœuvre, ils ne doivent jamais fonctionner des surtensions temporaires.
- les parafoudres ZnO, de leur architecture, sont capables de supporter des surtensions temporaires (sans protéger le matériel). Ils offrent une protection efficace contre les surtensions de foudre et de manœuvre.

3 chapitre III :Parafoudre à oxyde de zinc (Zno)

3.1 Introduction

La consommation toujours croissante d'énergie électrique a entraîné l'expansion des réseaux de transport et le développement des lignes à très haute tension. Dans le même temps, afin d'assurer une qualité de service suffisante, des dispositifs de protection contre les surtensions doivent être installés. "parafoudre à oxyde de zinc (ZnO) ou le paratonnerre à dispositif d'amorçage, les éclateurs... ext" En effet, ces surtensions peuvent provoquer de nombreuses pannes dans les équipements de électrique et présenter un certain danger pour les utilisateurs.

Les varistances sont des composants passifs utilisés en électronique et en électrotechnique pour supprimer les surtensions, Cette céramique semi-conductrice Polycristalline agit comme deux diodes montées en anti-parallèle.

L'effet varistance est défini comme la propriété de tout objet dont la résistance évolue de façon non linéaire avec la tension appliquée à ses bornes. Aux basses tensions, la résistance d'un composé suit la loi d'ohm.

3.2 Parafoudre à Oxyde de Zinc :

Dans les années 1970, les fabricants de parafoudres ont commencé à les parafoudres développés à partir de ces varistances présentent deux avantages essentiels :

- Un coefficient non-linéaire très important parafoudres sans éclateurs dont la partie active reste sous tensions permanentes .
- Ils ont une grande capacité d'absorption d'énergie et peuvent être utilisés pour Tous les réseaux, de l'électronique à la très haute transmission d'énergie tension (225 ou 400KV).[26]

3.3 Constitution :

L'oxyde de zinc (ZnO) est simplement fabriqué à partir d'un empilement de résistances non linéaires à l'oxyde de zinc. Parfois, mais uniquement pour les très hautes tensions, il comporte quelques condensateurs supplémentaires placés en parallèle sur les variateurs au sommet des paratonnerres et destinés à améliorer la répartition de la tension le long de l'axe des condensateurs. Tous sont placés dans une enveloppe hermétique et isolante généralement en porcelaine ou en matière synthétique.[27]

3.4 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 VI 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 [27]

la tension nominal est augmentée en connectant la varistances en série, d'autre part ,afin d'obtenir une énergie plus élevée , le diamètre de la varistance peut être augmenté ou réalisé en colonnes parallèles. Le niveau de protection du parafoudre ZnO correspond à sa tension résiduelle au courant nominal de décharge qui le caractéristique de base de la varistance, la détermination du dimensionnement du parafoudre ZnO comprend la définition de base connectées en série .

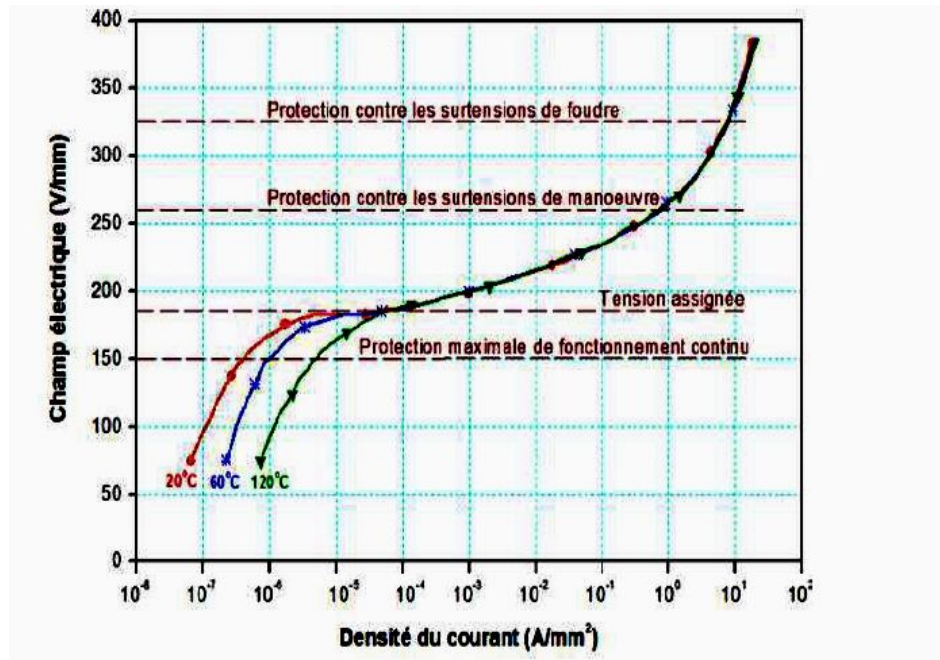


FIGURE 33 – Caractéristique E-J d'une Varistance ZnO [28]

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).

De plus , le parafoudre doit pouvoir dissiper l'énergie qui lui est injectée , sous forme de chaleur en toutes circonstances , Lors de l'écrêtage de la surtension, l'échauffement de la varistances peut être considéré comme adiabatique. Par conséquent ,la puissance dissipée par le parafoudre doit toujours être supérieure à la puissance qu'il absorbe, car cette dernière augmente fortement avec la température. Dans le cas contraire, un phénomène appelé "emballement thermique" peut entraîner la défaillance du parafoudre.

En plus de la décharge de foudre, le parafoudre élimine toutes les surtensions du réseau. Ainsi, la norme CEI 60099-4 définit des classes de décharge de ligne de 1 à 5, correspondant à une capacité énergétique accrue. Pour les réseaux de distribution moyenne tension, il s'agit généralement de la classe 1. Les classes 2 et 3 sont généralement utilisées pour les réseaux de 60 à 225 kV, et les classes 4 et 5 sont utilisées pour les réseaux de 225kV, 400kV et plus.

3.5 Principe de la protection :

Les varistances permettent leurs utilisations en tant qu'élément de protection des circuits électriques contre les surtensions momentanées. Le domaine d'application est très large. Il s'étend de la protection des circuits et appareils électroniques de consommation (électroménager) à l'électrotechnique (dispositif haute tension). La varistance doit être placée en parallèle avec l'élément à protéger. Dans les conditions normales de courant et de tension, la résistance de la varistance est élevée et le courant i passe donc préférentiellement dans le système X (figure 34).

La varistance est alors soumise à la tension du réseau. Elle est traversée en permanence par un courant très faible. Par contre en condition de surtension c'est-à-dire lorsque la tension dépasse la tension dite de seuil la varistance devient conductrice et écrête la surtension en écoulant l'énergie correspondante à la terre, le courant augmente provoquant ainsi une chute de la résistance de la varistance. Ce courant intense passe préférentiellement dans la varistance.

La surtension est ainsi absorbée par la varistance : l'énergie électrique accompagnant la surtension est convertie en énergie thermique et se diffuse dans la microstructure de la céramique. Néanmoins, il faudrait que la varistance fasse passer cette énergie sans qu'elle explose ou qu'elle se dégrade d'une façon irréversible. Ceci introduit à la varistance d'autres propriétés qui sont : la capacité d'absorption de l'énergie et le coefficient de dégradation. Par ailleurs, l'écrêtement de la surtension se fait en laissant une partie, appelée tension résiduelle. Il faudrait aussi que cette dernière ne soit pas trop élevée. C'est une autre propriété de la varistance à considérer. [29]

Après dissipation de la surtension, la résistance de la varistance reprend sa valeur initiale et l'élément X reste protégé (figure 34).

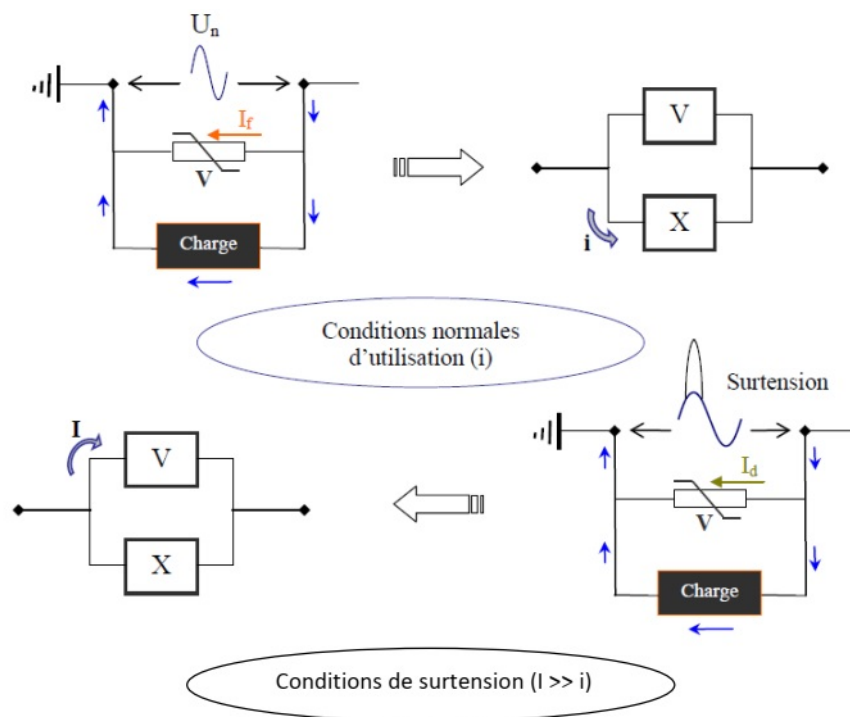


FIGURE 34 – Exemple d'utilisation d'une varistance V pour la protection d'un élément X[29]

3.6 Caractéristiques des parafoudres ZnO :

De nombreuses recherches ont portés les trente dernières années sur les varistances ZnO afin d'en optimiser et améliorer leurs caractéristiques principales on agissant sur les paramètres suivants formulations chimiques de départ

- la granulométrie des poudres d'oxydes métalliques (l'homogénéisation)
- le cycle de frittage (le profil de la courbe $T = f(t)$)
- la nature des électrodes

En 1971 le chercheur japonais Matsuoka inclut la semi - conduction avec addition d'ions de substitution, la densification par frittage en phase liquide par les phases riches en bismuth, ainsi que la localisation des ions de grands volumes dans le joint de grain. Il décrit aussi les rôles du manganèse et du cobalt qui améliorent le coefficient de non linéarité

Varistancee	ZnO
Coefficient de non linéarité α	20 à 50
Structure	Polycristalline
Utilisation d'éclateur en série	Non
Temps de réponse	≥ 50 ns
Caractéristique I (V)	Symétrique
courant de suite	Non
Energie d'absorption(J/cm^3)	>150
Densité de courant de fuite $J_f(A/cm^2)$	10^{-7}
Coefficient de température (%/C)	- 0,05

Tableau(3.1) Caractéristiques des parafoudres ZnO[29]

Actuellement, les varistances ZnO peuvent être utilisées dans un très large intervalle de tension, des quelques volts de la basse tension dans les circuits électroniques jusqu'aux dizaines de kilovolts des réseaux de distribution de l'énergie électrique. Elles sont aussi capables de supporter les grandes énergies jusqu'à des mégajoules. Elles fonctionnent très rapidement, en passant de la phase résistive à celle de conduction au passage de la surtension et reviennent après à la phase isolante, seulement en quelques nanosecondes.

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les parafoudres fixées par les spécifications d'essai tableau :

Tension nominale de réseau (kV_{eff})	63	90	225	400
Tension nominale d'exploitation (kV_{eff})	42	58	142	223
Tension assignée du parafoudre (kV_{eff})	72	96	192	360
Tension résiduelle au courant nominal (kV_{max})	180	225	475	850
Courant nominal ,onde 8/20 $\mu s(KA)$	5	5	10	10

Tab(3.2) Exemple de caractéristiques des parafoudres ZnO[26]

Tension nominal (U_r), qui est la valeur maximale spécifiée de la tension efficace à fréquence industrielle autorisée entre ses bornes, le parafoudre est conçu pour un fonctionnement correct. Cette tension peut être appliquée en continue au parafoudre sans modifier ses caractéristiques de fonctionnement

tension maximale d'utilisation continue U_c est la valeur efficace maximale de la tension alternative AC que le parafoudre peut appliquer en permanence avec un marge de sécurité.

Le courant de décharge nominal(I_n) est la valeur de crête de la forme d'onde de courant exponentielle double 8/20 μs utilisée pour classer la parafoudre. En moyenne tension un valeur de 5KA ou 10 KA peut être prise. le niveau de protection SPD est réglé sur ce courant.

La capacité d'absorption d'énergie est convertie par la résistance à l'onde de courant

double exponentielle 4/10 et la résistance à l'onde de courant rectangulaire , la durée et l'amplitude de l'onde de courant rectangulaire définissent la sévérité .

La surtension temporaire(U_T) 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 U_T est supérieure à la tension (U_c).

La surtension temporaire (U_T) est la valeur efficace maximale de 5 seconde et 120 minutes que le parafoudre peut accepter en mode tenue ou en fin de vie contrôlée (ouvert). Le paramètre U_T est supérieure à la tension (U_c).

Le courant suiveur est le courant qui est fourni par le réseau et qui reste plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler à la fin de l'alternance de tension

3.7 Types des parafoudres ZnO :

Les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO) sont utilisés à tous les niveaux de tension des systèmes à courant continu (CC) et alternatif (CA).

Il ya deux types des parafoudres ZnO :

- Parafoudre de poste
- Parafoudre de ligne

3.7.1 Parafoudre de poste

Il représente l'application la plus importante de tous les systèmes externes. Si le système protégé est une sous station aérienne, toutes les lignes entrantes et sortantes auront des parafoudres parafoudres installés, donc si un transitoire est généré à l'extérieur de la sous-station et conduit à la sous-station , le premier dispositif rencontré sera le parafoudre .A partir d'une hauteur d'environ 1,5m, un anneau de garde est installé sur la bride haute tension pour égaliser le potentiel Figure 35.

Les parafoudres sont généralement montés au sol sur des supports, la bride du parafoudre la plus basse est reliée directement à prise de terre directement ou via un dispositif de surveillance. Selon [9], la hauteur du support d'appareil dans les systèmes doit être supérieure au 2,25m. Cependant, on peut également trouver des hauteurs plus grandes.

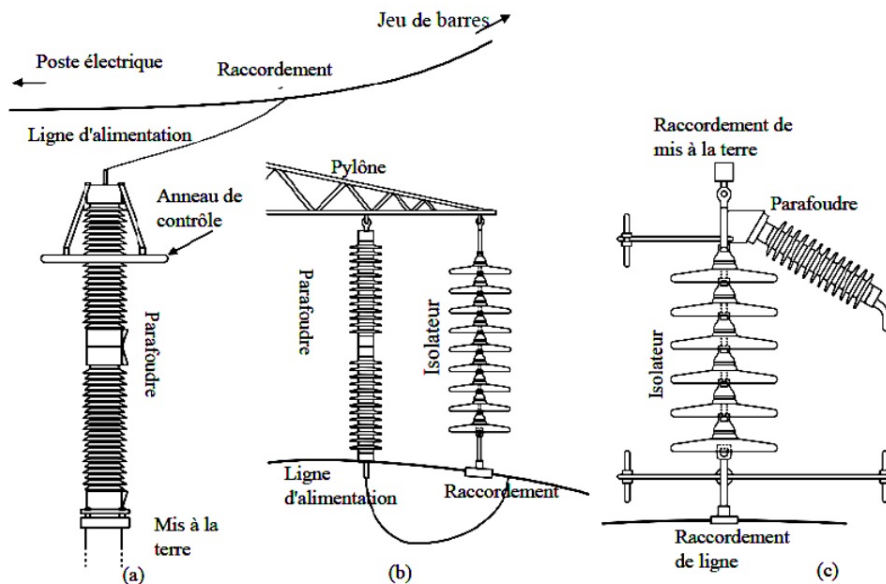


FIGURE 35 – Application de parafoudres ZnO dans les réseaux à haute tension.
(a) : Parafoudres simple, (b) : parafoudres sans éclateur, (c) : parafoudres avec éclateur.

3.7.2 Parafoudre de ligne

En plus de l'application du parafoudre MO citée ci-dessus, il existe un autre type nommé, parafoudre de ligne. Il est placé sur des pylônes les lignes aériennes, ce type de parafoudre est monté en parallèle avec des isolateurs. Sa fonction dans ce cas est de réduire la fréquence des contournements des isolateurs, et donc d'améliorer la qualité de service en assurant sa continuité [30].

La figure 35 (b) et 35 (c), montrent deux types des parafoudres. Une différence est fabriqué entre les parafoudres sans éclateur (non-gapped line arrester (NGLA)) et les parafoudres à éclateur (externally gapped line arrester (EGLA)). Dans la version sans éclateur, ce dispositif déconnecter en série, déconnecter le parafoudre du réseau en cas de panne, évitant ainsi interruption du réseau.

Bien que les parafoudres sans espace doivent avoir la capacité d'absorber d'énergie thermique, en raison des longueur du parafoudre sur les pylône de la lignes, les déséquilibres de potentiel et de température ne sont que perceptibles ,de sorte qu'ils peuvent être neutralisés de manière fiable par l'anneau de garde. En fonctionnement normal, le parafoudre à éclateurs ne transportent que le courant capacitif de l'éclateur ,il ne peut donc être conçu que pour le courant de fuite. Par conséquent ,cette conception de parafoudre n'est pas pertinente pour le présent travail. En raison de son avantage de poids, le parafoudre ZnO directement encapsulé est particulièrement adapté aux parafoudres de ligne pour les installations de suspension primaire .

3.8 Mécanisme de conduction dans les varistances

La partie active du parafoudre ZnO est composée d'un empilage des varistances à caractéristique fortement non-linéaire.

Depuis les années 1970, les varistances ZnO ont fait l'objet d'un développement constant grâce à la recherche, au développement et à l'expérience d'application, pour améliorer le comportement de vieillissement et la capacité d'absorption d'énergie conformément à la norme de fabrication actuelle par rapport aux produits de la première génération

Les varistances sont des résistances variables. Aux valeurs basses de la tension appliquée, une varistance se comporte comme une forte résistance de valeur obéissant à la loi d'ohms. Mais, au-dessus d'une tension de seuil, elle devient fortement conductrice présentant une basse impédance aux tensions élevées. Quand la varistance devient conductrice, elle maintient la tension appliquée à un maximum indiqué auquel le système protégé peut résister[30]

3.9 Propriétés thermiques de l'enveloppe des parafoudres ZnO :

Les bornes de varistance ZnO sont logées dans des boîtiers en porcelaine La colonne ou en matière synthétique. C'est une barrière aux échange thermique entre l'intérieur du parafoudre et l'environnement extérieur , ce type limite leur refroidissement lorsqu'ils sont exposés en permanence à la tension de fonctionnement .

Jin-Liang He et al ont étudié les propriétés thermiques ensemble solide polymère isolant d'un parafoudre ZnO 220 kV et les ont analysé par FEM. La dispersion de chaleur de l'enveloppe est déterminée par la convection naturelle et le rayonnement de la surface de polymère.

He et al ont utilisé le coefficient de transfert de chaleur pour considérer la dissipation de chaleur sur la surface de l'enveloppe . Le point de fonctionnement stable calculé est en bon accord avec les résultats mesurés. La méthode proposée est entièrement basée sur l'évaluation des caractéristiques PU des parafoudres examinés .la distribution potentiel n'est pas calculée .cela signifie que les différentes charges électrique locales ne peuvent pas être prises en compte .

3.10 Caractéristiques électriques U-I des parafoudres ZnO

La caractéristique la plus importante d'un parafoudre ZnO est sa caractéristique tension-courant fortement non-linéaire. Cet élément de protection agit comme un isolant en fonctionnement normal, lorsque la tension de réseau est appliquée.

Par contre, en régime de surtension la résistance chute subitement permettant à un fort courant de circuler, vers la terre. Les tensions entre ces états de fonctionnement se distinguent par un facteur de deux à trois. Les parafoudres ZnO doivent ces propriétés non linéaires aux résistances ZnO de sa partie active.

La caractéristique U-I de l'ensemble du parafoudre ZnO peut être représentée simplement par sa caractéristique de ses varistances ZnO [11]. Pour valider cette représentation, l'auteur suppose, que la tension chute linéairement sur toute la longueur du parafoudre, et lorsque les dépendances en fonction de la température sont incluses, que toutes les varistances ZnO ont la même température. Dans la zone de courant de fuite, les deux conditions ne sont satisfaites que, si le parafoudre ne présente aucune distribution asymétrique de potentiel et de température, ainsi que l'influence du refroidissement local par les dissipateurs thermiques est négligée.

Pour la zone active, la représentation est suffisamment précise, dans le cas de l'influence négligeable des capacités parasites et de la faible dépendance à la température. La figure 36 montre une courbe caractéristique créée à l'aide de cette procédure dans une représentation semi-logarithmique

Dans la figure 36, la valeur de crête de la tension est tracée par rapport à la tension résiduelle de 10 kA du parafoudre. Habituellement, les valeurs de tension caractéristiques mentionnées sur la plaque signalétique d'un parafoudre sont indiquées sur la figure 35, et doivent être décrits conformément à leur définition dans [30].

La tension de fonctionnement continu U_c est la valeur la plus élevée de la tension de fréquence de fonctionnement qui peut être appliquée en continu entre les connexions du parafoudre sans restrictions. La tension nominale U_r est supérieure de 25% à la tension continue de tous les fabricants et indique la tension la plus élevée à laquelle le

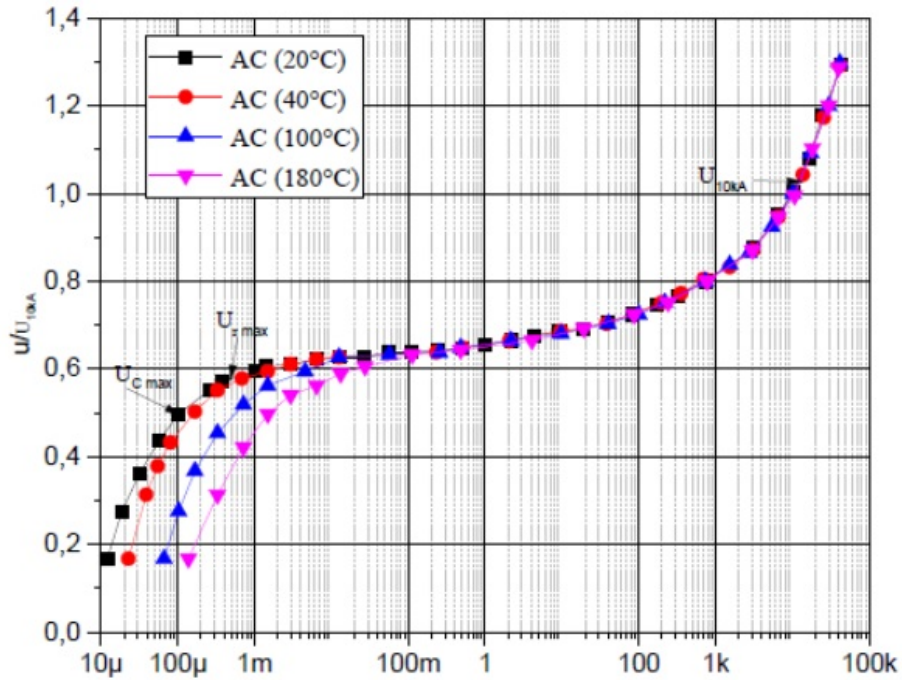


FIGURE 36 – Représentation schématique de la caractéristique U-I d’un parafoudre ZnO.

parafoudre peut fonctionner pendant au moins 10 s. Il doit contrôler le comportement du parafoudre en cas de surtensions temporaires et se situe dans la plage de tension de claquage U_B . La tension permanente et la tension nominale sont utilisées comme tensions d’essai, dans les essais de type du parafoudre ou en sont dérivées. Si la tension est encore augmentée, le courant augmente rapidement selon une loi de puissance, les parafoudres ZnO présentent une caractéristique tension-courant fortement non linéaire (Fig 36), l’Eq (3.1) : [12].

$$I = K_a V_\alpha, \alpha > 1 \dots \dots \dots (3.1)$$

Où,

- I** : Courant traversant le parafoudre,
- V** : Tension aux bornes du parafoudre,
- α : Coefficient de non-linéarité (mesure de non-linéarité).
- K_a : Constante dépend du type de parafoudre.

La valeur α détermine la caractéristique U-I non-linéaire ; Les parafoudres modernes ont des valeurs comprises entre 25 et 80. La caractéristique U-I dans la zone de forte conduction doit être déterminée à l’aide de mesures effectuées avec de brefs courants d’impulsion (onde de forme 8/20 μ s), afin d’éviter des effets tels que l’échauffement des varistances. De plus, l’intervalle entre les surtensions consécutives dans le laboratoire doit être suffisamment long pour permettre à la varistance de revenir à la température ambiante avant l’application d’une nouvelle surtension [13]. Les données et les mesures

indiquent un comportement dynamique (fig 36). La tension résiduelle du parafoudre dépend de la forme d'onde de surtension et augmente lorsque le temps de front de courant diminue [31]. Cette augmentation de la tension résiduelle pourrait atteindre environ 6%, lorsque le temps de front du courant de décharge est réduit de $8\mu s$ à $1,3\mu s$ [14].

3.11 Modèle électrique équivalent simplifié de la varistance ZnO :

les parafoudres ZnO ne peuvent pas être représentés uniquement par une résistance non linéaire, car leur réponse dépend de l'amplitude et de la vitesse de montée de l'impulsion de surtension. Les parafoudres ZnO se comportent différemment pour différentes formes d'onde de surtension, en fonction à chaque fois du pic et de la pente de la surtension. Plusieurs modèles ont été proposés dans le but de prédire le comportement réel du parafoudre. Les modèles existants [15] diffèrent dans la procédure d'estimation des paramètres, mais tous sont suffisamment efficaces pour simuler le comportement dépendant de la fréquence des parafoudres

La figure 37, montre la microstructure d'une varistance ZnO avec les grains de ZnO individuels (gris), et les joints de grains entre les grains (blanc) à gauche, ainsi qu'un schéma de circuit équivalent simplifié résultant, pour la varistance ZnO entière sur la droite. La résistance totale des grains (grains) est donnée par R_g , la caractéristique électrique des joints de grains (couches intergranulaires) représenté par la connexion parallèle d'une varistance R_{int} et d'une capacité C_{int} .

Selon la figure 37, le courant de fuite total traversant une résistance ZnO est composé d'une composante résistive et l'autre capacitive ($I_{tot} = I_{res} + I_{cap}$). En outre, dans toute la plage de courant de fuite, la résistance des grains a une valeur négligeable par rapport à la résistance des joints de grains ($R_g \ll R_{int}$), qui explique la quasi-totalité de la chute tension U à travers les joints de grains

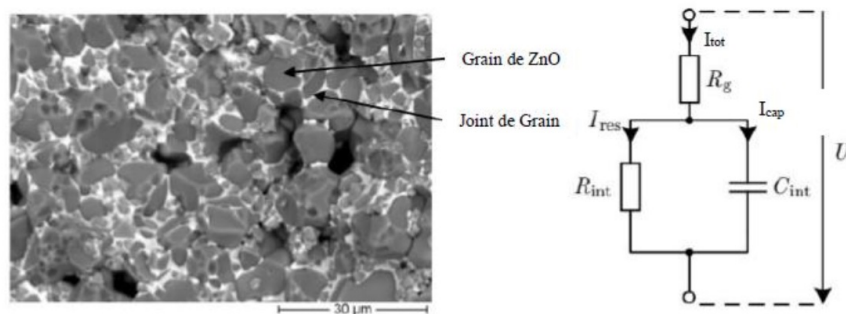


FIGURE 37 – Image au microscope électronique d'une varistance ZnO et son schéma de circuit équivalent simplifié [15].

L'intensité du champ est donnée dans l'équation (3.2),

$$E = \frac{U}{h} \dots \dots \dots (3.2)$$

Sachant que la densité de courant peut être déterminée par :

$$J = \frac{I}{A} \dots \dots \dots (3.3)$$

Où

h : Hauteur

A : Surface de la varistance ZnO

En supposant que la densité de courant est répartie de manière homogène dans la varistance ZnO, L'expression entre le champ et cette densité de courant peut être dérivé. Et est donnée par :

$$J_{tot} = J_{res} + J_{cap} = \sigma E + \frac{d(\varepsilon_0 \varepsilon_r E)}{dt} \dots \dots \dots (3.4)$$

paramètres à déterminer ,c'est -à-dire conductivité σ permittivité par rapport à ε_r , la valeur varie avec l'intensité du champ électrique, la température et fréquence [16]. Dans ce travail seule la tension alternative est étudiée comme la fréquence de fonctionnement à été exécutée, la fréquence reste la même par conséquent ,à $f = 50Hz$, la validité de la courbe caractéristique dérivée $\sigma(E, T), \varepsilon_r(E, T)$ est tensions alternative(AC) 50 Hz uniquement

3.12 Microstructure réelle de la varistance ZnO :

Les varistances sont obtenues par frittage. Elles se présentent sous la forme de disques compacts constitués essentiellement d'oxyde de zinc ZnO et de faibles ajouts (0.1 à 5 % en masse) tels que, l'oxyde d'antimoine Sb2O3 , l'oxyde de bismuth Bi2O3 l'oxyde de cobalt Co3O4, l'oxyde de manganèse Mn2O3 le matériau obtenu après frittage est polycristalline et hétérogène.

La microstructure des varistances ZnO dépend essentiellement de la composition chimique et du traitement thermique utilisé pour le frittage. Au cours d'un procédé de fabrication, la taille moyenne des grains de ZnO oscille autour de $15\mu m$ et l'épaisseur des joints de grains varie entre 20 et 500 \AA [1].

Les observations au microscope électronique à balayage (MEB), ainsi que celles en diffraction des rayons X (DRX) montrent généralement l'existence de trois phases dans la microstructure d'une varistance ZnO (fig. 38). En plus des grains de ZnO, deux autres phases sont observées entre ces grains ZnO :

- la phase spinelle : Zn7Sb2O12
- la phase bi-rich ou pyrochlore : Zn2Bi3Sb3O14.

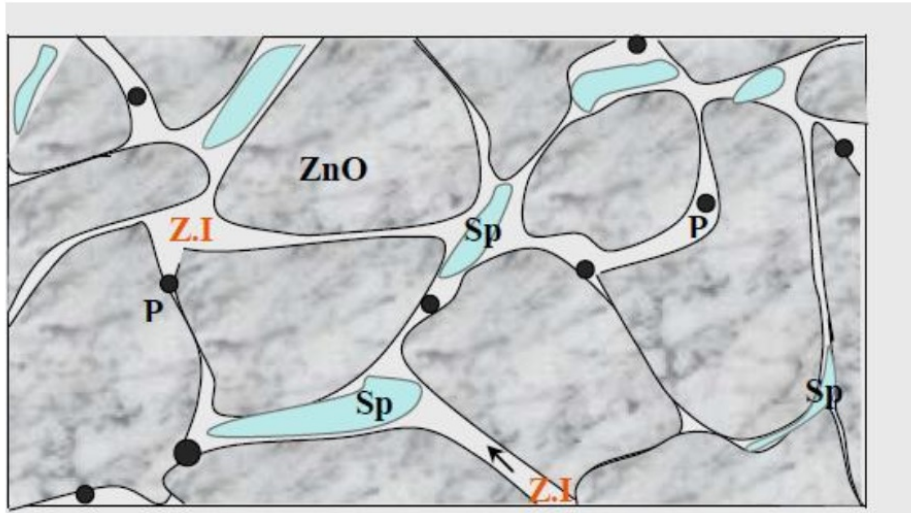


FIGURE 38 – Microstructure des varistances ZnO avec ses trois principales phases : grains de ZnO, grains de spinelles (Sp), zone intergranulaire (Z.I.) et Pore P.[1]

3.13 Détermination des caractéristiques électriques du para-foudre ZnO :

3.13.1 Conductivité électrique

:
 Afin d'extraire le pic résistif des signaux de tension et de courant de fuite, la valeur de courant est lue aux points où se produit un courant purement résistif. Cela se produit lorsque la dérivée temporelle de l'Eq. (3.4) disparaît, lors du passage des valeurs des crêtes négative et positive de la tension sinusoïdale (fig.39). Ensuite, la conductivité électrique est calculée à l'aide des Eq. (3.2 - 3.4), pour toute valeur mesurée de l'intensité du champ électrique \hat{E}_1 :

$$\sigma(\hat{E}_1) = \frac{J_{res}}{\hat{E}_1} , \quad \frac{du}{dt} \dots\dots\dots(3.5)$$

Avec l'équation $\hat{E}_1 = \frac{\hat{u}_1}{h}$. En évaluant un nombre suffisant de signaux tension courant à différentes températures et en supposant que le courant résistif ne dépend que de la valeur instantanée de l'intensité du champ électrique, la caractéristique non linéaire de la conductivité électrique est obtenue. La méthode expliquée dans cette partie est appelée ci dessous la méthode conventionnelle.

Étant donné que la valeur de crête des demi-ondes positive et négative du courant pour une tension alternative appliquée, peut prendre des valeurs différentes ($\hat{I}_{res,p} \neq \hat{I}_{res,n}$) , il convient de vérifier la nécessité d'une détermination des caractéristiques en fonction de la polarité. Pour les impulsions des ondes longues à forte amplitude, une asymétrie de courant observée dans les varistances ZnO [15]. L'évaluation des propriétés du matériau est donc basée sur une approche simple :

$$\sigma = f(|\vec{E}|, T) \dots\dots\dots(3.6)$$

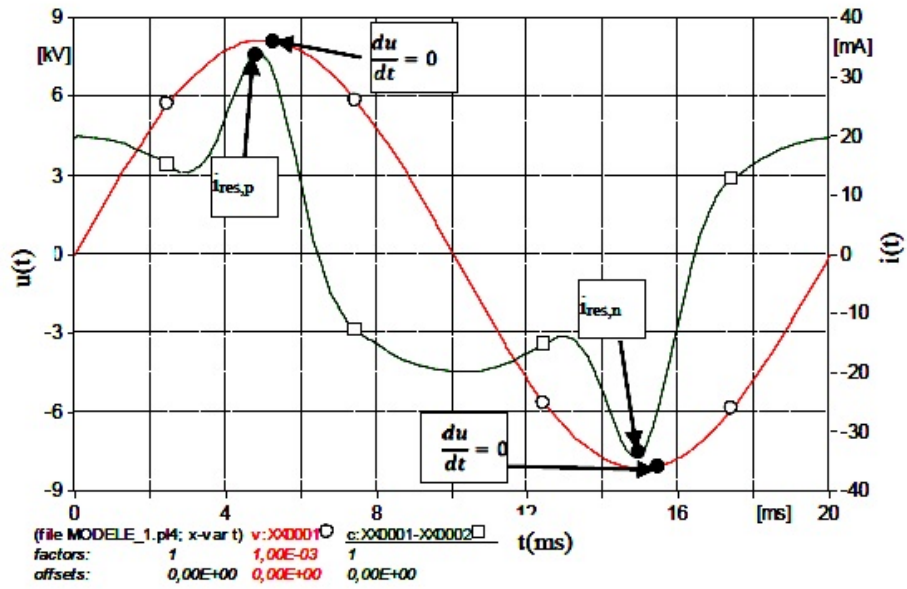


FIGURE 39 – Détermination des valeurs de crête du courant résistive en dessous du maximum de tension nominale d'une varistance ZnO.

En plus de l'approche conventionnelle présentée ci-dessus, qui est la base de la plupart des représentations de la caractéristique U-I, pour les varistances ZnO trouvées dans la littérature, il existe d'autres méthodes en commun, qui nécessitent uniquement des signaux de tension et de courant lors de l'application d'une tension, afin de déterminer la conductivité électrique de toutes les intensités de champ, jusqu'à la valeur de crête du signal de tension nominale [30].

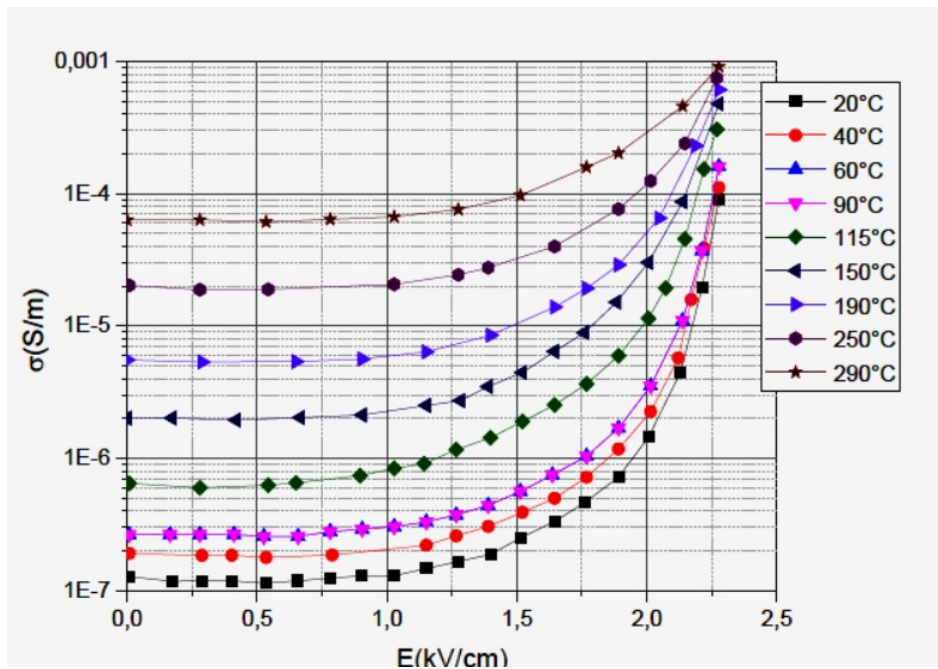


FIGURE 40 – Conductivité électrique d’une varistance ZnO en fonction du champ électrique et de la température

Un représentation semi-logarithmique des caractéristique de conductivité de varistances ZnO utilisées dans les parafoudres ZnO est illustrée à la figure 40. Elle est déterminée par des méthodes conventionnelles en fonction de l’intensité du champ électrique et de la température. Il est facile de voir que, la dépendance à la température de la conductivité diminue avec l’augmentation de l’intensité du champ.

3.13.2 Permittivité relative :

La permittivité relative du parafoudre ZnO quantifie le comportement capacitif, qui est en partie dû aux joints de grains extrêmement fins et aux couches d’appauvrissement adjacentes aux électrons intergranulaires ou aux visqueux [17]. Dans la littérature, diverses méthodes de détermination sont discutées en fonction de la dépendance du paramètres permittivité relative sur le profil de température en régime permanent

3.13.3 Permittivité constante dans le temps :

Dans le cas simple où une permittivité constante est supposée, sa valeur peut être déterminée par le passage par zéro de l’intensité du champ électrique. À ce stade, il y a une densité de courant purement capacitive dans la varistance ZnO, et l’Eq. (3.6) est simplifié pour

$$J_{tot}(E = 0) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{dE}{dt} |_{E = 0} \dots \dots \dots (3.7)$$

Une évaluation de cette expression pour différentes courbes de mesure enregistrées,

entraîne une diminution de la permittivité relative, car la valeur de crête de l'intensité du champ à une augmentation de la pente au passage par zéro. Cela montre que l'approximation d'une permittivité constante dans le temps n'est pas admissible

3.13.4 Permittivité temporellement variable

En supposant que la permittivité relative change avec l'évolution temporelle de l'intensité du champ électrique, ε_r ne peut plus être extrait de la dérivée du temps dans l'Éq.(3.4). Alors la relation apparaît à la place est :

$$J_{tot} = \sigma(E)E + \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} (\varepsilon_r(E) \frac{d\varepsilon_r}{dE} E) \dots \dots \dots (3.8)$$

où J_{tot} et E sont des quantités qui varient dans le temps. La densité de courant capacitive et la densité de courant totale dépendent à la fois, de la valeur instantanée et aussi du gradient de l'intensité du champ.

Une transformation selon ε_r et l'application de la notation de Newton ($\frac{dx}{dt} = \dot{x}$) conduit à l'équation différentielle de premier ordre de l'Eq (C), pour laquelle une solution est donnée par l'Eq (R) [9].

$$\varepsilon_r(E) \frac{d\varepsilon_r}{dE}(E) = \frac{J_{tot} - \sigma(E)E}{\varepsilon_0 \hat{E}} \dots \dots \dots (3.9)$$

$$\varepsilon_r(E) = \frac{1}{E} \int_0^{\hat{E}} \frac{J_{tot} - \sigma(E)E}{\varepsilon_0 \hat{E}} dE \dots \dots \dots (3.10)$$

Il convient de noter que l'Eq. (3.9) ne représente pas une permittivité relative statique

$$\varepsilon_r = D/\varepsilon_0 E \dots \dots \dots (3.11)$$

Pour laquelle le terme constante diélectrique serait admissible - mais une permittivité relative différentielle calculée selon

$$\varepsilon_{r,diff} = dD/\varepsilon_0 dE \dots \dots \dots (3.12)$$

Lors du calcul de la permittivité relative avec Eq. (3.10) est que la connaissance de la conductivité électrique $\sigma(E)$ est nécessaire. Un calcul incorrect de la conductivité électrique conduit inévitablement à une permittivité relative incorrectement calculée

3.13.5 Dérivation d'une permittivité complexe :

Sur la base de la définition de la densité de flux électrique , une description alternative de la densité totale de courant est proposée, pour supprimer la chaîne d'erreurs précédemment décrite, lors du calcul les deux paramètres électriques

$$j_t = \frac{dD_{eff}}{dt} = \frac{d(\varepsilon_0 \varepsilon_{r,eff} E)}{dt} \dots \dots \dots (3.13)$$

$$\varepsilon_{r,eff} \xrightarrow{\kappa} \underline{\varepsilon} \dots \dots \dots (3.14)$$

où une transformée de Fourier s'applique sur la permittivité relative effective :

$$\underline{\varepsilon} = \acute{\varepsilon} - j\varepsilon''$$

Avec :

ε Permittivité relative complexe

ε' Partie réelle,

ε'' Partie imaginaire.

La partie réelle représente la partie capacitive et la partie imaginaire représente les propriétés de ε perte de la varistance ZnO. De l'Eq. (3.14) la fonction $Def f(E(t))$ ($0 \leq t < 20ms$), peut maintenant être calculée en résolvant l'intégrale de temps de J_{tot} sur une période de 50 Hz de la courbe d'intensité du champ E en résolvant l'Eq. (3.14) on obtient une permittivité relative pour toutes les intensités de champ calculée indépendamment de la conductivité électrique.

$$\varepsilon_r(E) = \frac{D_{cap}(E)}{\varepsilon_0 E} = \varepsilon' \dots \dots \dots (3.15)$$

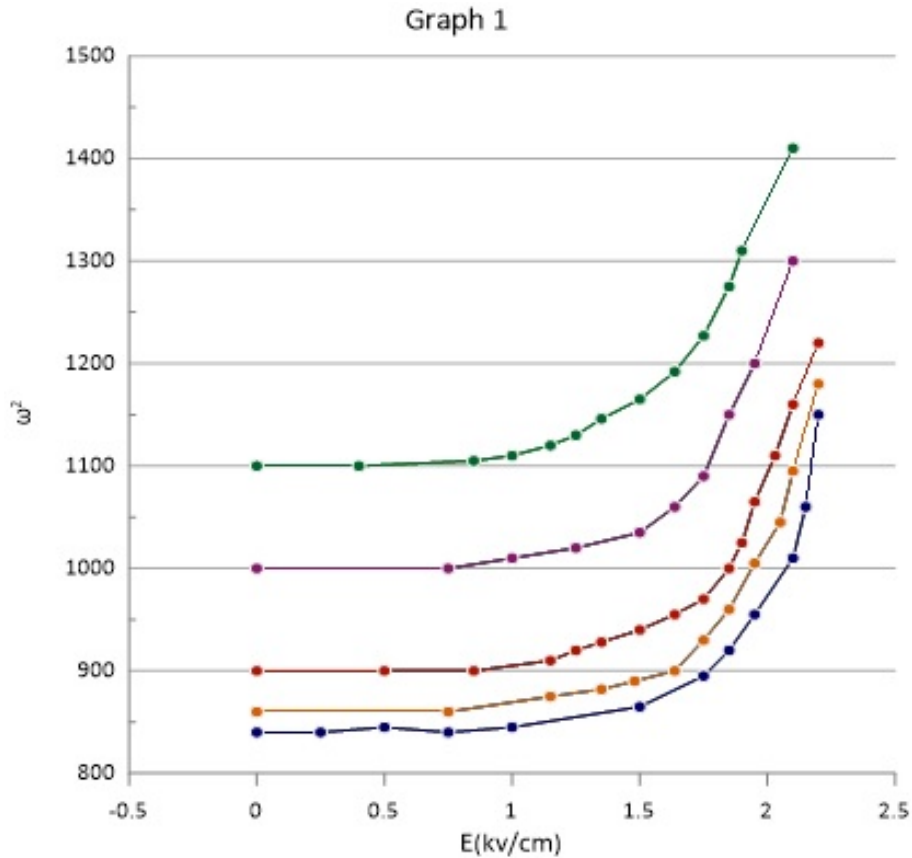


FIGURE 41 – Permittivité relative d'une varistance ZnO en fonction de l'intensité du champ électrique et de la température.

La valeur calculée de la permittivité relative est assez élevée ,avec valeurs généralement connues pour les diélectriques, mais elles correspondent aux valeurs données sur les varistances ZnO dans la littérature [30]. grande constante diélectrique par conséquent ,ce n'est que le résultat présenté par le modèle macroscopique, et ne correspond pas à indépendamment des propriétés matérielles réellement trouvées dans les joints de grains de varistance ZnO.

3.14 Vieillessement du parafoudre :

Le vieillissement des éléments de parafoudre (varistances) peut résulter en une diminution dans la puissance consommée pour certains produits et/ou en une augmentation pour d'autres. La dégradation due aux contraintes thermiques est normalement causée par l'effet d'une décharge de surtension à haute énergie, qui se traduit par une augmentation de la température des varistances ZnO. En outre, l'effet du rayonnement solaire et de la pollution de l'environnement sur le boîtier du parafoudre peut également contribuer à la dégradation effectuée thermiquement. Pendant ce temps, la dégradation due aux contraintes électriques est normalement causée par les effets de la décharge de foudre, du fonctionnement de commutation et des surtensions temporaires. Une dégradation supplémentaire peut endommager les varistances ZnO, qui peuvent être déterminées à partir de fissures sur la surface ZnO ou de surfacesdéfectueuses en raison de contraintes élevées. Les modes de défaillance des varistances ZnO peuvent être classés en emballement thermique, fissuration physique et perforation électrique

Le mode de défaillance dû à l'emballement thermique peut être étudié à travers la relation entre la génération de chaleur et la dissipation thermique de l'élément ZnO. La puissance consommée augmente selon la loi présentée en

$$\log \frac{p}{p_i} = a\sqrt{t} + b_c$$

Ou p_i et b_c : Constantes ; t : Temps

Le phénomène est activé thermiquement selon la loi d'Arrhenius Dakin :

$$a = a_0 e^{-\frac{W_c}{KT}}$$

Avec :

a_0 : Constante qui dépend du matériau

W_c : Énergie d'activation

La dégradation dans les parafoudres fait augmenter le courant de fuite et par suite la puissance générée, ce qui a pour conséquence le déplacement du point A, aux températures plus élevées et le parafoudre se dégrade plus. Donc, le vieillissement a pour effet d'engendrer un nouveau point de fonctionnement qui va évoluer jusqu'à ce que les deux limites de stabilité (point A et B) soient confondues et le parafoudre ne peut plus dissiper l'énergie produite (destruction). [9]

3.15 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 (42)

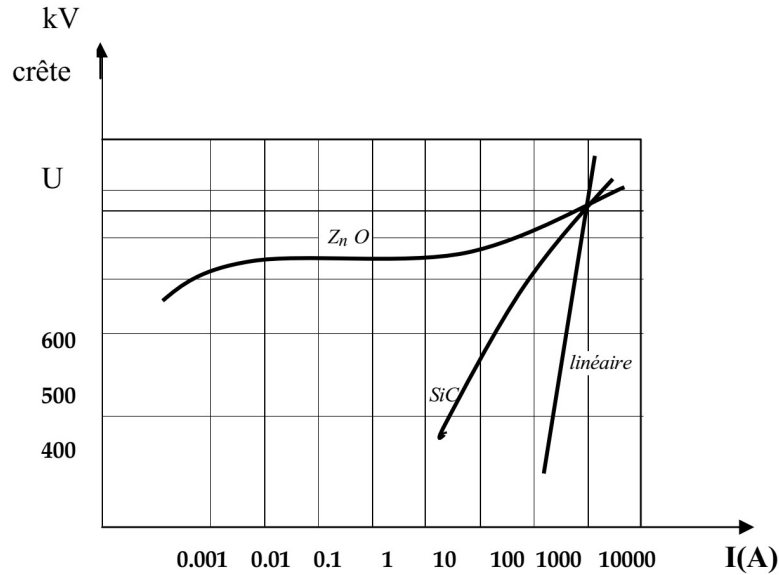


FIGURE 42 – Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection. [4]

De par leur architecture, ils peuvent être utilisés dans différents environnements. En général, la surface d'une varistance est environ la moitié de celle du 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'écrêtement des surtensions à des valeurs plus faibles par les parafoudres à ZnO se traduit par une meilleure protection du matériel. [8]

3.16 Les inconvénients des parafoudres à oxyde de zinc

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

- Les risques d'emballement 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'emballement thermique.

3.17 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le parafoudre à base d'oxyde métallique ZnO, sa constitution et son fonctionnement ainsi que son principe de protection qui se base sur une varistance, nous avons vu aussi les caractéristiques électriques des ZnO et le mécanisme de conduction dans les varistances et on a tiré l'attention sur les nombreuses recherches qui ont réalisées sur les varistances des ZnO afin d'en optimiser et améliorer leurs caractéristiques principales en agissant sur les paramètres fondamentales de ces parafoudres, on a donné aussi un éclaircissement rapide sur les propriétés thermiques de l'enveloppe des parafoudres ZnO. La Détermination des caractéristiques électriques du parafoudre ZnO joue un rôle important dans la maîtrise dans son comportement pendant le fonctionnement ces paramètres sont : la conductivité électrique, la permittivité relative avec ces deux variantes ; permittivité constante dans le temps et permittivité temporellement variable. Enfin nous avons donné un modèle électrique équivalent simplifié de la varistance ZnO et on a mis au point aussi la tendance mondiale à utiliser ces parafoudres comme protection contre toute forme de surtension pouvant affecter le réseau de transporteur, comme nous avons étudié les avantages et inconvénients de ces parafoudres par rapport aux parafoudres SiC.

La compréhension du comportement des parafoudres ZnO nécessite de développer des modèles électromagnétiques régissant ce phénomène. Ce dernier s'adapte bien pour ces types de défauts, nous avons jugés utile de lui consacré le chapitre suivant.

4 Chapitre IV : Modélisation des parafoudres ZnO

4.1 Introduction :

Les systèmes d'énergie électrique peuvent être assujettis à des surtensions de toute nature. Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolation des lignes de transmission et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique. Par suite la nécessité de se protéger contre ces surtensions est indispensable. Pour cela, il faut utiliser des moyens de protections très performants et fiables. Chose qui n'est pas facile à atteindre et il a fallu des décennies pour arriver au moyen le plus utilisé actuellement qui est le parafoudre à base d'oxyde de zinc. Dans le transport d'énergie électrique les chercheurs ont été toujours confrontés à la foudre qui est un phénomène perturbateur important sur la gamme de puissance et tous les niveaux de tension. On utilise des modèles pour évaluer la protection contre les surtensions de foudre

La modélisation des parafoudres à oxyde métallique est nécessaire pour plusieurs raisons et un progrès considérable dans ce domaine a été fait. Il est très difficile de construire un modèle général des parafoudres ZnO dans lequel on prend en compte tous les facteurs tel que la pollution, les processus thermiques, la réponse aux contraintes rapides et harmoniques. Cependant la construction d'un modèle limité pour un but spécial seulement semble une très bonne idée. Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les nombreux modèles (circuits équivalents) proposés dans la littérature pour décrire ces phénomènes dynamiques en faisant une étude comparative de quelques modèles.

4.2 Modélisation des parafoudres ZnO :

4.2.1 Modèle conventionnel ou à résistance non-linéaire :

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

Dans ce modèle la caractéristique V-I est représentée par un nombre arbitraire de segments exponentiels dont l'équation de chaque segment est défini par :

$$i = p \left[\frac{v}{v_{ref}} \right]^q \dots\dots\dots 4.1$$

Dans cette équation :

- i** : est le courant du parafoudre en (A) ou (kA) ;
- v** : est la tension aux bornes du parafoudre en (V) ou (kV) ;
- p, q et Vref** : sont 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 (4.1) 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

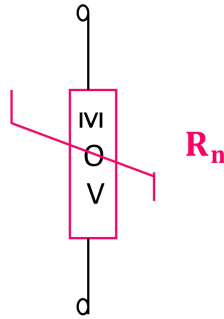


FIGURE 43 – Modèle à résistance non-linéaire

4.2.2 Modèle proposé par Ozawa et al :

Ce modèle représente la caractéristique tension-courant non-linéaire pour le courant nominal (figure 44). 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. [33]

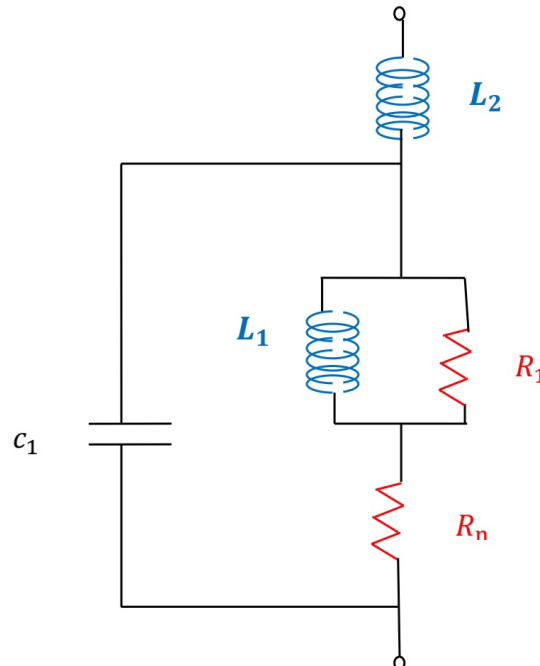


FIGURE 44 – Modèle proposé

4.2.3 Modèle de Tominaga et al :

La caractéristique dynamique de ce modèle (figure 45) est introduite similairement à l'effet d'hystérésis à travers l'ajout d'une inductance série L . La valeur de cette induc-

tance peut être estimée une fois que le courant du parafoudre est approximativement connu en utilisant de la méthode Essai-Erreur .

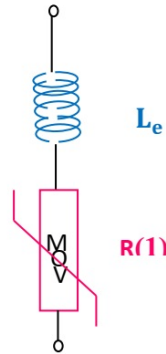


FIGURE 45 – Modèle à inductance linéaire .

4.2.4 Modèle recommandé par le groupe IEEE :

Un modèle (Fig 46) qui peut reproduire le comportement dynamique du parafoudre à oxyde métallique est montré dans(la figure 46). Dans ce modèle, la caractéristique non-linéaire (V-I) du parafoudre est présentée avec deux sections non-linéaires séparées par un filtre R-L. Pour les contraintes lentes, l'impédance du filtre R-L est extrêmement faible qui conduira à considérer que les résistances du modèle sont pratiquement connectées en parallèle. Par contre pour les ondes très rapides l'impédance du filtre R-L devient plus importante. Et de ce fait les courants à haute fréquence sont forcés par le filtre R-L à circuler plus dans la section désignée par A0 plutôt que dans la section désignée par A1. Du moment que la caractéristique A0 possède une tension plus élevée pour un courant donné par rapport à A1, le résultat est que le modèle du parafoudre génère une tension plus élevée.

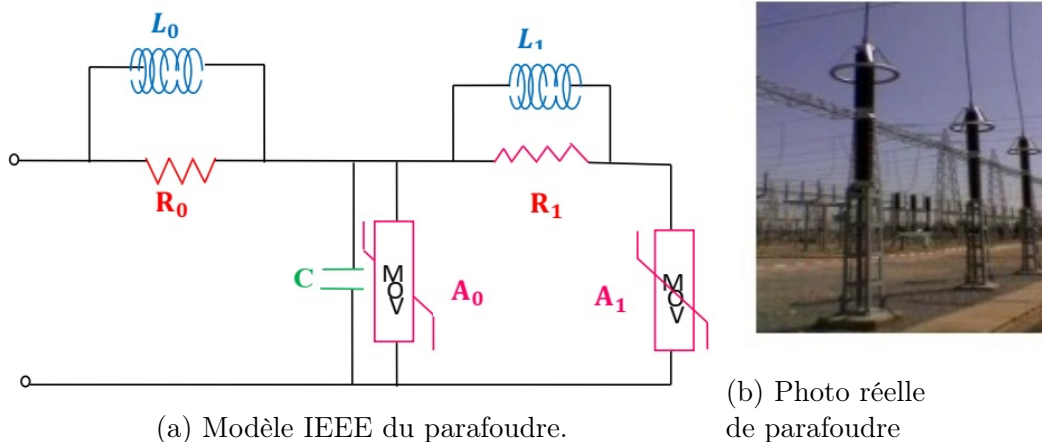


FIGURE 46 – Modèle IEEE du parafoudre.

L'inductance L_0 dans le modèle représente l'inductance associée avec le champ magnétique dans le voisinage immédiat du parafoudre. La résistance R_0 est utilisée pour se stabiliser l'intégration numérique quand le modèle sera implanté dans un programme de calcul numérique. La capacité C représente la capacitance externe associée avec la hauteur du parafoudre.

Dans ce modèle la caractéristique non linéaire (V-I) du parafoudre est présentée deux sections non – linéaires séparées par un filtre R-L, 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. Cependant, pour les ondes très rapides l'impédance des filtres R-L devient 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 A_0 que dans la section désignée par A_1 .

4.2.4.1 Calcul des paramètres du schéma équivalent :

La détermination des paramètres du modèle en utilisant les équations suivantes :

$$L_1 = 15 \frac{X}{n} [\mu H] \dots \dots \dots (4.2)$$

$$R_1 = 65 \frac{X}{n} [\Omega] \dots \dots \dots (4.3)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{X}{n} [\mu H] \dots \dots \dots (4.4)$$

$$R_0 = 100 \frac{X}{n} [\Omega] \dots \dots \dots (4.5)$$

$$C = 0.2 \frac{n}{X} [PF] \dots \dots \dots (4.6)$$

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

m : la masse

4.2.5 Modèle proposé par T. Hagiwara et al :

Ce modèle est montré dans la (Fig 47) est montré dans la figure 47 . Il se compose d'une inductance linéaire L_r représentant l'épaisseur de la varistance ($1\mu H/m$) 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 $8/20\mu s$ et $1/2, 5\mu s$. Cette différence peut prendre une forme exponentielle [36]

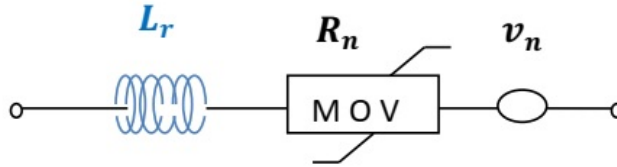


FIGURE 47 – Modèle proposé par Hagiwara et al .

4.2.6 Modèle proposé par W. Breilmann :

En 1987 Breilman propose un modèle de parafoudre pour les études en présence de contraintes transitoires rapides (figure 48). 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. [34]

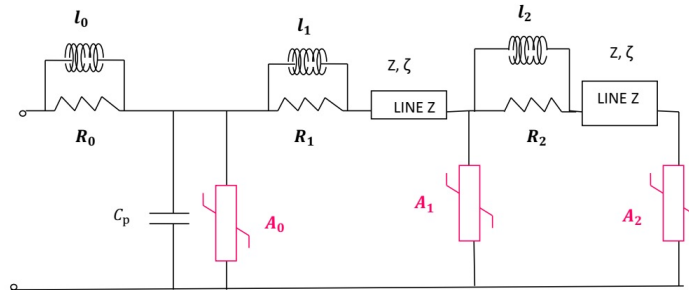
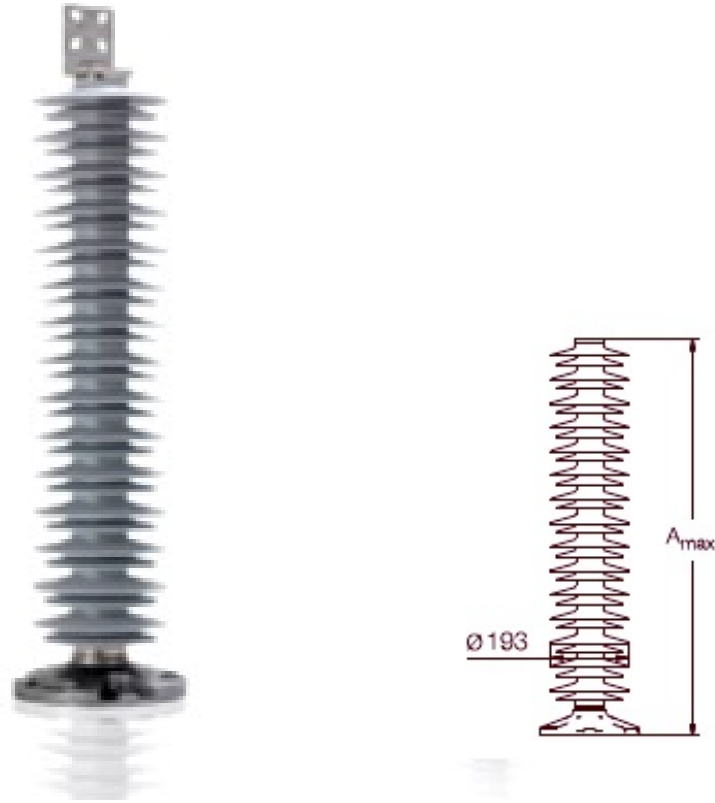


FIGURE 48 – Modèle de W. Breilmann[38].

4.3 Application de calcul des paramètres du schéma équivalent pour quelques modèles réelles de parafoudres :

Afin d'illustrer les paramètres du schéma équivalent, nous avons utilisé des parafoudres réelles

4.3.1 Parafoudres à oxyde de zinc PEXLIM R-Z (72 – 145kV) :



(a) Photo réelle de PEXLIM R-Z [37]. (b) Géométrie simplifiée [37].

FIGURE 49 – Photo réelle de PEXLIM R-Z et Géométrie simplifiée

4.3.1.1 les Caractéristiques de modèle :

- Tensions du système (U_m) : 72 - 145 kV
- Courant de décharge nominal (CEI) : $10 K A_{crête}$
- Tenue aux courants de décharge :
 - Courant fort $4/10\mu s$: $100 K A_{crête}$
 - Courant fort $2000\mu s$: $600 A_{crête}$
- Isolation externe : Satisfait/dépasse les normes
- Résistance mécanique :
 - Effort à long terme déclaré (SLL) : $800 Nm$
 - Effort à court terme déclaré (SSL) : $1300 Nm$
- Conditions de fonctionnement :
 - Température ambiante : 50 °C à $+45\text{ °C}$
 - Altitude de conception : max. 1 000 m
 - Fréquence : 15 - 62 Hz [37]

4.3.1.2 Le calcul des paramètres du schéma équivalent suivant le modèle IEEE donne les valeurs suivantes :

$$U = 72kv - 145kv$$

$$m = 24kg, x = 0.995m, n = 1,$$

$$L_1 = 14.925 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_1 = 64.67 [\Omega]$$

$$L_0 = 0.199 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_0 = 99.5 [\Omega]$$

$$C = 0.20 \times 10^{12} [pF]$$

4.3.1.3 Etude de caractéristique vis-à-vis des essais des tensions :

Dans ces essais nous allons illustrer les variations de la tension résiduelle en fonction du courant de foudre pour un parafoudre 72 – 145kV, pour quatre tension différentes de système, cela est fait pour deux types d'ondes ; la première est de type (30/60μs) alors que la deuxième est de type (8/20μs).

Première onde (30/60μs) :

La figure 50 donne la variation de la tension résiduelle en fonction du courant de foudre, l'essai est réalisé pour trois valeurs de courant 0.5kA, 1kA et 2kA. Nous remarquons que la forme de variation est presque la même mais pour la pente qui représente la résistance non linéaire.

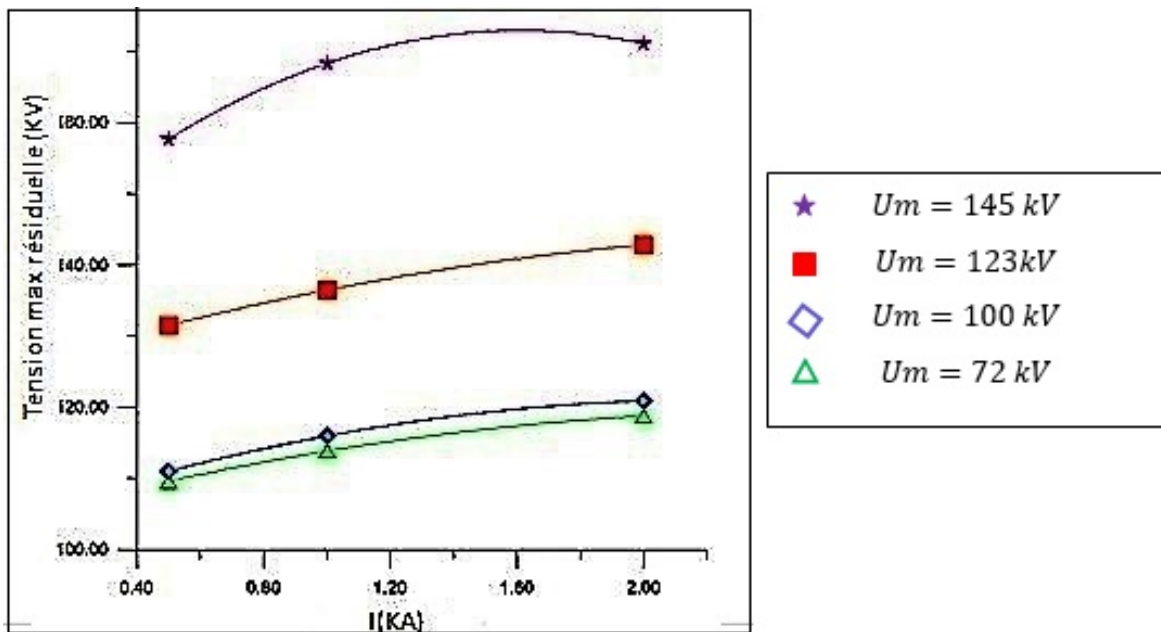


FIGURE 50 – Courbes des essais pour l'onde (30/60μs)

Deuxième onde (8/20μs) :

Pour cette onde les variations de la tension résiduelle sont prises pour quatre valeurs de courant 5 kA, 10 kA, 20 kA et 40kA. La figure 51 donne ces variations. Nous remarquons que les pentes sont plus élevées que les pentes que l'onde (30/60 μ s)

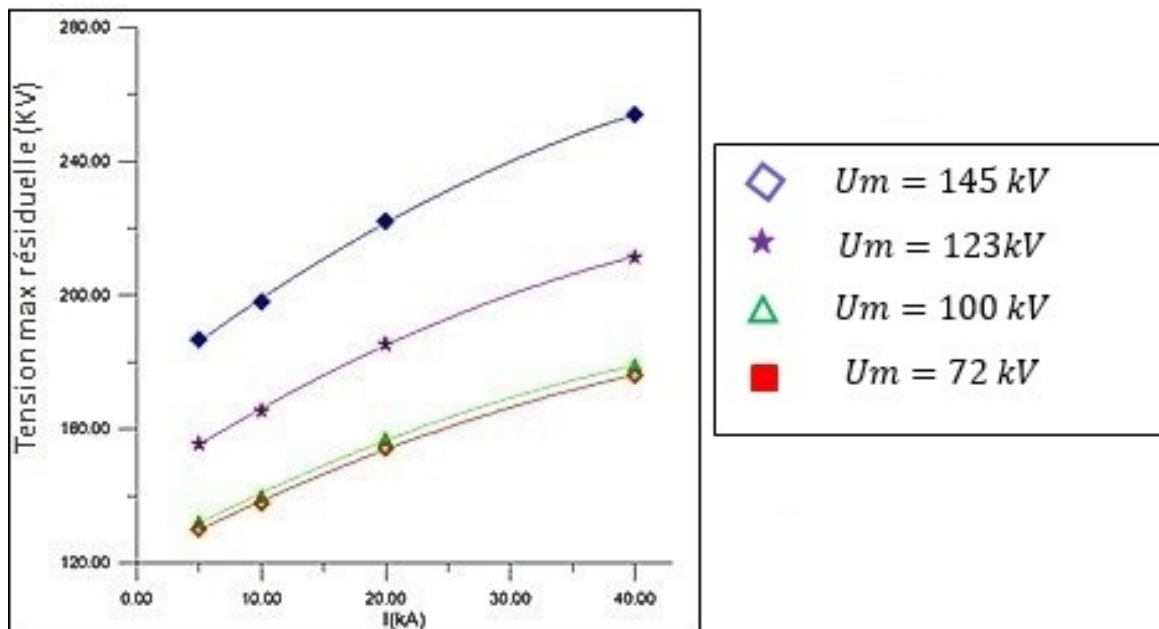


FIGURE 51 – Courbes des essais pour deuxième onde (8/20 μ s)

4.3.2 Parafoudres à oxyde de zinc PEXLIM P-Y (300 - 550 kV) :

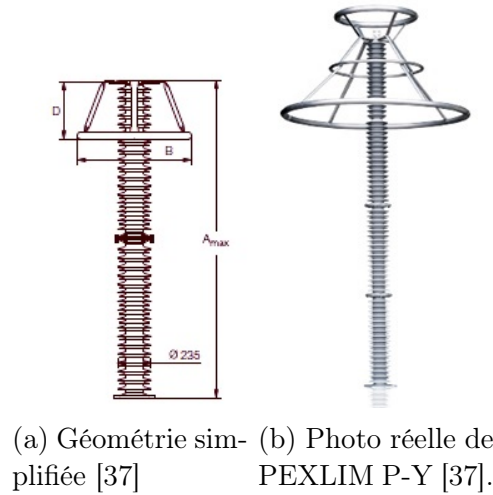


FIGURE 52 – Géométrie simplifiée et Photo réelle de PEXLIM P-Y

4.3.2.1 les Caractéristiques de modèle :

- Tensions du système (U_m) : 300 – 550kV
- Courant de décharge nominal (CEI) : $20KA_{crête}$
- Tenue aux courants de décharge :
 - Courant fort $4/10\mu s$: $100KA_{crête}$
 - Courant faible $2000\mu s$: $1500A_{crête}$
- Isolation externe : Satisfait / dépasse les normes
- Résistance mécanique :
 - Effort à long terme déclaré (SLL) : $6000Nm$
 - Effort à court terme déclaré (SSL) : $9000Nm$
- Conditions de fonctionnement :
 - Température ambiante : $-50C + 45C$
 - Altitude de conception : $max.1000m$
 - Fréquence : $15 - 62Hz$ [37]

4.3.2.2 Le calcul des paramètres du schéma équivalent suivant le modèle IEEE donne les valeurs suivantes :

$$U = 300kv, m = 112kg, x = 2.22m, n = 1,$$

$$L_1 = 33.3 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_1 = 144.3 [\Omega]$$

$$L_0 = 0.444 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_0 = 222 [\Omega]$$

$$C = 0.09 \times 10^{12} [pF]$$

$$U = 550kV$$

$$m = 226kg, x = 4.335m, n = 1$$

$$L_1 = 65.02 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_1 = 281.7 [\Omega]$$

$$L_0 = 0.876 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_0 = 433.5 [\Omega]$$

$$C = 0.046 \times 10^{12} [pF]$$

4.3.2.3 Etude de caractéristique vis-à-vis des essais des tensions :

Pour le parafoudre 300 – 550kV et pour les mêmes valeurs de courant que le parafoudre précédent 72 – 145kV, on remarque les mêmes types de variations figures 53 et 54 mais pour l'onde (8/20μs) la non linéarité est plus remarquable que le parafoudre précédent à cause des courants et des tensions élevées pour ce cas.

Première onde (30/60μs) :

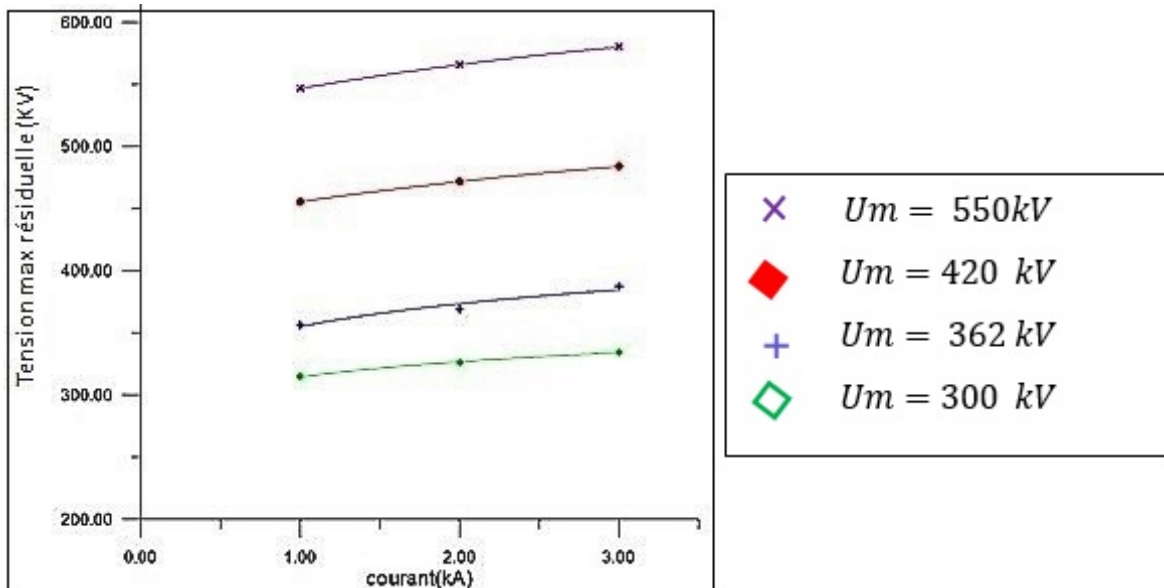


FIGURE 53 – Courbes des essais pour l'onde (30/60μs)

Deuxième onde(8/20 μ s) :

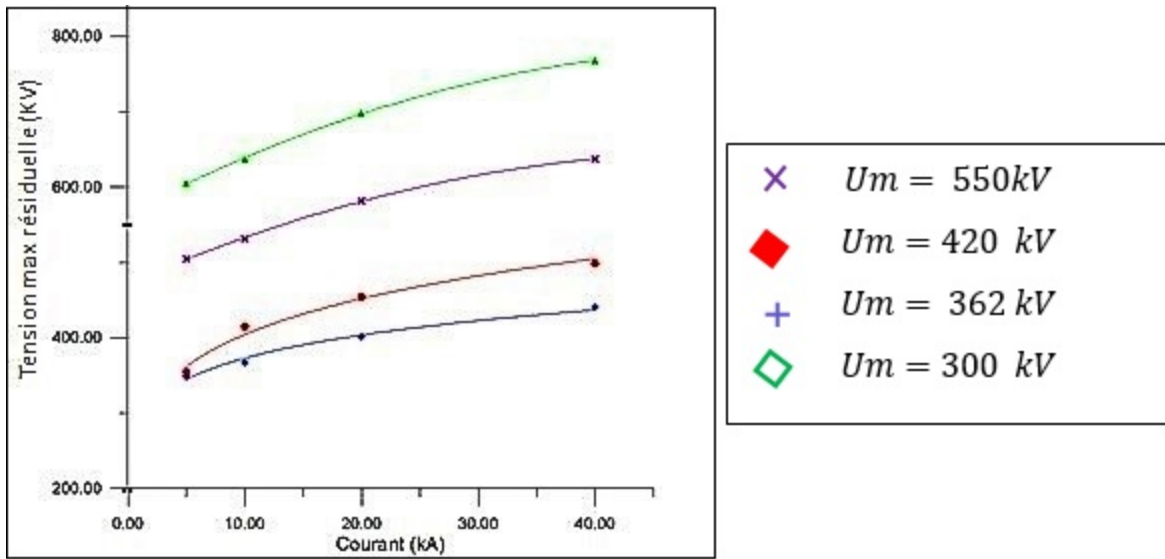


FIGURE 54 – Courbes des essais pour l'onde (8/20 μ s)

4.3.3 Parafoudres à oxyde de zinc HS PEXLIM P-T (245 - 550 kV) :

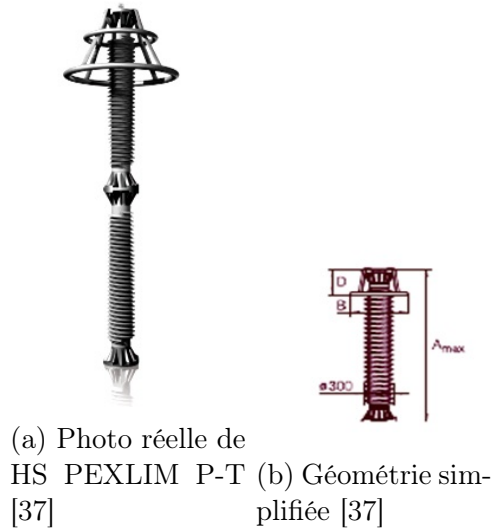


FIGURE 55 – Photo réelle de HS PEXLIM P-T et Géométrie simplifiée

4.3.3.1 les Caractéristiques de modèle :

- Tensions du système (U_m) : 245 – 550kV
- Courant de décharge nominal (CEI) : $20KA_{crête}$
- Tenue aux courants de décharge :
 - Courant fort $4/10\mu s$: $100KA_{crête}$
 - Courant faible $2000\mu s$: $1500A_{crête}$
- Isolation externe : Satisfait / dépasse les normes
- Résistance mécanique :
 - Effort à long terme déclaré (SLL) : $19000Nm$
 - Effort à court terme déclaré (SSL) : $28000Nm$
- Conditions de fonctionnement :
 - Température ambiante : $-50C + 45C$
 - Altitude de conception : $max.1000m$
 - Fréquence : $15 - 62Hz$ [37]

4.3.3.2 Le calcul des paramètres du schéma équivalent suivant le modèle IEEE donne les valeurs suivantes :

$$U = 245kv, m = 115kg, X = 1.77m, n = 1,$$

$$L_1 = 26.55 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_1 = 115.05 [\Omega]$$

$$L_0 = 0.354 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_0 = 177 [\Omega]$$

$$C = 0.112 \times 10^{12} [pF]$$

$$U = 550kV$$

$$m = 310kg, x = 4.89m, n = 1$$

$$L_1 = 73.35 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_1 = 317.85 [\Omega]$$

$$L_0 = 0.978 \times 10^6 [\mu H]$$

$$R_0 = 489 [\Omega]$$

$$C = 0.040 \times 10^{12} [pF]$$

4.3.3.3 Etude de caractéristique vis-à-vis des essais des tensions :

Pour le ce parafoudre 245 - 550 kV et pour une onde de courant de 30/60 μs figure 56 on prends trois valeurs de courant 1 kA , 2 kA et 3 kA et on multiplie les valeurs de la tension de système comprise entre 200kV et 550kV. La figure 57 donne les variations pour l'onde 8/20 μs On remarque le même type de variation.

Première onde (30/60 μs) :

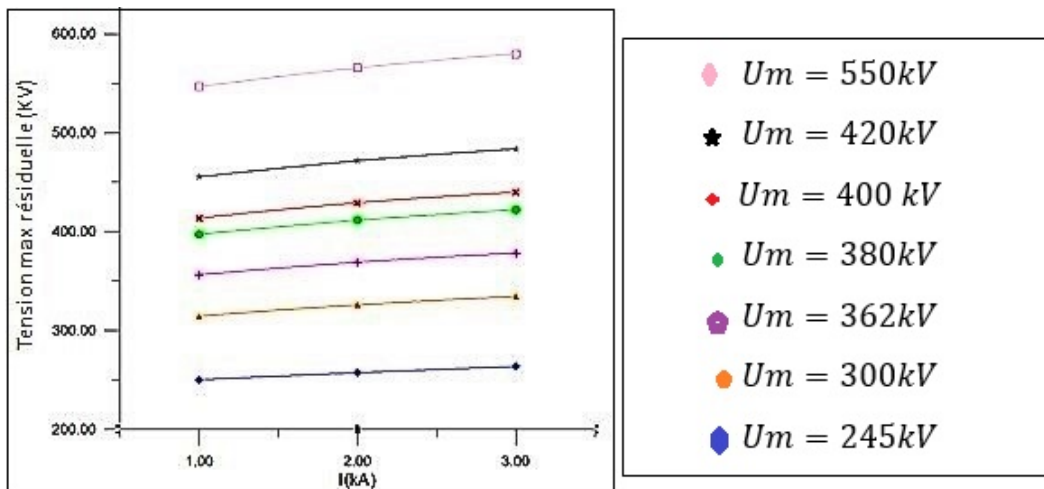


FIGURE 56 – Courbes des essais pour l'onde (30/60 μs)

Deuxième onde(8/20 μs) :

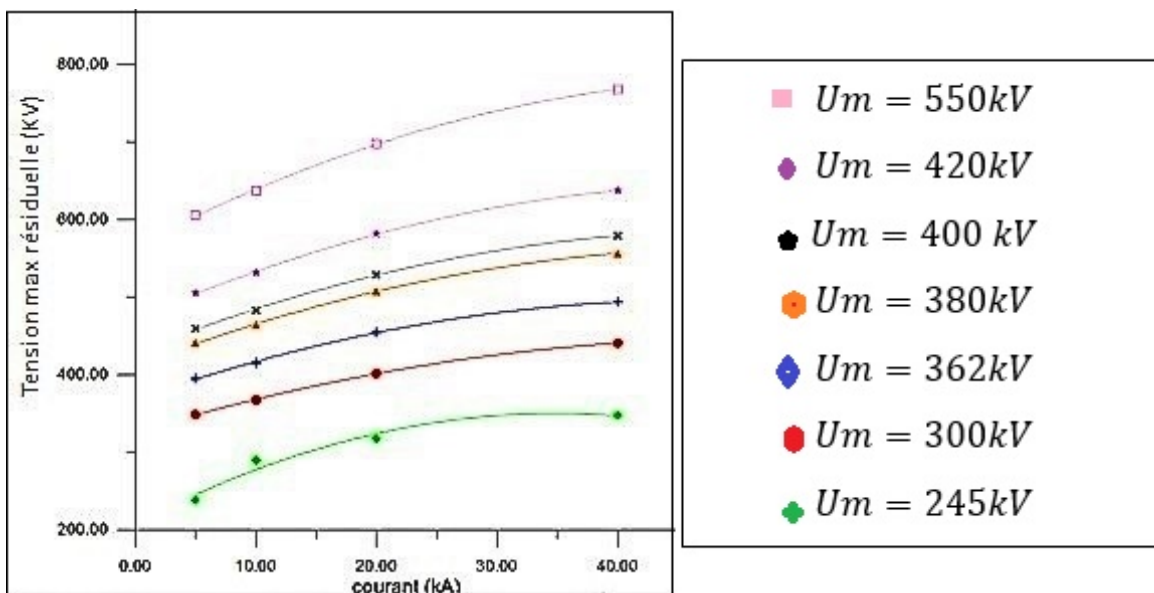


FIGURE 57 – Courbes des essais pour l'onde (8/20 μ s)

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation des parafoudres à oxyde métallique qui est nécessaire pour plusieurs raisons et un progrès considérable dans ce domaine a été fait.

Il est très difficile de construire un modèle général des parafoudres ZnO dans lequel on prend en compte tous les facteurs tel que la pollution, les processus thermiques, la réponse aux contraintes rapides et harmoniques, nous avons présenté les modèles sous forme de circuits équivalents proposés dans les travaux a littérature pour décrire ces phénomènes dynamiques puis on a basé sur le modèle recommandé par le groupe IEEE. Ce modèle peut reproduire le comportement dynamique du parafoudre à oxyde métallique, dans ce modèle, la caractéristique non-linéaire (V-I) du parafoudre est présentée avec deux sections non linéaires séparées par un filtre R-L.

Pour les contraintes lentes, l'impédance du filtre R-L est extrêmement faible qui conduira à considérer que les résistances du modèle sont pratiquement connectées en parallèle. Par contre pour les ondes très rapides l'impédance du filtre R-L devient plus importante.

Pour la dernière partie de ce chapitre, nous avons calculer les paramètres du schéma équivalent suivant le modèle recommandé par le groupe *IEEE* pour trois modèles de parafoudres ainsi que les variations de la tension résiduelle par rapport aux courant de foudre pour deux types d'onde 30/60 μ s et 8/20 μ s

5 Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons essayé de donner un bref aperçu sur la décharge de foudre et la protection contre les dégâts dangereux qui en résultent, l'objectif est de maîtriser ce phénomène afin d'avoir une bonne compréhension. Aujourd'hui l'homme est parfaitement capable de se protéger de ce phénomène grâce à la prévision météorologique en matière de protection des ouvrages et des réseaux, les évolutions récentes ont montré qu'une protection efficace peut être obtenue par la mise en œuvre d'un ensemble de moyens coordonnés.

Le modèle électrogéométrique est largement utilisé, dans le domaine de la protection contre la foudre. Ce modèle qui est basé sur la détermination de la distance d'amorçage en fonction de l'intensité du courant de l'arc en retour, par la méthode de la sphère fictive ce qui permet de d'évaluer la zone de protection d'un paratonnerre.

Les moyens de protection contre la foudre comme les paratonnerres protègent contre les coups de foudre direct par conséquent leur utilité est limitée seulement dans des zones bien déterminées. Tandis que, les éclateurs sont réglés pour s'amorcé lors de l'apparition d'une surtension de foudre. Ils ne protègent pas contre les surtensions de manœuvre, ni contre les surtensions temporaires.

La consommation toujours croissante d'énergie électrique a entraîné l'expansion des réseaux de transport et le développement des lignes à très haute tension. Dans le même temps, afin d'assurer une qualité de service suffisante, des dispositifs de protection contre les surtensions doivent être installés. "parafoudre à oxyde de zinc (ZnO) ou le paratonnerre à dispositif d'amorçage, les éclateurs . . .ext " En effet, ces surtensions peuvent provoquer de nombreuses pannes dans les équipements de électrique et présenter un certain danger pour les utilisateurs.

La deuxième partie de ce mémoire a été réservée à l'étude des parafoudres à base d'oxyde métallique ZnO, en particulier ses caractéristiques électriques et le mécanisme de conduction dans les varistances afin d'optimiser et améliorer leurs caractéristiques principales en agissant sur les paramètres fondamentales de ces parafoudres, la détermination des paramètres électriques du parafoudre ZnO joue un rôle important dans la maîtrise dans son comportement pendant le fonctionnement ces paramètres sont : la conductivité électrique, la permittivité relative avec ces deux variantes ; permittivité constante dans le temps et permittivité temporellement variable.

Nous avons ensuite passé à la modélisation des parafoudres a Oxyde de zink on a commencé par un modèle électrique équivalent simplifié de la varistance ZnO. Puis la modélisation du parafoudre par un schéma électrique qui comporte des éléments avec des valeurs constantes et d'autres variables , on a fait la synthèse des modèles proposés dans les travaux antérieurs et puis nous avons détaillé le modèle recommandé par le groupe IEEE qui peut reproduire le comportement dynamique du parafoudre à oxyde métallique. Dans ce modèle, la caractéristique non-linéaire (V-I) du parafoudre est présentée avec deux sections non-linéaires séparées par un filtre R-L. On a calculé les paramètres du schéma équivalent pour quatre modèles réels du parafoudre.

Résumé

L'objectif du travail exposé dans ce mémoire vise à réduire les risques de foudre et de limiter les pertes qui en résultent, soit humaines ou matérielles. Nous avons choisi d'étudier ce phénomène en introduisant et en étudiant les différentes méthodes de protection disponibles et l'efficacité de moyens de protection comme les paratonnerres à dispositifs d'amorçage et les parafoudres.

Le parafoudre à oxyde de zinc est actuellement considéré comme le plus utilisé et tend à remplacer le paratonnerre détonateurs au carbure de silice parce que il peu être explosif.

Comme la résistance variable réalisée à base d'oxyde de zinc constitue le composant actif du paratonnerre, a de bonnes propriétés en termes de non-linéarité Courant en tension, vitesse de réponse, capacité d'absorption d'énergie et seuil de tension.

Nous avons essayé de modéliser et d'étudier les performances de protection des parafoudres à oxyde métallique (ZnO), et étudié les différents modèles disponibles pour ce dispositif de protection

Mots-clès :

Décharge de la foudre, protection, parafoudre ZnO, paratonnerre à dispositifs d'amorçage, modélisation

ملخص

يهدف العمل المقدم في هذه الأطروحة إلى تقليل مخاطر الصواعق والحد من الخسائر الناتجة سواء كانت بشرية أو مادية. لقد اخترنا دراسة هذه الظاهرة من خلال تقديم ودراسة طرق الحماية المختلفة ووسائل الحماية المتوفرة وفعالة مثل قضبان الصواعق موانع الاشتعال وموانع زيادة.

يعتبر مانع أكسيد الزنك حالياً الأكثر استخداماً من مانع الصواعق من كبريد السيليكون لأنه يمكن أن يكون متفجراً. حيث أن المقاومات المتغيرة المصنوعة من أكسيد الزنك تشكل المكون النشط من مانع الصواعق الذي له خصائص جيدة من حيث التيار غير الخطي في الجهد وسرعة الاستجابة وسعة امتصاص الطاقة وعتبة الجهد.

لقد حاولنا نمذجة ودراسة أداء الحماية لموانع الصواعق بأكسيد المعادن (ZnO) ، ودرسنا النماذج المختلفة المتاحة لهذا الجهاز الواسع.

الكلمات المفتاحية :

تفريغ الصواعق ، الحماية ، مانع ZnO ، مانع الصواعق المبكرة للانبعاثات ، النمذجة

Summary

The objective of the work presented in this thesis is to reduce the risk of lightning and to limit the resulting losses, either human or material. We have chosen to study this phenomenon by introducing and studying the various protection methods available and the effectiveness of means of protection such as early streamer emission lightning rods and surge arresters.

The zinc oxide lightning arrester is currently considered the most used and tends to replace the silica carbide detonator lightning rod because it can be explosive. As the variable resistor made on the basis of zinc oxide constitutes the active component of the lightning rod, it has good properties in terms of non-linearity Voltage current, speed of response, energy absorption capacity and voltage threshold.

We tried to model and study the protection performance of metal oxide (ZnO) surge arresters, and studied the different models available for this protection device.

Key-words :

lightning discharge, protection, zno arrester, early streamer emission lightning rod, modeling

Bibliographie :

- [1] : BIROUCHE.C, CHERIFI.M : Mémoire de fin d'études ; Université Mouloud Mammeri de T izzi Ouzou ; 2011.
- [2] : Cahier technique Merlin Gerin N0 151 et 168.GAZ
- [3] :INERIS- le risque foudre et les installations classées pour la protection de l'environnement, direction des risques accidentels septembre 2001
- [4] :Schneider Electric : Guide de conception des réseaux électriques industriels
- [5] :Schneider Electric : La protection des récepteurs contre les surtensions d'origine atmosphérique
- [6] :Cahier technique 168 : (la foudre et les installations électriques HT).juillet 1993
- [7] :François Gérard : Généralité sur la foudre et les surtensions .Octobre 2008
- [8] :Document technique DT 67
- [9] :A. Tilmatine :Cours Haute tensions Chapitre5, La foudre
- [10] :C. GARY, La Foudre : des méthodologies antiques à la recherche moderne, Masson, 1994.
- [11] :G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton ; (Les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions (la foudre)), Ed Eyrolles,1984, Paris. pp.92-251
- [12] :E. Kuffel, W. S. Zaengl : (High voltage engineering), Pergamon Press, G.B ; 1ère Ed ; 1984. pp : 463-488
- [13] :T. Horvath :(Computation of lightning protection), Research studies press LTD, England ; 1ère Ed ; 1991. pp : 1-76.
- [14] : C. GARY, (La Foudre : des méthodologies antiques à la recherche moderne), Masson, 1994.
- [15] :C. GARY, (La Foudre : nature, histoire risques et protection), Dunod, Paris, 2004.
- [16] :C. Gary, (La foudre), MASSON Paris Milan Barcelone, 1995
- [17] : M. A. Uman ; (The lightning discharge),Int. Geophys. series, N. Y. Academic press,vol.39,1987
- [18] :M. Aguet ; (Haute tension) , Vol. XXII, presses polytechniques romandes, 1987.
- [19] :Hakim Sakkou : mémoire de fin d'étude (Conception d'une compensatrice active multifonction corri- geant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaireset les fours à arc) ;09 janvier 2007
- [20] : Mouloud MECHATI : mémoire de Magister (Modélisation du parafoudre à varistance ZnO pour l'étude de l'amélioration de ses propriétés électriques), ;2010
- [21] :Cherif Med Foudhil et Cherif Khayr Eddine : mémoire de fin d'étude (Calcul des protections d'une ligne de transport électrique HTB-220KV) ; 08/06/2014

- [22] :KUEHNE+NAGEL(ETUDE DE PROTECTION CONTRE LA FOUDRE)
266 Avenue Daumesnil - 75012 PARIS - Tél. 01 48 98 96 56 - Fax : 01 48 98 95
59 http ://www.neusis.fr e-mail : neusis@neusis.fr
- [23] :MM. CHARPENTIER, HALAMA(Etude des Paratonnerres à Dispositif d'Amor-
çage)OCTOBRE 2001
- [24] : BENZOUAOUI M, ELBAH W ,KERRIOU A :mémoire de fin d'études :UNI-
VERSITE DE M 'SILA Promotion 2012
- [25] :Hamel.T,Lakaf.Mmémoire de fin d'études :UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI
DE OUM EL BOUAGHI : (2017/2018)
- [26] : BEDJOUTI Ramzi REGUIG Messaoud : Mémoire de MASTER ACA-
DEMIQUE : Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued " Contribution
à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute
tension basées sur l'emploi de parafoudres ZnO :16/09/2020
- [27]- Frédéric Maciela : Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension
HTB, Technique de l'Ingénieur D4755v2. (16/09/2020).
- [28] Christophe Séraudie, Surtensions et parafoudres en BT-coordination de l'iso-
lement en BT- Cahier Technique Merlin Gerin, N° 179 / p.15, édition septembre
1995
- [29] : moncef boukandoura : Mémoire de Magister "protection des reseaux élec-
triques de haute tension contre les surtensions par les parafoudres à varistances
Zno Sous la direction de : Dr. M. Houabes (Annaba, le 19 Mai 2007)
- [30] BENDAKIR Abdelhakim doctorat en sciences "Contribution à la modélisation
et à la simulation du comportement thermique non linéaire des parafoudres à
oxyde métallique : 09/ 12/2021
- [31] Cherney E. A, " Silicone rubber dielectrics modified by inorganic fillers for
outdoor high voltage insulation applications", IEEE Transactions on Dielectrics
and Electrical Insulation, vol. 12, pp. 1108-1115, 2005
- [32] BEDJOUTI Ramzi et REGUIG Messaoud Contribution à l'étude de la co-
ordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur
l'emploi de parafoudres ZnO le 16/09/2020
- [33] IEEE Std C62.11, IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Alter-
nating Current power circuits, 1993
- [34] IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge
Arresters for Alternating-Current Systems, 1991
- [35] IEEE Working Group 3.4.11, 'Modelling Of Metal Oxide Surge Arresters,
IEEE Transactions on power Delivery, Vol 7, n°1, 1992, pp
- [36] : 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
- [37] : Dib Djalal (l'impact de la foudre sur les Réseaux Etude ,Analyse
et Modélisation) .thèse de doctorat 22 mai 2007
- [38] : BAYADI Abdelhafid : thèse de doctorat : Université FERHAT Abbas Sétif :
21 Novembre 2005