



Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Electrotechnique

Option : Réseau Electrique

Thème

***L'impacte des paratonnerres et des parafoudres
dans la sécurisation des équipements Télécoms
Etude De Cas : les pylônes type (eNode B)***

Devant le jury composé de :

Mr GUIA Talal /MCA	Président
Mr KHECHEKHOUCHE Ali /MCA	Examineur
Mr MIDA Dris /MCB	Rapporteur
Mr SALEMI Dris	Co-Encadreur

Présenté par :

	DJEDIDI Med Oussama
	CHADOU Yacine
	SEDIRA Nabile

Année Universitaire 2021/2022



REMERCIEMENTS



Nous remercions **DIEU** le tout-puissant pour le courage, la volonté et la santé qu'il nous a donnée durant cette période afin de mener à bien nos études et de concrétiser notre projet de fin d'étude dans des meilleures conditions.

Le travail faisant l'objet de ce mémoire de Master a été réalisé sous la précieuse direction de notre encadreur **Monsieur MIDA Dris**, à qui nous exprimons nos profondes gratitude et nos sincères remerciements, pour la confiance qu'il nous a accordé, pour son soutien, ses critiques constructives, ses conseils qui nous ont permis d'évoluer dans notre vision de la recherche et dans la façon de la mener. Nous sommes très heureux de lui exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements pour avoir dirigé notre travail et pour nous ont fait profiter de son expérience, de son savoir et de son souci de la perfection.

Nous adressons nos vifs remerciements et nos profondes gratitude aux membres de jury d'avoir acceptés de participer au jugement de ce travail.

Nous somme reconnaissant, sans exception, à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation de Master 2 des années universitaire 2020/2021 et 2021/2022 et qui ne cessent de nous encourager à continuer nos efforts.

Nos remerciements s'adressent aussi aux **Dr. Maamri Oussama** et **Dr. Labbi Yacine** pour leurs conseils et orientations fructueuse ainsi que les cadres et dirigeants de l'administration de la Faculté des Technologies et du Département de Génie Electrique pour leurs soutiens et leurs contributions afin de nous faciliter les conditions de formation.

Nous remercions énormément **Monsieur SALEMI Dris**, cadre à Algérie Télécom, pour l'aide qu'il nous a réservé durant la période de réalisation du mémoire.

Au nom de dieu clément et miséricordieux

-|-

K *Dédicaces* Э

A mes très chers parents

Je dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, vous préserver et vous accordent santé, longue vie et bonheur. Aucune dédicace ne pourrait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

A mes sœurs et frères

Merci a ma sœur Nadine et a mes frères Brahim et Akram
Que Dieu nous garde toujours unies. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A tous mes amis

Merci pour tous les bons moments qu'on a passé ensemble.
Je tiens à remercier mon cher ami et frère **HAMIDA Boubaker** pour tout le soutien et les efforts qu'il a consacré pour m'assister durant toute ma formation

Djedidi Med Oussama

K

Э

Au nom de dieu clément et miséricordieux

Dédicaces

Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes difficultés de la vie, Je dédie ce modeste travail

A l'homme, le plus cher à mon cœur, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite mon cher papa **CHADOU Med El-mekki.**

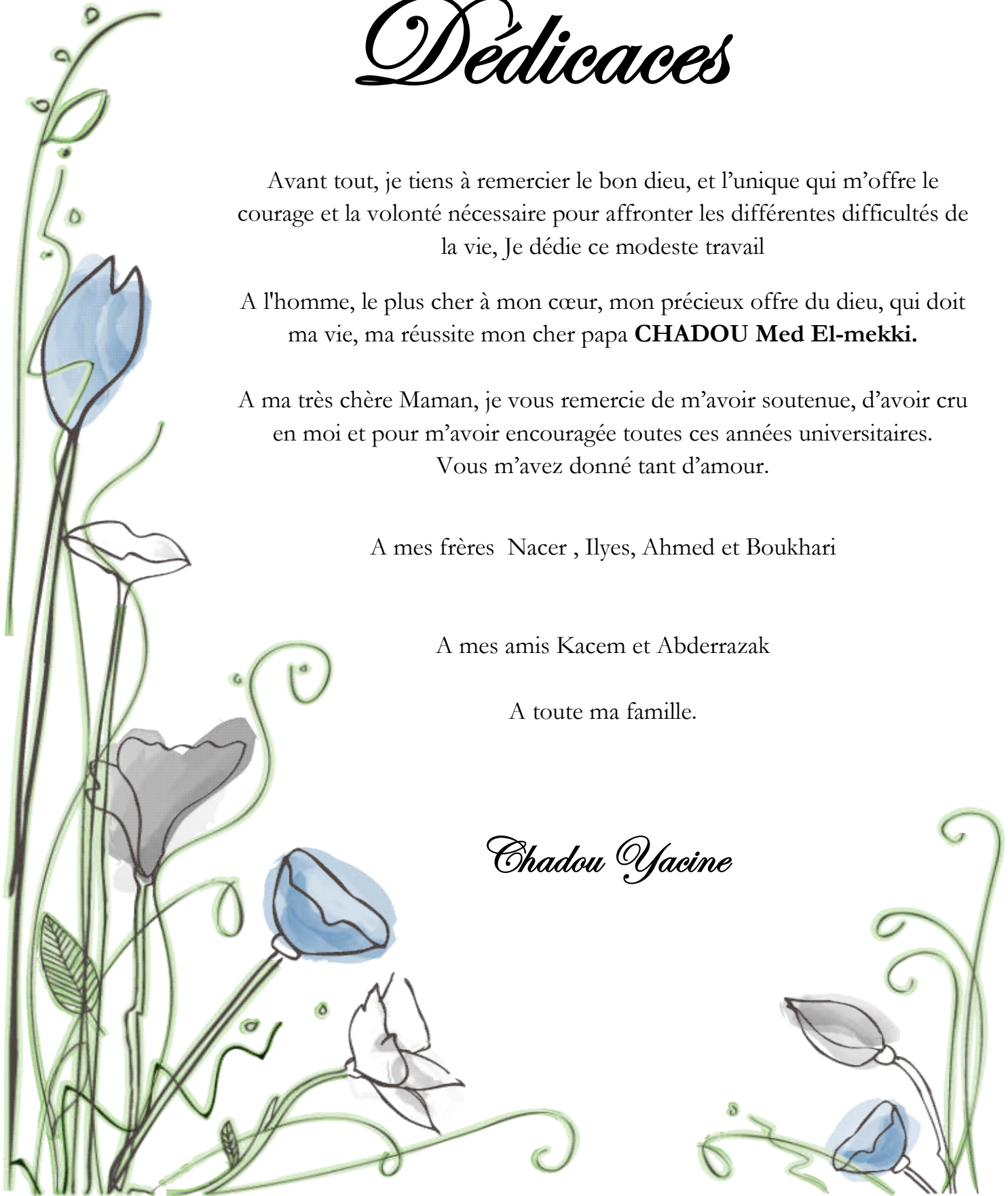
A ma très chère Maman, je vous remercie de m'avoir soutenue, d'avoir cru en moi et pour m'avoir encouragée toutes ces années universitaires.
Vous m'avez donné tant d'amour.

A mes frères Nacer , Ilyes, Ahmed et Boukhari

A mes amis Kacem et Abderrazak

A toute ma famille.

Chadou Yacine



Au nom de dieu clément et miséricordieux

Dédicaces

*Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu, et l'unique qui m'offre le
courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes
difficultés de la vie, Je dédie ce modeste travail*

A ma mère.

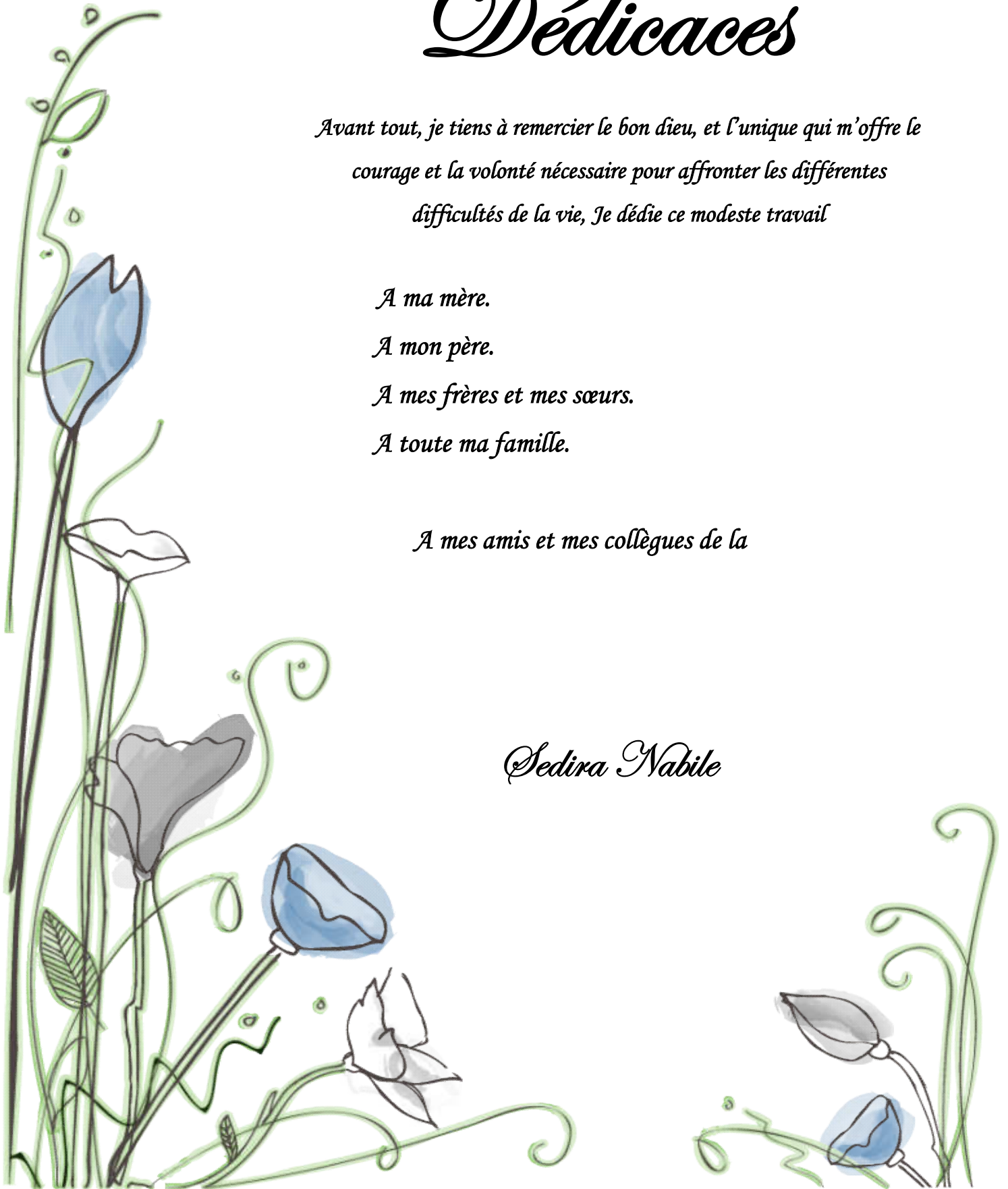
A mon père.

A mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille.

A mes amis et mes collègues de la

Sedira Nabile



Résumé

Les surtensions transitoires dues aux manœuvres ou à la foudre sont à l'origine de perturbation aussi bien pour le matériel que pour le consommateur donc à la qualité de l'énergie. Ceci a conduit à l'utilisation des appareils de protection de plus en plus performants et à l'amélioration de leurs caractéristiques.

La protection des installations électriques contre les surtensions produites par la foudre sur les conducteurs des liaisons électriques est réalisée par l'utilisation de composants parasurtenseurs (parafoudres, éclateurs à gaz, paratonnerre...) qui ont pour but de court-circuiter les impulsions parasites cheminant sur les liaisons électriques en dérivant la majeure partie de l'énergie de l'impulsion directement vers la terre.

Le bon câblage de ces composants est essentiel à leur efficacité ainsi que la longueur et la position des câbles, qui jouent en effet un rôle primordial.

L'objectif de ce mémoire est consacré à l'étude de la foudre et l'analyse des différents moyens de protection contre ce phénomène et on a conclu que le parafoudre est le meilleur moyen de protection contre les surtensions atmosphérique (la foudre).

Mots-clés : surtension transitoire, foudre, parafoudre.

ملخص:

يسبب فوق التوتر العابر بسبب العامل اليدوي أو البرق اضطرابات لكل من الجهاز والمستهلك وبالتالي نوعية الطاقة وقد أدى ذلك إلى استخدام وسائل وقائية أكثر كفاءة.

ان الهدف من حماية المنشآت الكهربائية ضد العواصف التي يولدها البرق على التوصيلات الكهربائية باستخدام مكونات الحماية ضد الصاعقة (مانع الصواعق، المفجر الغازي و مانع الرعد) هو تقصير دارة النبض المنقول على شبكة التوصيلات الكهربائية مما يؤدي الى تحويل الجزء الكبير من طاقة النبض مباشرة نحو الارض.

إن الربط الصحيح و الجيد لهذه المكونات يضمن فعاليتها و طول استخدامها و وضعية الأسلاك تلعب دورا هاما كذلك.

إن الهدف من هذه المذكرة هو دراسة الصواعق وتحليل مختلف وسائل الحماية ضد هذه الظاهرة، واستنتجنا أن مانع الصواعق هو أفضل وسيلة للحماية منشآت اتصالات الجزائر ضد التوتر الزائد في الغلاف الجوي (الصواعق).

الكلمات المفتاحية: التوتر الزائد, الصواعق , مانع الصواعق.

Sommaire

Intitulé	Page
Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	III
Sommaire	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Liste des abréviations	VII
<u>Introduction Générale</u>	01
Chapitre I : Généralités sur la foudre	
I.1 Introduction	02
I.2 La foudre	02
<i>I.2.1 Définition</i>	02
I.3 Niveau Kéraunique NK	03
I.4 Déroulement du coup de foudre	03
I.4.1 Le traceur	03
I.4.2 Les différents types de coup de foudre	04
I.4.2.1 Le coup négatif	04
I.4.2.2 Le coup positif	04
I.4.2.3 Le coup descendant	04
I.4.2.4 Le coup ascendant	05
I.5 Point d'impact	06
I.6 Propagation d'onde	06
I.7 Onde de foudre	06
I.8 Les paramètres électriques de la foudre	07
I.8.1 Valeur de crête du courant	07
I.8.2 Temps de montée (temps de front)	08
I.8.3 Temps de décroissance (le temps de (queue))	08
I.8.4 Pente du courant (raideur du courant)	08
I.8.5 Charge total	08
I.9 Surtensions directes	08
I.10 Sur tension indirectes : (sur câble de garde ou pylônes)	09
I.11 Courant de foudre	10
I.12 Champ électromagnétique génère par la foudre	11
I.13 Les effets de la foudre sur des installations	12
I.13.1 Les effets électriques	12
I.13.2 Les effets thermique	12
I.13.3 Montées en potentiel et amorçage	13
I.13.4 Les effets électromagnétiques	13

I.13.5 Les effets électrodynamiques	14
I.13.6 Les effets électrochimiques	14
I.13.7 Les effets lumineux	15
I.13.8 Les effets acoustiques	15
I.14 Accidents corporels dus à la foudre	15
I.14.1 Différents types de foudroiement	15
I.14.2 Les pathologies de la foudre	16
I.14.3 Recommandation en cas d'orage pour la protection des personnes	16
I.15 Conclusion	17
CHAPITRE II: Protection contre la foudre.	
II.1 Introduction	18
II.2 Protection des réseaux électrique contre les surtensions	18
II.2.1 Principe de protection	18
II.2.1.1 1er niveau de protection	18
II.2.1.1 22ème niveau de protection	19
II.2.1.2 33ème niveau de protection	19
II.3 Les éclateurs	19
II.3.1 L'éclateur à gaz	19
II.3.2 L'éclateur à air	20
II.3.3 Fonctionnement	21
II.3.4 Les avantages	22
II.3.5 Les inconvénients	23
II.4 Parafoudres	23
II.4.1 Parafoudre à carbure de Silicium(SiC)	24
II.4.1.1 Constitution	24
II.4.1.2 Principe de fonctionnement	25
II.4.1.3 Les avantages	26
II.4.1.4 Les inconvénients	26
II.4.2 Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO)	26
II.4.2.1 Constitution	27
II.4.2.2 Principe de fonctionnement	29
II.4.3 Nouveau parafoudre	30
II.4.3.1.1 Parafoudre à enveloppe synthétique	30
II.4.3.1.1 Les avantages	31
II.4.3.1.2 Les inconvénients	31
II.5 Spécification des parafoudres	31
II.6 Paratonnerre à dispositifs d'amorçages (PDA)	36
II.6.1 Paratonnerre à tige simple	36
II.6.2 Paratonnerre à cage maillé	37
II.6.3 Paratonnerre à files tendus	38
II.6.4 Influence des paratonnerres des coups de foudre directe ou proche de la structure	39
II.6.5 Méthode de la sphère fictive	40
II.7 Prise de terre	41
II.7.1 Nature de la résistance d'une prise de terre	42
II.7.2 Résistivité du terrain	42
II.7.3 La nature de la résistance	43
II.7.4 Les valeurs de la résistance de terre	44
II.8 Conclusion	45

CHAPITRE III :Choix des moyens de protection contre la foudre.	
III.1 Introduction	46
III.2 Implantation des paratonnerres au niveau des pylône eNode B	46
III.2.1 Provenance Des Matériaux– Echantillon.	46
III.2.1.1 Provenance des matériaux	46
III.2.1.2. Échantillon	46
III.2.1.3. Qualité	46
III.2.2 Fondation Pylône	46
III.2.3. Plate Forme Pour Pylône	47
III.2.4. Socle Pour Echelle Pylône	47
III.3 Choix des parafoudres	51
III.3.1 La valeur de MCOV en kV (supérieure à la tension de service)	51
III.3.2 Le niveau de protection fourni	52
III.3.3 La tenue thermique	52
III.3.4 Exemple de 3 caractéristiques nécessaires aux choix d'un parafoudre	52
III.4 Les régimes de neutre	54
III.4.1 Les différents types de régime de neutre	54
III.4.2 Schémas d'installation	55
III.5 Les différents types de parafoudres	56
III.6 Comment et où installer les parafoudres?	57
III.7 Règles d'installation des parafoudres	57
III.8 Niveau Kéraunique (NK) au nord d'Algérie	58
III.9 Densité de coup de foudre au sol (Ns)	59
III.10 Nombres de coup de foudres (NL) touchant la ligne	59
III.10.1 La ligne entre Beni saf (ATE) et Ain temouchent (poste THT)	59
III.11 Paramètres de choix des parafoudres	59
III.11.1 Tension maximale de régime permanent «Uc»	59
III.11.2 Courant de court-circuit admissible «Icc»	60
III.11.3 Niveau de protection « Up »	60
III.12 Modélisation et simulation d'un Parafoudre	61
III.13 Conclusion	65
CONCLUSION GENERALE	66
BIBLIOGRAPHIE	67

Liste des figures

N° Figure	Intitulé	Page
Chapitre I		
Figure I.1	L'éclaire de la foudre	2
Figure I.2	Traceur de coup de foudre	3
Figure I.3	Catégories de coups de foudre	5
Figure I.4	Onde normalisée de foudre type 8/20 μ s	7
Figure I.5	Surtension directe de coup de foudre	9
Figure I.6	Surtension indirecte sur un câble de garde	10
Figure I.7	forme du courant de la foudre	11
Chapitre II		
Figure II.1	Éclateur à gaz forte énergie pour réseau BT	20
Figure II.2	Photo d'un éclateur à air	21
Figure II.3	Schéma d'un éclateur à air	21
Figure II.4	Éclateur MT avec tige anti-oiseaux	22
Figure II.5	Constitution d'un parafoudre au carbure de silicium à éclateur	25
Figure II.6	Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO)	28
Figure II.7	Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection 550kV/10Ka	29
Figure II.8	Parafoudre HTA à enveloppe en matériau synthétique	30
Figure II.9	Tensions appliquées à l'isolation d'un transformateur protégé par un parafoudre après écrêtage d'une surtension	34
Figure II.10	Paratonnerre à tige simple	37
Figure II.11	Paratonnerre à cage maillée	38
Figure II.12	Paratonnerre à fils tendus	38
Figure II.13	Choc de foudre sur le sol ou sur le paratonnerre	39
Figure II.14	Détermination d'une zone protégée par la méthode de la «sphère fictive»	40
Figure II.15	Schéma d'installation d'une prise de terre	41
Chapitre III		
Figure III.1	Ecoulement du courant de foudre vers la terre	53
Figure III.2	Courant de choc de foudre en fonction de temps	53
Figure III.3	Schéma explicatif des régimes de neutre	55
Figure III.4	Schéma des différents types de parafoudre	56
Figure III.5	Circuit équivalent de raccordement de parafoudre	57
Figure III.6	Le bloc schématique de SIMULINK d'une ligne de transmission protégé par un Parafoudre	62
Figure III.7	La tension de parafoudre en fonction du temps	63
Figure III.8	L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps	63
Figure III.9	L'intensité de la tension de parafoudre en fonction du temps	64
Figure III.10	L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps	65

Liste des tableaux

N° Tableau	Intitulé	Page
Chapitre II		
Tableau II.1	La résistivité du terrain	42
Tableau II.2	Détermination de la résistance d'une prise de terre	43
Tableau II.3	Les différentes valeurs des résistances de terre	44
Chapitre III		
Tableau III.1	Les différents régimes de neutre	54

Liste des abréviations

<i>Intitulé</i>	Désignation
SiC	Carbure de silicium
ZnO	Oxydes de zinc
μs	Micro second
km/s	Kilomètre par second
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
Ms	Microseconde
Ω	Symbole de l'ohm
kA	Kiloampère
kV	Kilovolt
MT	Moyenne tension
BT	Base tension
HTA	Haute tension
R	Resistance
Q	C'est la charge en coulombs(c)
I	C'est le courant en ampere (a)
t	C'est le temps en seconde (s)
L	L'inductance propre
U	La tension
V	Volt
MCOV	Maximum continuous operating voltage
Vn	Tension nominale
If	Courant de fuite
Np	Niveau de protection
ESE	Early streamer emission

Introduction



INTRODUCTION GENERALE

Toutes installations électriques, lignes de transmission aérienne ou appareillages sont soumis aux phénomènes perturbateurs naturels. Parmi ces phénomènes on précise la foudre. Cette dernière influe directement sur les réseaux électriques par l'impact direct sur les lignes ou indirectement par un rayonnement électromagnétiques [1].

Le réseau électrique a été d'abord protégé par les éclateurs ; puis par des parafoudres associant des éclateurs et des parafoudres à carbure de silicium (SiC), mais maintenant les parafoudres à oxydes de zinc (ZnO) ont remplacé avantageusement les éléments antérieurs.

Ce dernier apparus au début des années soixante-dix, est devenu très séduisant, dans un premier temps, en haute tension, puis assez rapidement en moyenne tension, sauf très rares exceptions le marché des parafoudres n'est aujourd'hui plus constitué que les parafoudres à oxyde de zinc.

Le présent travail est consacré à l'étude du phénomène de la foudre et l'analyse des différents moyens de protection contre ce phénomène ; qui reste toujours très mystérieux pour la plupart des personnes depuis des décennies, la foudre terrifie de nombreux humains par ses manifestations qui frappent l'imagination, sa lumière aveuglante, sa rapidité et le grondement du tonnerre qui l'accompagne, elle apporte avec elle ; la destruction, la mort et le malheur.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons une généralité sur la foudre, la formation des orages et les catégories des coups de foudre ainsi que ses effets.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des principaux moyens de protection contre la foudre comme (l'éclateur, le paratonnerre, le parafoudre.....etc.)

Le dernier chapitre est réservé pour le choix des moyens de protection contre les surtensions et une petite simulation faites par le logiciel MATLAB illustre la réglementation d'un défaut sur une ligne de transmission d'énergie électrique par un parafoudre.



Chapitre I

Généralité sur la foudre



I.1 Introduction:

Depuis l'aube de l'humanité, l'homme est fasciné par la foudre. C'est à partir du XXème siècle que l'étude de la foudre est devenue une science. On découvre alors que les orages sont indispensables à la vie, qu'ils assurent le maintien du champ électrique de notre planète.

Depuis le milieu du XXème siècle à aujourd'hui, le développement des réseaux de transport et de distribution d'énergie, de l'informatique et de l'électronique motive sérieusement la recherche en matière de protection contre la foudre et donc sur le phénomène lui-même.

Ce premier chapitre a pour but la connaissance de l'origine de la décharge naturelle, d'où en tenant compte de leurs causes et conséquences.

La foudre constitue une source de perturbation majeure pour le bon fonctionnement des réseaux. En effet, on distingue deux types d'agressions de la décharge orageuse : l'éclair touche directement l'ouvrage où tombe à proximité.

I.2 La foudre:

I.2.1 Définition:

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque 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).[2]



Figure I.1 : L'éclair de la foudre.

I.3 Niveau Kéraunique NK:

L'activité orageuse d'une région peut être quantifiée par un niveau Kéraunique. Le niveau Kéraunique est défini comme étant le nombre moyen de jours par an au cours desquels le tonnerre est entendu. En Algérie, ce nombre varie de 5 à 25 selon les régions avec une moyenne se situant autour de 15.[13]

I.4 Déroulement du coup de foudre:

I.4.1 Le traceur:

Le traceur est une décharge préliminaire peu lumineuse qui produit entre la terre et le nuage, réparant le chemin au canal de la foudre.

Les coups de foudre sont classés selon : [3]

- le sens de progression du traceur.
- le signe de la charge qui se décharge.

Le traceur de coup de foudre est illustré dans la Figure (I.2):

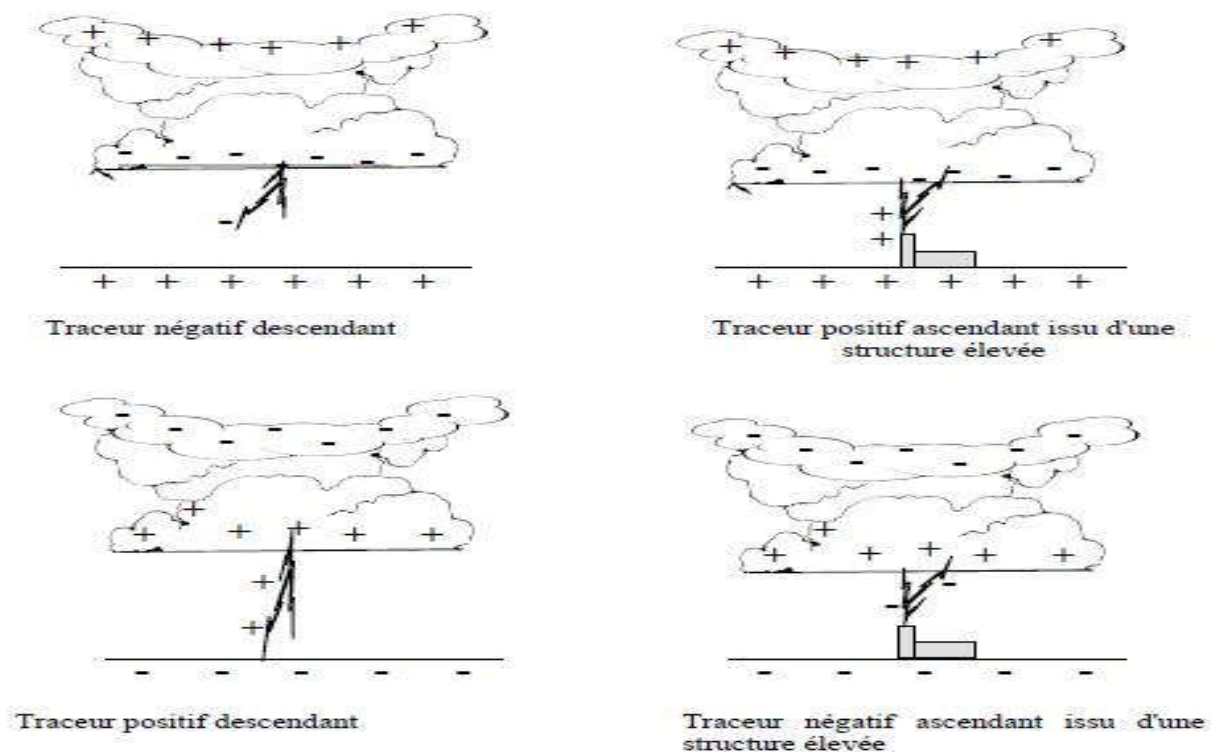


Figure I.2: Traceur de coup de foudre.

I.4.2 Les différents types de coup de foudre :

Les aspérités du sol ou des structures créent un " effet de pointe " qui amplifie de façon très importante le champ électrique local.

Cette augmentation du champ électrique au sol se traduit par une ionisation locale de l'air (effet "Corona"). Ce phénomène est observé depuis longtemps et est ainsi connu sous l'appellation « feu de Saint-Elme ». Un canal d'air ionisé reliant le nuage au sol est alors susceptible de se créer et de permettre l'écoulement d'un courant de foudre de forte intensité.

On distingue quatre types caractéristiques de coups de foudre, selon qu'ils sont négatifs ou positifs et descendants ou ascendants.[14]

I.4.2.1 Le coup négatif:

Le bas du nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées : à une première décharge partielle de durée de front de 10 à 15 μs succèdent des décharges d'attaque plus raides et de descentes plus douces.

I.4.2.2 Le coup positif:

Le bas du nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant de 0,1 s à 0,2 s.

La durée d'attaque varie entre 20 μs et 50 μs et l'amplitude du courant des "coups positifs" est généralement supérieure à celle des "coups négatifs".

I.4.2.3 Le coup descendant :

Caractérisé par son arborescence ouverte vers le bas, c'est le plus fréquent. Il comporte une phase initiale où une pré-décharge se propage par bonds successifs du nuage vers le sol (traceur).

A l'extrémité de ce traceur, le champ électrique est extrêmement élevé, ce qui augmente localement le champ au sol.

Dès que la pointe du traceur approche du sol, des pré-décharges ascendantes vont se développer à partir du sol. Lorsque ces deux canaux se rejoignent, un pont conducteur entre nuage et sol s'établit et permet ainsi le passage d'un courant de forte intensité.

I.4.2.4 Le coup ascendant:

Il est caractérisé par une arborescence ouverte vers le haut. Dans le cas de pylônes de grande hauteur ou de tours, l'effet couronne peut créer une décharge (partant donc du sol) qui va se développer suffisamment loin pour atteindre le nuage. Dès qu'un canal conducteur est créé, les charges accumulées dans le nuage vont s'écouler au sol. Le coup de foudre ascendant est très fréquent en zone de montagne comme a daggar pakistan, caceres colombie et canada.

Les différents coups de foudre sont illustrés ci-dessous :

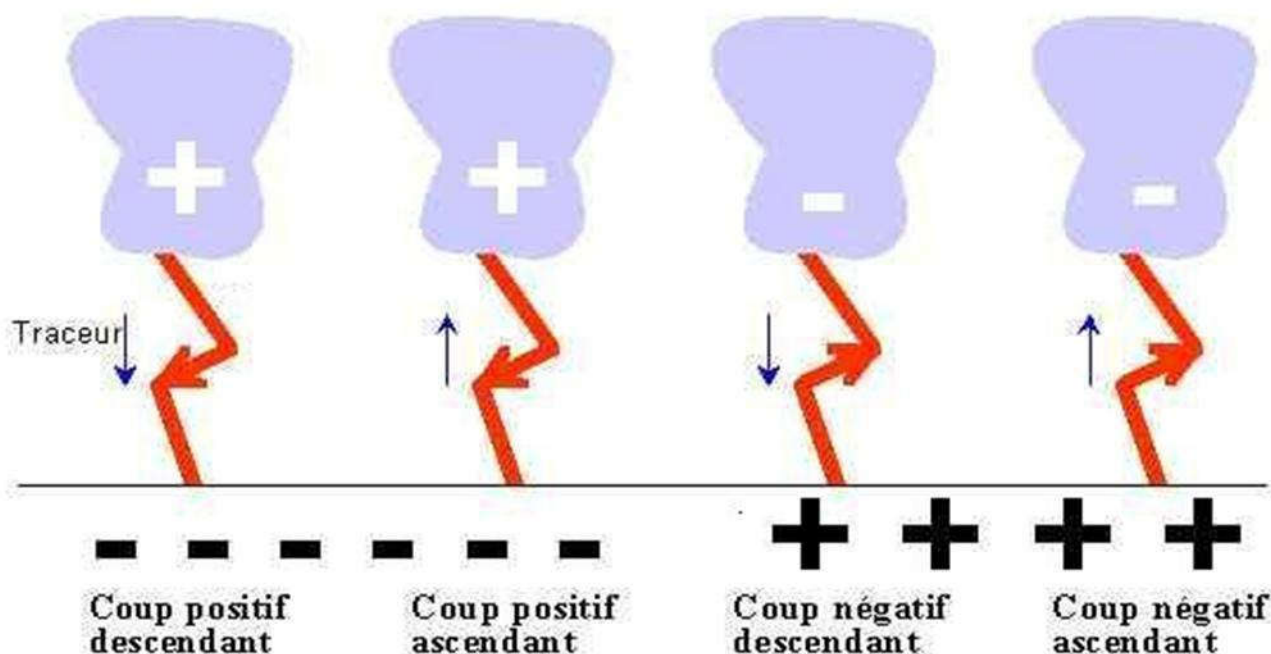


Figure I.3:Catégories de coups de foudre.

Remarque:

Dans les régions à climat tempéré, il a été observé que 80 à 90 % des coups de foudre sont de type négatif descendant, mais les plus énergétiques sont les positifs. En montagne ou en présence d'une proéminence, des coups négatifs ascendants peuvent se développer. Dans les pays plats, les coups de foudre les plus fréquents sont les descendants négatifs. Pour qu'il y ait un coup de foudre ascendant, il faut la présence d'une proéminence importante, telle qu'une tour élevée. [3]

I.5 Points d'impact:

La foudre peut tomber directement sur le sol, les structures ou les lignes. Dans tous ces cas les conséquences peuvent être néfastes du fait de la propagation par conducteur ou par rayonnement.

Le (ou les) point d'impact du coup de foudre ne semble se déterminer que dans la partie inférieure de la trajectoire (aux environs de 300 m d'altitude). De nombreux facteurs locaux peuvent avoir une action sur la localisation de l'impact. (Arbres, bâtiments, cheminées, nature du sol, cours d'eau, etc...).[14]

I.6 Propagation d'onde:

La propagation de l'onde de 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 6 000 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. [1]

I.7 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 - 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 d'une onde de laboratoire dite 8/20

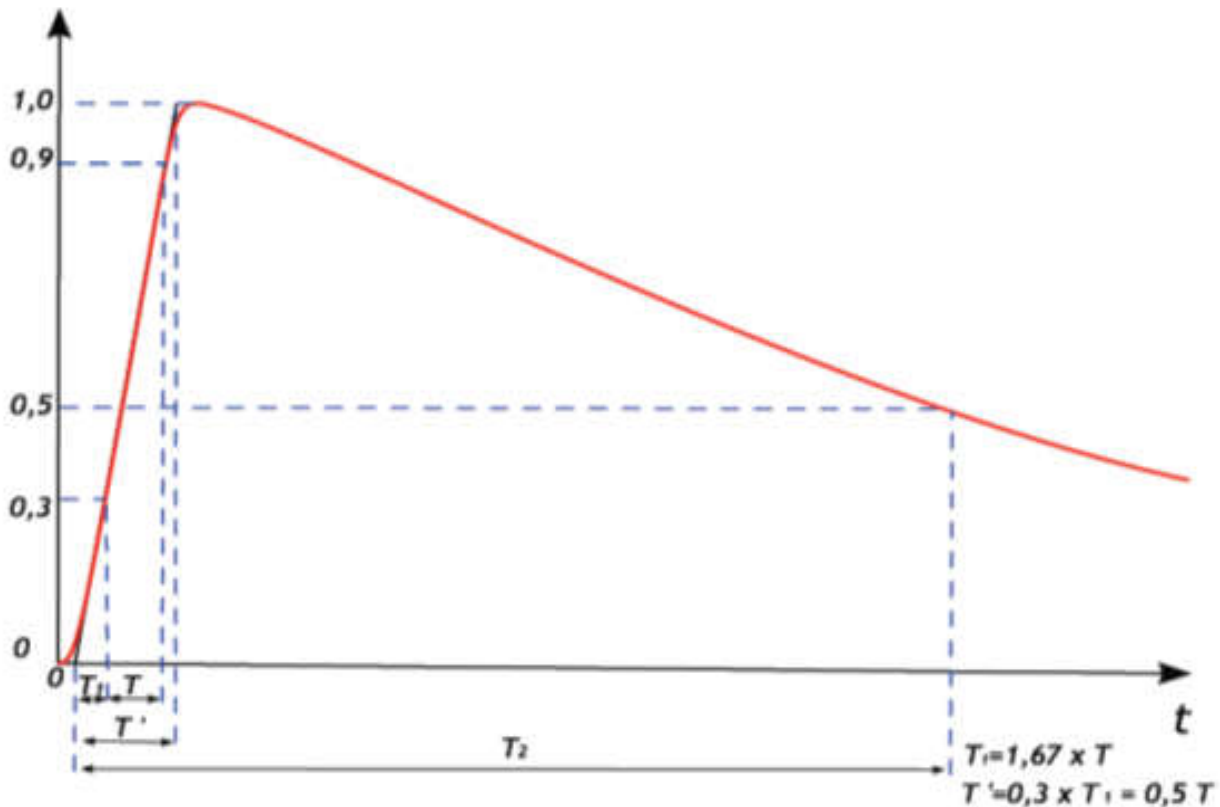


Figure I.4: Onde normalisée de foudre type 8/20 µs.

Note: rappelons qu'une onde 8/20 est une onde dont le temps de montée à la valeur maximale est 8 ms et la durée jusqu'à la valeur minimale en retombée est 20 ms.[7]

I.8 Les paramètres électriques de la foudre:

Un coup de foudre est composé en général de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé de l'arc en retour qui est responsable de la majorité des dégâts causés par la foudre, les principales caractéristiques de la foudre sont généralement les suivantes :[9]

I.8.1 Valeur de crête du courant:

La valeur maximale atteinte par l'intensité d'une impulsion de courant. Cette valeur est variable d'un coup de foudre à l'autre, pour traiter des problèmes de surtensions et des problèmes d'efforts mécaniques engendrés par les chocs de foudre.[12]

I.8.2 Temps de montée (temps de front):

Durée entre l'instant du début de l'impulsion de courant atteint sa valeur maximale.[12]

I.8.3 Temps de décroissance (le temps de queue) :

Durée entre l'origine conventionnelle et l'instant où la valeur de l'onde est retombée à 50% de la valeur de crête. Il est lié aux efforts mécaniques, et sert à déterminer la durée d'application de la force électromagnétique.[12]

I.8.4 Pente du courant (raideur du courant):

Elle s'exprime en kilo ampères par microseconde. la raideur maximale à toujours lieu à la cours du front de monté.[12]

I.8.5 Charge totale :

Ce paramètre exprimé en coulombs(C) permet de déterminer l'énergie transformée en chaleur par l'arc électrique en surface de conducteur .Il permet notamment de déterminer les risques liés à la perforation des conducteurs au des point d'impacts. La charge totale est égale à : [12]

$$Q = I . t \quad (I.1)$$

Q c'est la charge en coulombs(C)

I c'est le courant en ampère (A)

t c'est le temps en seconde (s)

On distingue deux modes de surtensions engendrées par les coups de foudre :

I.9 Surtensions directes:

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 à 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 300Ω, l'onde de tension atteindra 1500 kV. [3]

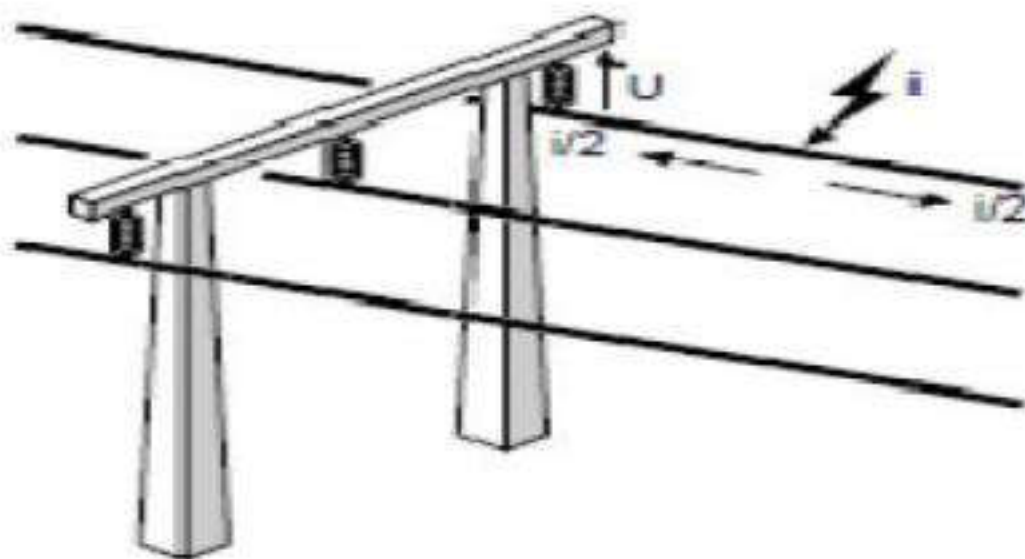


Figure I.5: Surtension directe de coup de foudre.

I.10 Surtensions indirectes:(sur câble de garde ou pylônes)

Dans le cas où la décharge frappe un fil de garde ou un support. Il se produit alors un amorçage en retour dans le cas de réseaux MT et BT (Figure I.6). Quand le coup de foudre frappe le sol au voisinage d'une ligne, il apparaît une surtension par couplage électrostatique (150 à 500kV) et électromagnétique jusqu'à 100kV.

Il en résulte une élévation du potentiel de la tête du pylône dont la valeur dépend de l'inductance propre L du pylône et de la résistance R de la prise de terre :

$$U(t) = x \left[R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \right] \quad (I.2)$$

X : rapport du courant de contournement sur le courant de foudre.

La tension U peut atteindre la limite d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs et provoquer un claquage. il s'agit de l'amorçage en retour. Une partie du courant se propage alors sur la ou les phases amorcées, vers les utilisateurs ; ce courant est en général supérieur à celui d'un coup de foudre direct. [12]

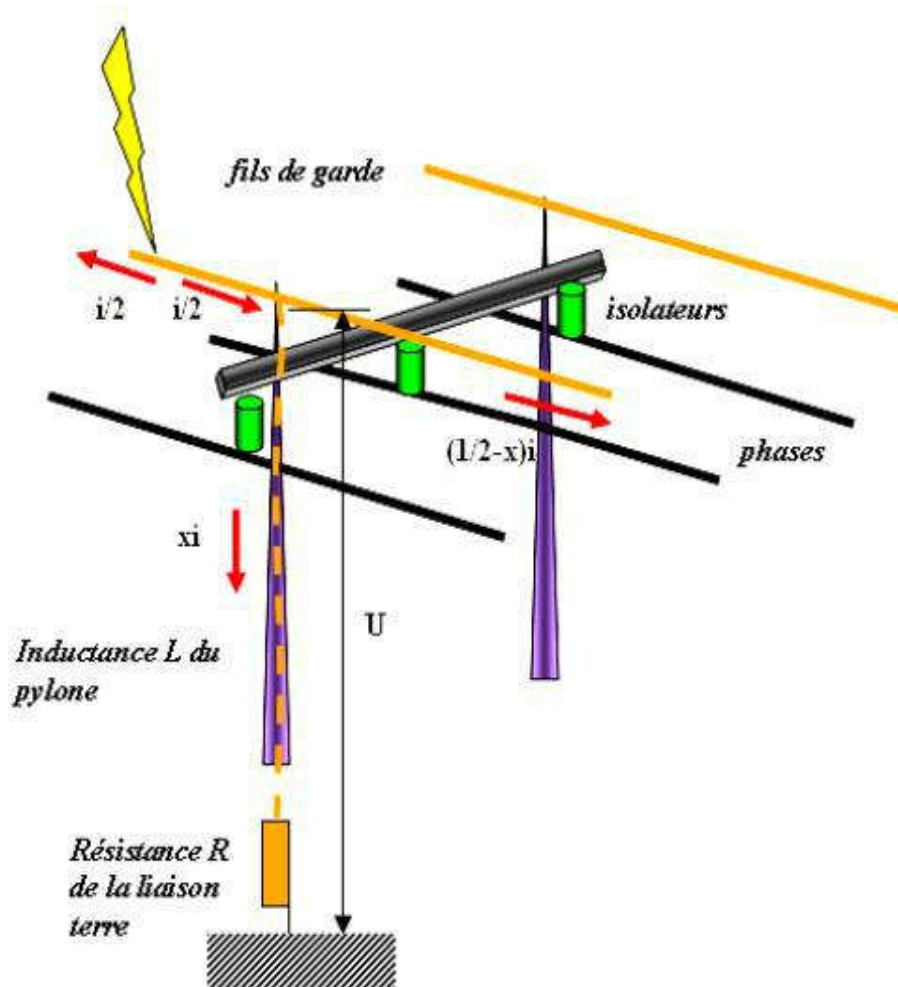


Figure I.6 : Surtension indirecte sur un câble de garde.

I.11 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 »

Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé (voir Figure I.7). Lorsque la décharge principale est terminée, après une durée environ de 100 ms apparaît une ou plusieurs décharges secondaires [3]

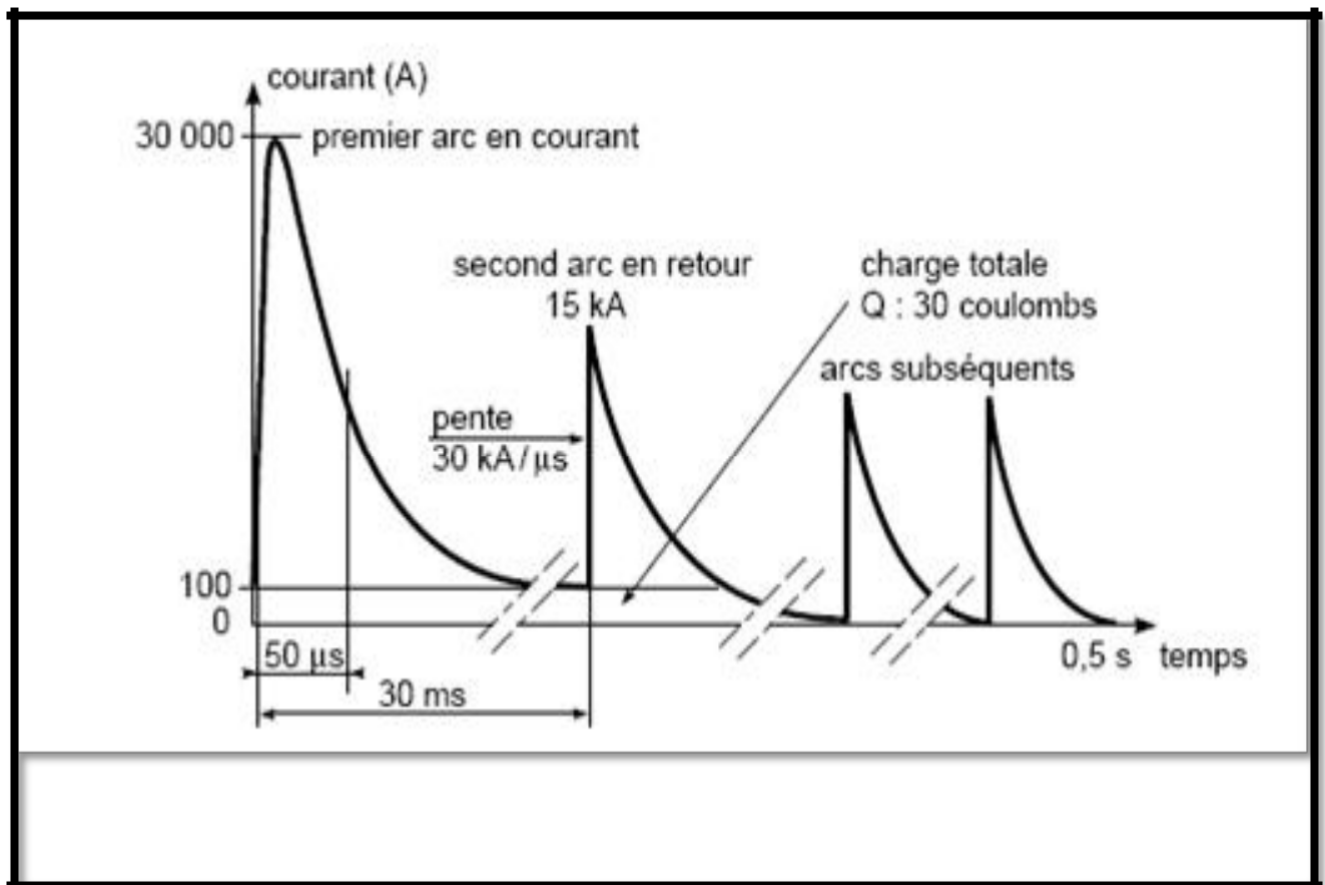


Figure I.7: forme du courant de la foudre.

I.12 Le champ électromagnétique génère par la foudre:

Les coups de foudre perturbent le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique ou de télécommunication, ainsi que les circuits auxiliaires des sous stations. On distingue deux types d'effets de la foudre, selon que l'éclair touche directement l'ouvrage ou tombe à proximité. Dans le premier cas, on parle de coup de foudre direct et dans le second de coup de foudre indirect.

On s'intéresse ici au cas du coup de foudre indirect qui génère un champ électromagnétique perturbateur. Ce champ va induire par couplage une tension sur les lignes du réseau de distribution

d'énergie et sur les lignes de transmission du système de contrôle commande. L'estimation des effets indirects des coups de foudre est nécessaire pour déterminer une coordination correcte des protections.

[11]

I.13 Les effets de la foudre sur des installations:

La foudre est une courante électrique haute fréquence qui entraîne les mêmes effets que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique : [9]

I.13.1 Les effets électriques:

Dans le chemin variés et complexe empruntés par la foudre pour s'écouler dans le sol apparaissent des différences de potentiel importantes sur de faibles distances provoquant des claquages locaux qui endommagent les conducteurs présents dans le sol. Ces tensions présentent un grave danger pour les êtres vivants en surface (tension de pas). [10]

I.13.2 Les effets thermiques:

Les effets thermiques associés au phénomène de foudre peuvent être de plusieurs sortes : [13]

- De manière générale, un courant électrique s'écoulant dans un corps conducteur entraîne son échauffement. Ce phénomène, qualifié d'effet Joule, peut être à l'origine, dans le cas de la foudre, de la fusion des conducteurs dont le volume n'est pas suffisant pour évacuer la quantité de chaleur générée par les courants de foudre.
- Lors de coups de foudre, un contact de mauvaise qualité entre deux conducteurs peut être le siège d'un échauffement important conduisant à la fusion des pièces en contact. Cette fusion pouvant s'accompagner également de la formation d'un arc de retour et de projection de métal porté à haute température, peut constituer un facteur incendiaire important.
- Dans les cas particuliers où les courants de foudre s'écoulent dans un mauvais conducteur (bois, béton), l'échauffement généré est susceptible d'entraîner une vaporisation de l'eau contenue dans le matériau et en conséquence, l'éclatement de ce dernier.
- Aux points de jonction entre un conducteur (surface métallique) et un arc de retour, une grande quantité de charges électriques doit être écoulee dans un temps très bref. Ce phénomène entraîne un échauffement local important du métal, qui, s'il s'avère généralement sans conséquences graves, peut conduire à la perforation de tôle d'acier de 2 à 3 mm d'épaisseur.
- Enfin, lorsque l'arc de retour traverse des substances inflammables, il est capable de déclencher un incendie directement par conduction de la chaleur ou par simple rayonnement thermique.

I.13.3 Montées en potentiel et amorçages:

L'amorçage (l'étincelage) se produit lorsque la tension électrique entre deux points dépasse un seuil qui dépend du milieu isolant et de l'éloignement entre ces deux points. Ce phénomène transitoire se produit dans l'air lorsque le champ électrique est de l'ordre de 30 KV/cm. [13]

Ces différences de potentiel peuvent ainsi occasionner :

- des destructions d'équipements électriques ou électroniques,
- des claquages (étincelles) entre les descentes de paratonnerre et des objets métalliques proches reliés au sol, créant ainsi un risque important d'inflammation.

I.13.4 Les effets électromagnétiques:

Le canal de foudre ainsi que les éléments écoulant le courant de foudre à la terre génèrent un champ électromagnétique. Des courants et tensions induits vont alors apparaître dans les conducteurs proches. A titre d'illustration, signalons qu'à 100 m du point d'impact, un éclair peut induire une tension de 80 V dans une boucle d'un mètre carré formée par un conducteur.

Les différences de potentiels en résultant peuvent à leur tour entraîner des claquages dans les éléments électriques ou électroniques reliés à ces conducteurs. Ces claquages peuvent être également de forte intensité et créer un risque d'inflammation ou de destruction du même type que celui créé par le coup direct. Par ailleurs, certains équipements sensibles aux perturbations électromagnétiques peuvent être perturbés ou détruits par le champ créé par un éclair proche.

Les surtensions induites par un champ électromagnétique sont généralement de courte durée et leur amplitude dépend notamment de la vitesse de variation du courant induit dans le composant considéré. Cette vitesse de variation est à relier à la raideur du coup de foudre et donc au profil de l'onde magnétique générée.

Ainsi, les temps de montée, de valeur de crête et le temps de descente ont chacun des effets destructeurs ou perturbateurs :[14]

- le temps de montée : certains composants discrets (triacs, thyristors par exemple) sont déclenchés ou détruits par des impulsions de bas niveau, mais à front très raide (dU/dt et dI/dt importants) ;

- la valeur de crête : les surtensions de crête supérieures à la valeur admissible de certains éléments entraînent leur destruction par claquage ; c'est le cas pour les condensateurs, les diodes et en général les couches d'arrêt des semi-conducteurs ;
- le temps de descente : les impulsions de longue durée endommagent la plupart des composants du fait de l'énergie qu'elles véhiculent.

Sans aller jusqu'à la destruction d'un composant ou d'un circuit, les perturbations du réseau peuvent aussi entraîner des erreurs de fonctionnement d'équipements électroniques par suite de l'action d'une impulsion, même faible, sur un microprocesseur, une mémoire ou une logique câblée (basculer,...). Les effets seront par exemple :

- l'arrêt ou le démarrage incontrôlé d'une machine automatique,
- le fonctionnement erratique d'équipements,
- la perturbation de programmes informatiques,
- le déclenchement intempestif d'une centrale d'alarme,
- des erreurs d'affichage ou de calcul (mesures,...).

I.13.5 Les effets électrodynamiques:

Des effets électrodynamiques peuvent être générés dès lors qu'un courant fort circule dans un conducteur se trouvant par ailleurs dans un champ magnétique généré par des courants voisins. Par analogie, on peut se référer aux phénomènes apparaissant sur des jeux de barres de poste de puissance en cas de court-circuit.

Ces effets peuvent être soit attractifs, soit répulsifs suivant la disposition des conducteurs les uns par rapport aux autres. Ces efforts peuvent atteindre de plusieurs centaines à plusieurs milliers de newtons pour des coups de foudre violents et conduisent à des déformations mécaniques pouvant entraîner des ruptures ou des arrachages de support.[13]

I.13.6 Les effets électrochimiques:

Ces effets sont généralement négligeables sur les installations au sol, les quantités de matière pouvant se décomposer par électrolyse restant faibles, même pour des quantités de charge transférées importantes. Une surveillance des prises de terre reste cependant nécessaire (risque de corrosion,...).[13]

I.13.7 Les effets lumineux:

Les effets sur les installations sont limités aux équipements optiques (cellules, caméra,...). En ce qui concerne l'homme, des lésions oculaires peuvent toutefois apparaître.[13]

I.13.8 Les effets acoustiques:

Le tonnerre est une onde de choc violente qui génère des pressions importantes à courte distance (des centaines de d'atmosphère dans le plasma du canal de foudre) qui peuvent provoquer des bris de vitres à quelque mètres du point d'impact. La perception des tonner ne dépasse guère 10 km dans les régions tempérées à grande densité de population ; elle atteint 30 à 40 km dans les régions tropicales naturelles. [10]

I.14 Accidents corporels dus à la foudre:

L'objet de ce document est de présenter le risque foudre relativement aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement. Cependant, il paraît instructif de simplement citer les risques pour l'homme associés au phénomène de foudre, à titre indicatif, d'une part, et pour la protection éventuelle des opérateurs sur site d'autre part.

Les accidents corporels dus à la foudre ne sont pas très fréquents, mais leurs conséquences, souvent très graves, doivent être connues, ainsi que les règles élémentaires à respecter pour se protéger. [13]

I.14.1 Différents types de foudroiement:

En ce qui concerne l'atteinte d'une personne par un coup de foudre, il convient de distinguer :

- Le coup de foudre "direct" : le courant de foudre "entre" par la partie supérieure d'une personne et s'écoule au sol en passant par les membres inférieurs ; *f*
- Le foudroiement par éclair "latéral" : le courant de foudre "descend" par un élément faiblement conducteur avant de choisir un chemin de moindre résistance qui peut être une personne se situant à proximité ; *f*
- Le foudroiement par "tension de pas" : lorsque la foudre frappe un point au sol, on a alors une différence de potentiel suffisante pour générer un courant passant par les membres inférieurs d'un individu ;
- Le foudroiement par "tension de toucher" : la tension de toucher intervient comme mécanisme de foudroiement lorsqu'une personne touche un objet conducteur lui-même parcouru par un courant de foudre ; *f*

- Le foudroiement par « courant induit » : foudroiement par captage capacitif d'une des ramifications d'un coup de foudre descendant ; f
- Le foudroiement par "différence d'impédance", avec le milieu ambiant. Par exemple une personne dans une piscine présente une impédance de plus faible valeur que le milieu ambiant et sera ainsi parcourue par un courant plus fort.

I.14.2 Les pathologies de la foudre :

Le risque majeur des foudroiements est l'arrêt cardio-respiratoire. Comme dans le cas des électrisations par courant de fréquence industrielle, seule la réanimation cardiaque et respiratoire immédiate peut sauver la victime.

Cependant, le diagnostic de foudroiement peut poser des difficultés, la pathologie de la foudre n'étant pas toujours bien identifiée. Une erreur de diagnostic peut avoir de lourdes conséquences, le foudroiement s'accompagnant généralement de complications lourdes. Dans tous les cas, un examen approfondi par un spécialiste s'impose.

Les types de lésions générées par la foudre sont multiples :

- lésions neurologiques,
- lésions cardio-vasculaires,
- brûlures des tissus et des chairs,
- lésions traumatiques, auditives ou oculaires.

I.14.3 Recommandations en cas d'orage pour la protection des personnes:

Pour se protéger de la foudre, il convient de respecter les principes suivants :

- ne pas constituer une cible pour la foudre,
- ne pas se placer dans des situations qui risquent d'engendrer une différence de potentiel entre deux parties du corps.

Les personnes voulant se protéger peuvent notamment prendre les précautions suivantes :

- chercher un abri bas dans un endroit ayant un toit relié électriquement à la terre ou un abri métallique (voiture,...),
- lorsqu'il n'y a pas d'abri à proximité, il faut à la fois réduire sa hauteur (s'accroupir) et réduire sa surface au sol (joindre les deux pieds),
- éviter de courir, de s'allonger et de faire de grands pas,

- éviter les abris naturels (grottes, bas de falaise, cascade,...),
- éviter de faire de la bicyclette, de monter à cheval, de rester dans un véhicule à toit ouvert,
- éviter de marcher dans l'eau ou de nager,
- se tenir à l'écart des endroits élevés, des arbres de grande taille ou isolés. Si la proximité d'un arbre ne peut être évitée, prendre position au-delà de la limite du feuillage,
- éviter le contact ou la proximité des structures métalliques et descentes de paratonnerres,
- ne pas porter sur soi des objets métalliques,
- éviter ou limiter l'utilisation du téléphone (traditionnel).
- Eviter le contact avec tout objet métallique, appareils électriques, encadrement de fenêtre, radio, télévision.

I.15 Conclusion:

Dans cette partie théorique, on a étudié la phénoménologie de la foudre, qui démontre que ce phénomène est trop dangereux surtout pour les lignes de transport d'énergie électrique.

Ce phénomène (la foudre) provoque une onde de choc très importante, ce qui engendre l'augmentation du champ électrique des lignes de transport d'électricité.

Les foudres peuvent causer des dégâts très importants au niveau des installations électriques ce qui exige obligatoirement une protection propice et efficace qu'est l'objet de la deuxième partie dans ce travail.

Chapitre II

Protection contre la foudre



II.1 Introduction:

Depuis l'invention du paratonnerre par Benjamin Franklin (États-Unis d'Amérique) et Jacques de Romas (France) en 1753, différents dispositifs de capture de la foudre ont vu le jour et la protection contre la foudre n'a cessé d'évoluer pour améliorer son efficacité.

On distingue aujourd'hui deux systèmes de protection, qui sont complémentaires l'un à l'autre :

- Les systèmes de protection extérieure ont pour fonction de capter les coups de foudre qui, en leur absence, auraient frappé le bâtiment ou la structure, puis d'écouler les courants de foudre vers la terre, sans que ceux-ci puissent causer des dégâts ou pénétrer à l'intérieur du volume à protéger.
- Les systèmes de protection intérieure ont pour fonction de protéger les installations et équipements électriques intérieurs, ainsi que les personnes, contre les surtensions conduites ou induites et les montées en potentiel (nous verrons par la suite ce qu'il faut entendre par ces termes).

II.2 Protection des réseaux électriques contre les surtensions:

II.2.1 Principe de protection :

La protection des installations et des personnes contre les surtensions est d'autant meilleurs qu'un écoulement des surtensions vers la terre est assuré.

On distingue trois niveaux de protections contre les surtensions : **[15]**

II.2.1.1 1^{er} niveau de protection:

L'objectif est l'éviter l'impact direct les ouvrages en captant la foudre et en l'orientant vers des lieux d'écoulement privilégiés, au moyen de :

- Paratonnerres, dont le principe est basé sur la distance d'amorçage ; une tige placée en haut de la structure à protéger capte la foudre et l'écoule à travers le réseau de terre.
- Cage de Faraday.
- Câble de garde.

II.2.1. 22^{ème} niveau de protection:

Son but d'assurer que le niveau d'isolement au choc des éléments du poste n'est pas dépassé.

Il est réalisé en HT au moyen d'éléments assurant de l'onde de foudre à la terre tels que :

- Eclateurs.
- Parafoudres HT.

II.2.1. 33^{ème} niveau de protection:

Utilisé en BT comme protection complémentaire des équipements sensibles (informatique, appareils de télécommunications...).

Il est réalisé au moyen de :

- Filtres série.
- Limiteurs de surtensions.
- Parafoudres BT.

II.3 Les éclateurs:

Il existe deux types d'éclateurs : les éclateurs à gaz et les éclateurs à air:

II.3.1 L'éclateur à gaz:

L'éclateur à gaz est constitué d'une enceinte hermétique, généralement en verre ou en céramique, remplie d'un mélange de gaz de niveau de pureté bien défini et munie de plusieurs électrodes (en général 2 ou 3). Monté entre la ligne à protéger et la terre, il a pour effet d'écouler le courant de foudre dès que la surtension apparaissant sur la ligne est suffisante pour amorcer le gaz entre les électrodes. Après le passage de la surtension, l'éclateur reprend son état de repos, isolant à nouveau la ligne de la terre, si cette ligne est alimentée par une source d'énergie de forte impédance (cas d'une ligne téléphonique, par exemple), permettant ainsi de réduire le courant de suite.[16]

(La figure II.1) présente un éclateur à gaz bipolaire forte énergie:

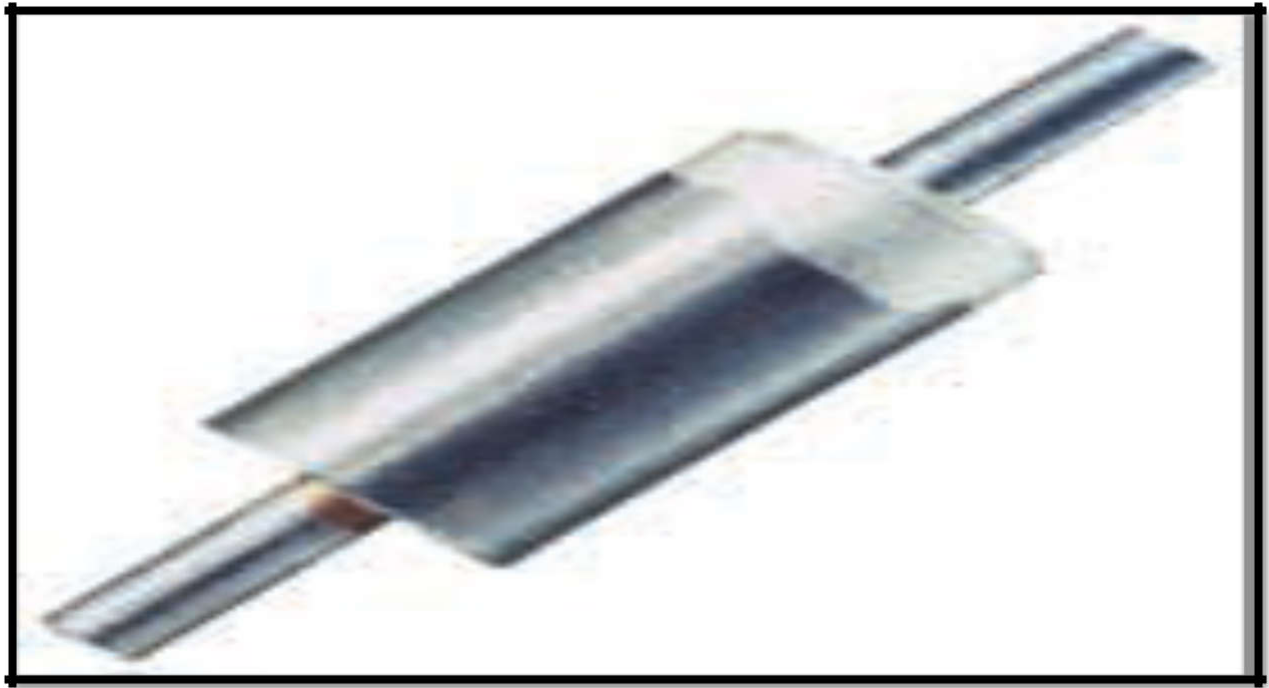


Figure II.1: Éclateur à gaz forte énergie pour réseau BT.

II.3.2 L'éclateur à air:

L'éclateur à air a une tension d'amorçage qui croît à peu près linéairement avec le produit de la pression par la distance inter-électrodes, c'est-à-dire que le gradient d'amorçage dépend de la pression. Il existe deux catégories d'éclateurs à air : les éclateurs ouverts et les éclateurs encapsulés : [16]

- **L'éclateur ouvert:** est sensible à de nombreuses causes externes d'amorçage (humidité, poussières...). Pour éviter ces inconvénients, il doit être mis à l'abri des conditions climatiques extérieures dans un boîtier (parafoudre, coffret...) permettant l'évacuation des gaz chauds (plasma) et/ou de la pression générés par l'arc entre les électrodes.
- **L'éclateur encapsulé:** est fermé comme l'éclateur à gaz, mais le gaz est de l'air et la pression est la pression normale, par opposition avec ce dernier.

La difficulté d'avoir un éclateur à air capable de couper naturellement le courant de suite sur un réseau d'énergie, et cela dans des conditions de surtension de foudre importante, limitait auparavant leur utilisation. De nouvelles technologies d'éclateurs sont apparues récemment. La forme des électrodes et les matériaux utilisés permettent d'améliorer la capacité d'extinction du courant de suite et ces éclateurs sont désormais réputés auto-extinguibles. Les éclateurs à air sont actuellement capables de couper des

courants de 50 kA-50 Hz suite à un choc de foudre de 50 kA de forme 10/350 alors que les éclateurs encapsulés sont capables de supporter les mêmes contraintes de foudre mais coupent des courants 50 Hz plus faibles. Les valeurs de courant 50 Hz qu'un éclateur encapsulé peut couper, qui étaient typiquement de l'ordre de 6 kA il y a un an ou deux, sont désormais passées à 25 kA, ce qui couvre une large majorité de cas d'application. [16]

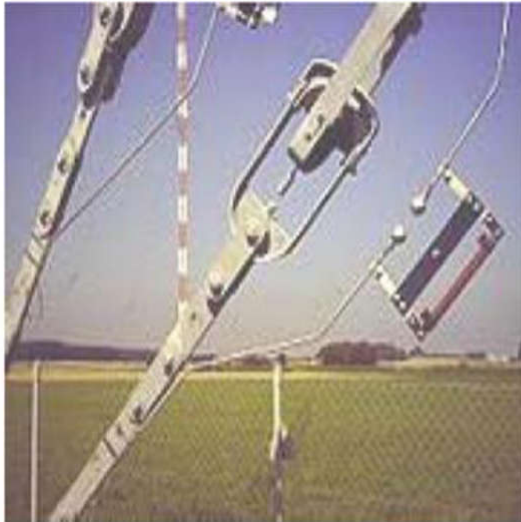


Figure II.2: Photo d'un éclateur à air.

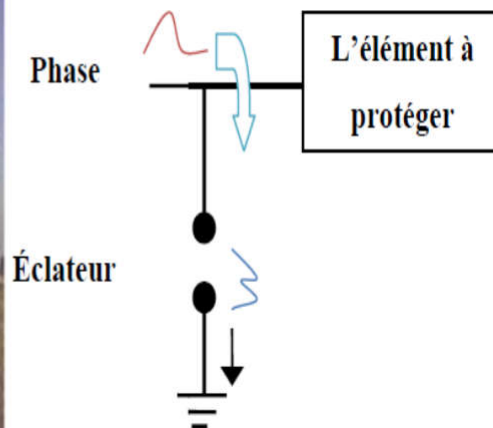


Figure II.3: Schéma d'un éclateur à air.

II.3.3 Fonctionnement:

A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protéger ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur, (Figure II.4).

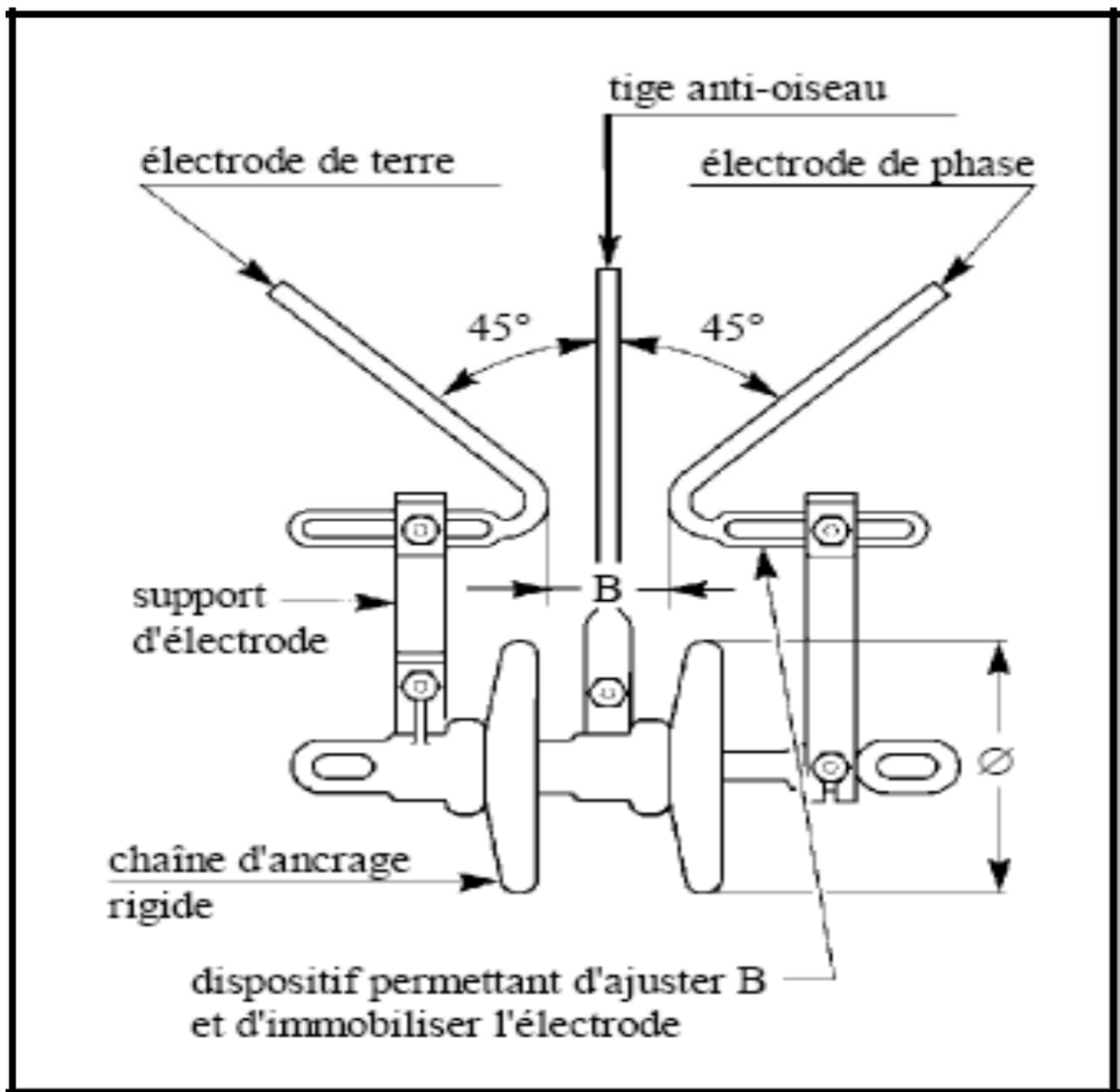


Figure II.4: Éclateur MT avec tige anti-oiseaux.

II.3.4: Les avantages:

Les principaux avantages des éclateurs sont :

- Leur faible prix.
- Leur simplicité.
- La possibilité de réglage de la tension d'amorçage.

II.3.5: Les inconvénients:

- Les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables (jusqu'à 40 pourcent) 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 ré-enclenchement 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 provoqué par une surtension à front raide n'est pas instantané. En raison de ce retard à l'amorçage, la tension réellement atteinte dans le réseau est supérieure au niveau de protection choisi. Pour tenir compte de ce phénomène, il est nécessaire d'étudier les courbes tension-temps de l'éclateur.
- 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.

II.4 Parafoudres:

Le parafoudre est un semi-conducteur à résistance non linéaire (de plusieurs $M\Omega$ à quelques Ω), en général à l'oxyde de zinc (ZnO), dont les caractéristiques sont bien maîtrisées. Il est connecté entre phases et terre.[8]

- son fonctionnement est similaire à celui de l'éclateur, mais il contrôle mieux la tension :
 - peu de dispersion de sa tension résiduelle caractéristique $U = f(I)$ ou «Residual voltage»,
 - retard à la conduction quasiment nulle,
 - retour naturel à l'état initial (isolant) donc sans établissement d'un courant de Suite.
- principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre :
 - sa tension maximale permanente, ou Maximum Continuous Operating Voltage» MCOV doit être supérieure à la tension maximale d'exploitation du réseau, avec une marge de sécurité de 5 %.

- sa tension nominale, ou «rated voltage» fixée à $1,25 \times \text{MCOV}$.
- son niveau de protection.
- sa capacité énergétique à supporter des surtensions temporaires, donnée par une courbe amplitude-durée.

Le parafoudre se distingue de l'éclateur, dans son fonctionnement, par les faits suivants :[13]

- il travaille en atmosphère contrôlée, c'est-à-dire que sa tension n'est pratiquement pas influencer par les conditions atmosphériques.
- contrairement aux éclateurs, il ne produit pas de front raide lors de son amorçage, grâce à la présence de la résistance non linéaire.
- la résistance non linéaire placée en série avec l'éclateur limite le courant de suite, qui est coupée lors du prochain passage par zéro de la tension.

II.4.1 Parafoudre à carbure de Silicium (SiC):

II.4.1.1 Constitution:

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 II.5), l'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).[6]

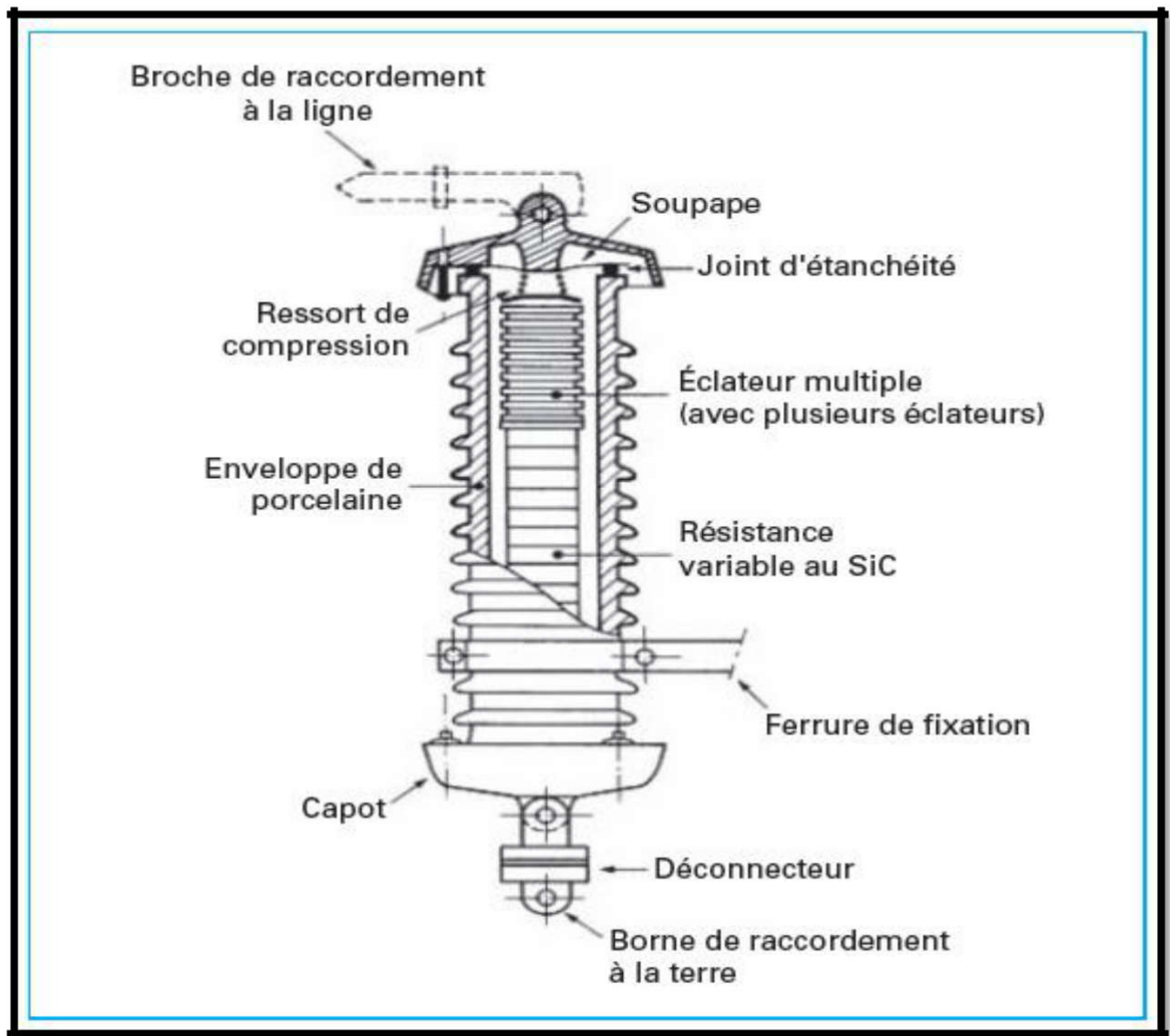


Figure II.5: Constitution d'un parafoudre au carbure de silicium à éclateur.

II.4.1.2 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 au travers des résistances dont la valeur est d'autant plus faible que la tension est élevée (caractéristique non linéaire), ce qui permet de limiter la surtension.

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

II.4.1.3 Les avantages:

Par rapport à l'éclateur, le parafoudre SiC présente les avantages suivants :

- Moins de dispersion de la tension d'amorçage, surtout pour des surtensions à front raide;
- L'élimination du défaut par une extinction spontanée de l'arc (pas de courant de suite au-delà d'une demi-période);
- Une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde coupée (onde à front raide);
- Les contraintes atmosphériques sont supprimées, car l'ensemble est placé dans une enveloppe de porcelaine étanche.

II.4.1.4 Les inconvénients:

Parmi les inconvénients on peut citer:

- Un coût beaucoup plus élevé que l'éclateur;
- Les varistances SiC ne supportent pas un écoulement prolongé de courant. De ce fait, un parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une surtension temporaire.

II.4.2 Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO):

C'est au cours des années soixante que des varistances constituées d'une céramique à base d'oxyde de zinc sont apparues sur le marché pour la protection des circuits électroniques.

Dès 1970, des constructeurs se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces céramiques.

Pour l'électrotechnique, ces composants présentent deux avantages essentiels :

- Un coefficient de non-linéarité si important que l'on peut en faire des parafoudres sans éclateurs, dont la partie active reste sous tensions en permanence.
- Leur capacité d'absorption de l'énergie est élevée et on peut les utiliser sur tous les réseaux, de l'électronique jusqu'à transport d'énergie à très haute tension (225 ou 400KV).

Le temps de réponse des varistances ZnO est très court (quelques dizaines à quelque centaines de nanosecondes au maximum). [6]

II.4.2.1 Constitution:

Le parafoudre ZnO est composé essentiellement d'un assemblage en série de varistances à base d'oxyde de zinc dont le nombre détermine la tension de fonctionnement. Le tout est encapsulé sous une enveloppe en porcelaine ou en polymère (Figure II.6). Pour augmenter leur d'absorption d'énergie, plusieurs colonnes de varistances sont raccordées en parallèle afin de répartir le courant de décharge.

La fabrication des varistances ZnO avec des caractéristiques remarquables a permis le changement de la constitution des parafoudres. En effet leurs forte non linéarité et leur grande résistivité à l'état bloqué ($10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$) ont permis de supprimer l'utilisation des éclateurs, qui constituait un point faible pour les parafoudres SiC, et ce avec un courant de fuite à l'état normale de l'ordre de milliampère, sans l'éclateur le parafoudre ZnO est plus léger et plus facile à fabriquer.

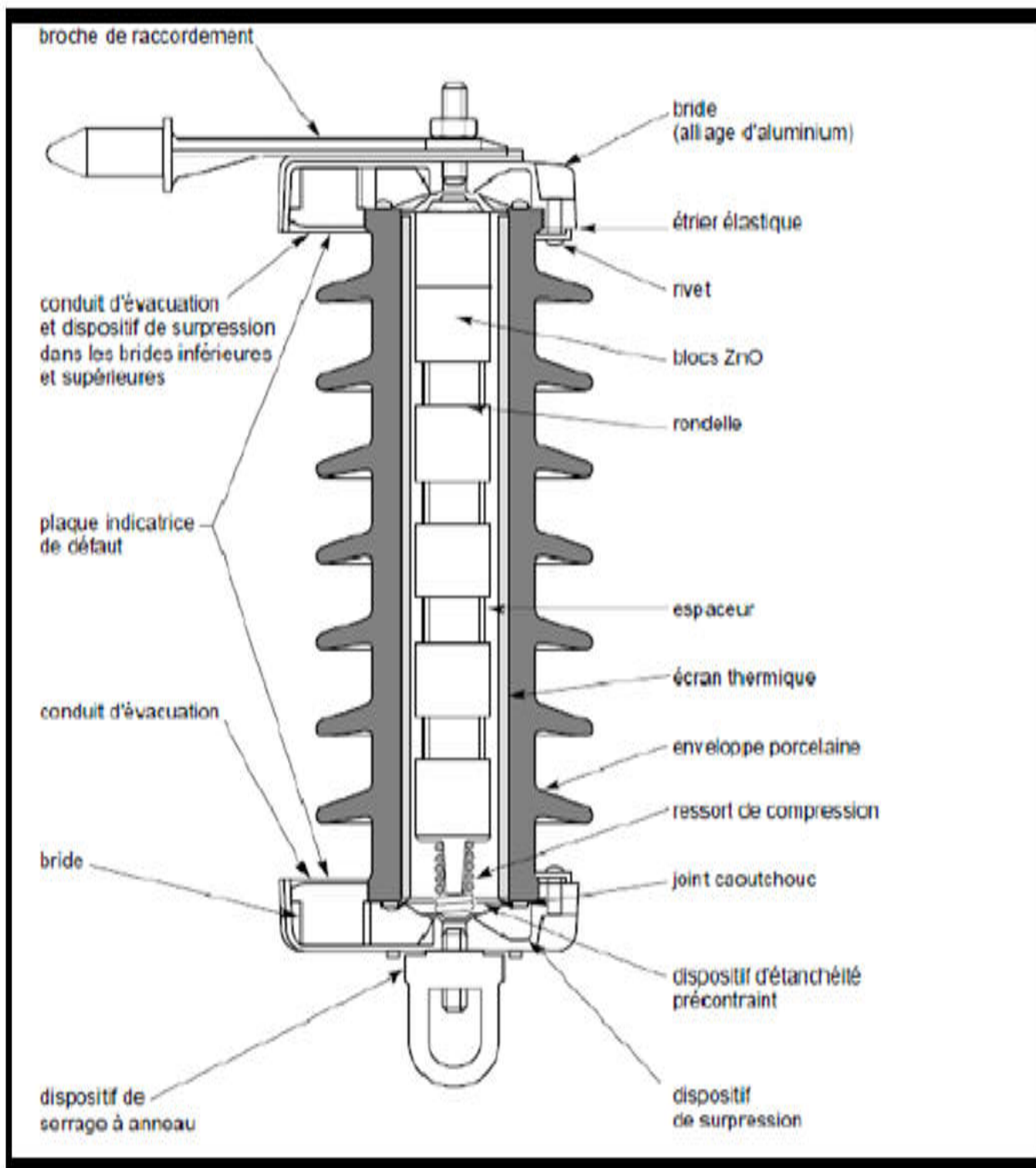


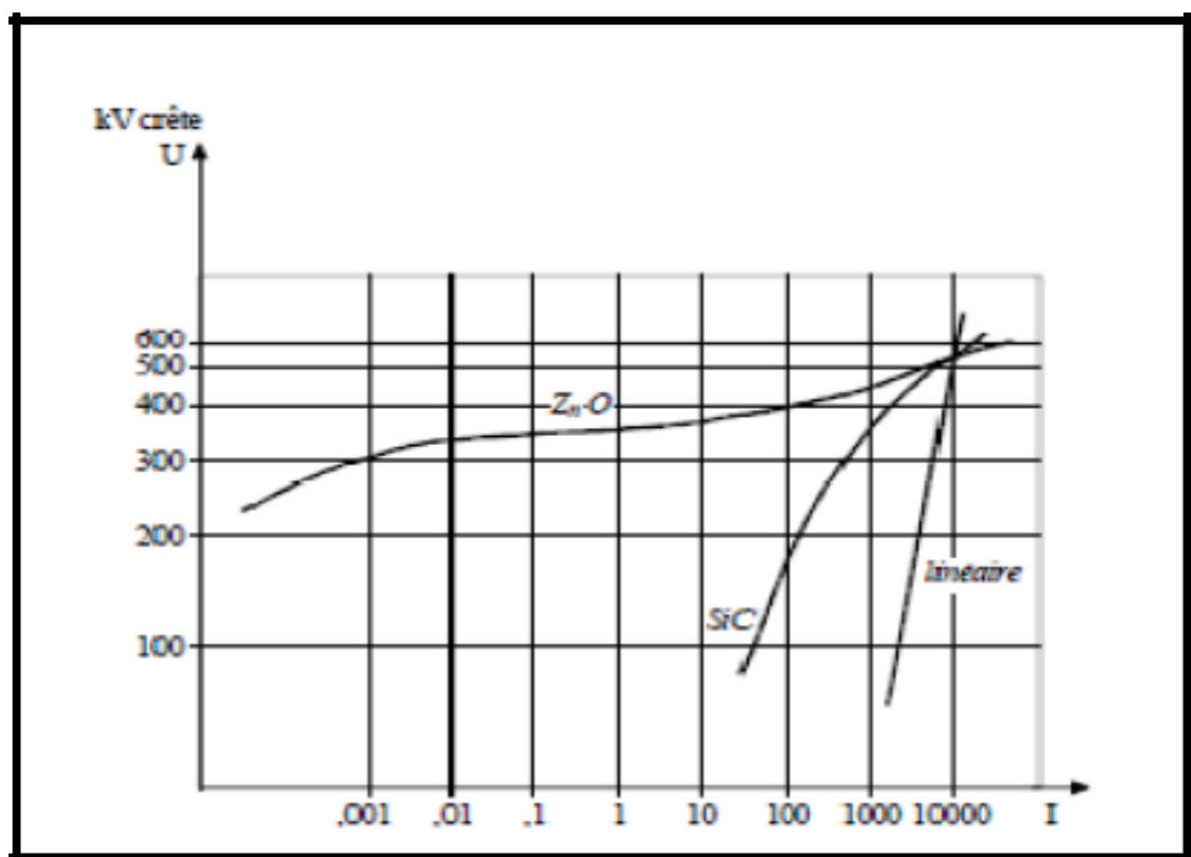
Figure II.6: Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO).

II.4.2.2 Principe de fonctionnement:

La figure II.7 montre que : La résistance passe de $1.5\text{M}\Omega$ à la tension de service (ce qui correspond à un courant de fuite inférieur à 10mA) à 15Ω pendant le décharge. [6]

Après le passage du courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre devient égale à la tension du réseau. Le courant qui traverse le parafoudre est très faible et se stabilise autour de la valeur du courant de fuite à la terre.

Le fort non linéarité du parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension (Figure II.7).



SiC: parafoudre à distance variable avec éclateur constitué varistance à carbure de silicium.

ZnO: parafoudre à oxyde de zinc.

Linéaire : courbe U proportionnelle à I .

Figure II.7 : Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection.

550kV/10kA.

II.4.3 Nouveau parafoudre:

II.4.3.1 Parafoudre à enveloppe synthétique:

Depuis le début des années quatre-vingt, un nouveau palier technologique a été franchi avec l'émergence des parafoudres à oxyde de zinc à enveloppe synthétique (Figure II.8).

L'enveloppe de porcelaine a été remplacé par une enveloppe synthétique, soit directement moulée sur la colonne de varistance, soit ménageant une couche d'air entre l'enveloppe et la colonne de varistance.

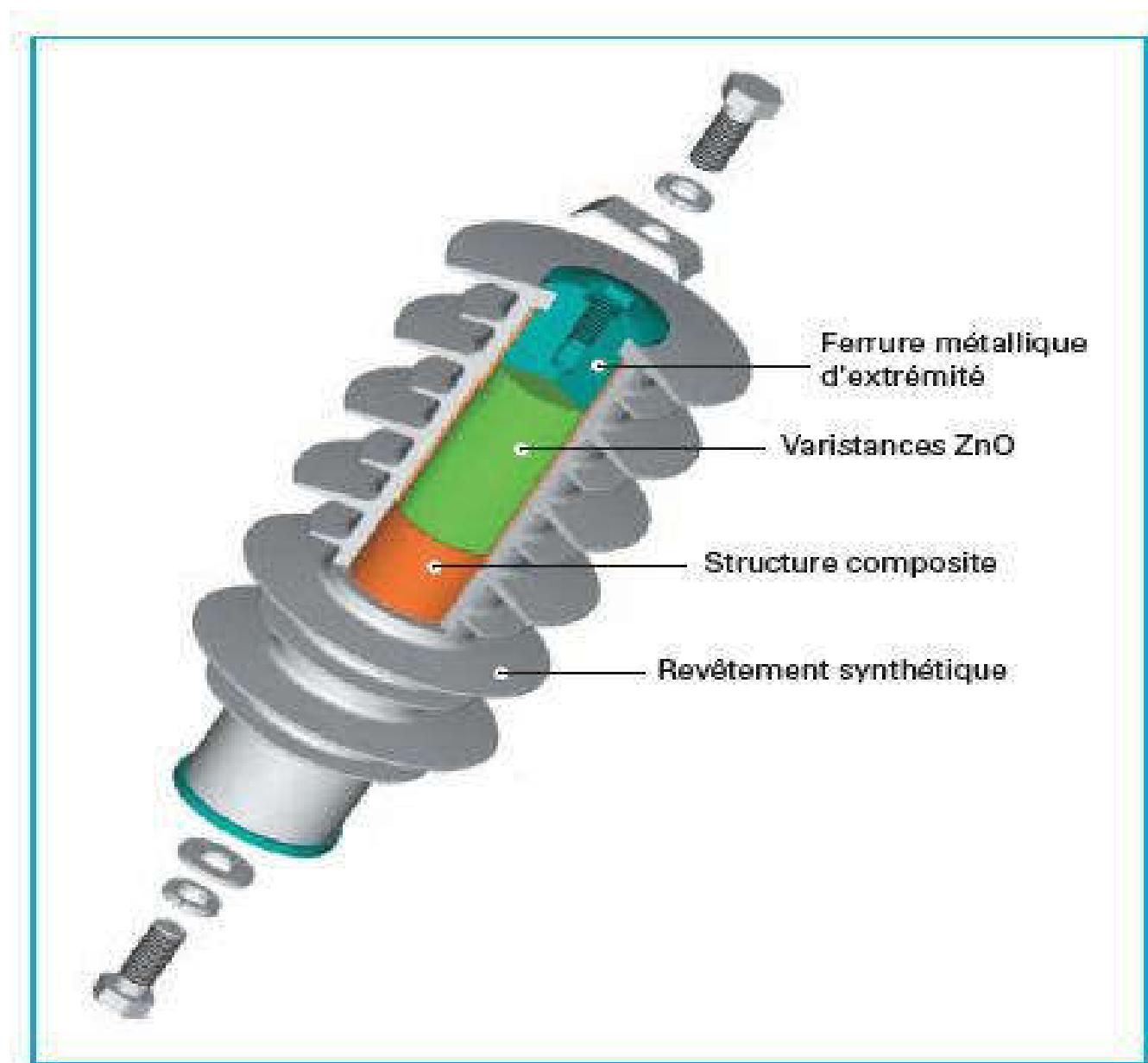


Figure II.8: Parafoudre HTA à enveloppe en matériau synthétique.

II.4.3.1.1 Les avantages:

Les avantages principaux du parafoudre à enveloppe synthétique par rapport aux parafoudres enveloppe de porcelaine sont :

- Une conception plus simple;
- Une plus grande légèreté;
- Une meilleure étanchéité;
- Un comportement plus favorable en cas de défaillance interne (court-circuit) lors de laquelle les manifestations externes (projection de débris) sont très limitées.

II.4.3.1.2 Les inconvénients:

L'enveloppe en matériau synthétique est plus sujette au vieillissement sous l'action combiné des courants de fuite, de la pollution et du rayonnement solaire.

II.5 Spécifications des parafoudres:

Les paramètres utiles pour le dimensionnement des parafoudres sont : [12]

- **Tension nominale (V_n):**

C'est la tension par laquelle le parafoudre est désigné, elle est évidemment supérieure :

- à la plus grande surtension temporaire pouvant affecter le réseau.
- à la somme des tensions de seuil des varistances empilées en série dans le parafoudre.

- **Tension maximale de régime permanent [maximum continuous operating voltage MCOV]:**

Valeur spécifiée admissible de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliquée de façon continue entre les bornes du parafoudre sans affecter son fonctionnement.

➤ **Courant nominale de décharge (Ind):**

Valeur crête du courant de décharge de forme d'onde $T1/T2 = 8/20 \mu s$ utilisé pour désigner un parafoudre, c'est le courant de décharge utilisé pour les essais de fonctionnement.

➤ **Courant de fuite (I_f):**

En régime normal, et sous la tension de service la varistance laisse un faible courant. Ce courant de l'ordre du micromètre ($10^{-6} A/cm^2$), représente le flux d'électrons qui arrivent à travers les barrières de potentiel par effet thermoïonique. Il est par conséquent tributaire de la température de la varistance .d'autre part, l'état degré de la varistance se manifeste essentiellement par une augmentation du courant de fuite et une diminution de la tension de seuil.[19]

Le courant de fuite possède deux composantes : une résistive, représentant la conduction linéaire et les pertes, et l'autre capacitive représentant l'effet de la fréquence. Plus ces composantes sont élevées, plus le courant de fuite devient important.

➤ **La tension assignée:**

C'est la tension que doit pouvoir supporter sans dommages le parafoudre pendant 10 s, après avoir subi deux chocs non consécutifs de 65 kA en onde bi-exponentielle 4/10 μs . La tension assignée est évidemment supérieure à la plus grande surtension temporaire pouvant affecter le réseau. Elle est en général supérieure à la somme des tensions de seuil des varistances empilées en série dans le parafoudre.[18]

➤ **Champ de seuil:**

Le champ de seuil de la varistance est la valeur de champ qui correspond à un courant de 1mA/cm² par convention. Le champ de seuil définit la valeur du champ à partir de laquelle on peut considérer que la varistance est en conduction.

La valeur du champ de seuil dépend de plusieurs facteurs : la taille des grains, les dimensions de la varistance et les barrières de potentiel formées aux joints de grains .Ces facteurs impliquent implicitement la formulation chimique et le traitement thermique.

La valeur du champ de seuil peut être contrôlée essentiellement par dopage avec l'oxyde d'antimoine. [20-21]

➤ **Tension résiduelle:**

La tension résiduelle du parafoudre dépend bien entendu du courant de décharge qui traverse le parafoudre et de l'impédance des varistances qui le composent (principalement la résistance des grains de ZnO). A cela s'ajoutent les chutes de tension dues aux résistances des contacts entre les varistances. Néanmoins, la tension réelle appliquée à l'élément à protéger, après écrêtage de la surtension est la somme de la tension résiduelle du parafoudre et celles générées par les impédances des liaisons du parafoudre à la terre et avec le réseau (Figure II.9)

➤ **Niveau de protection (N_p):**

Valeur crête de la tension la plus élevée admissible aux bornes du parafoudre soumis dans des conditions spécifiées, respectivement soit à des chocs de manœuvre, soit à des chocs de foudre de formes normalisées et de valeurs nominales. Elle caractérise les performances de protection du parafoudre. Elle doit être supérieure ou égale à la tension résiduelle maximale au courant nominale de décharge.

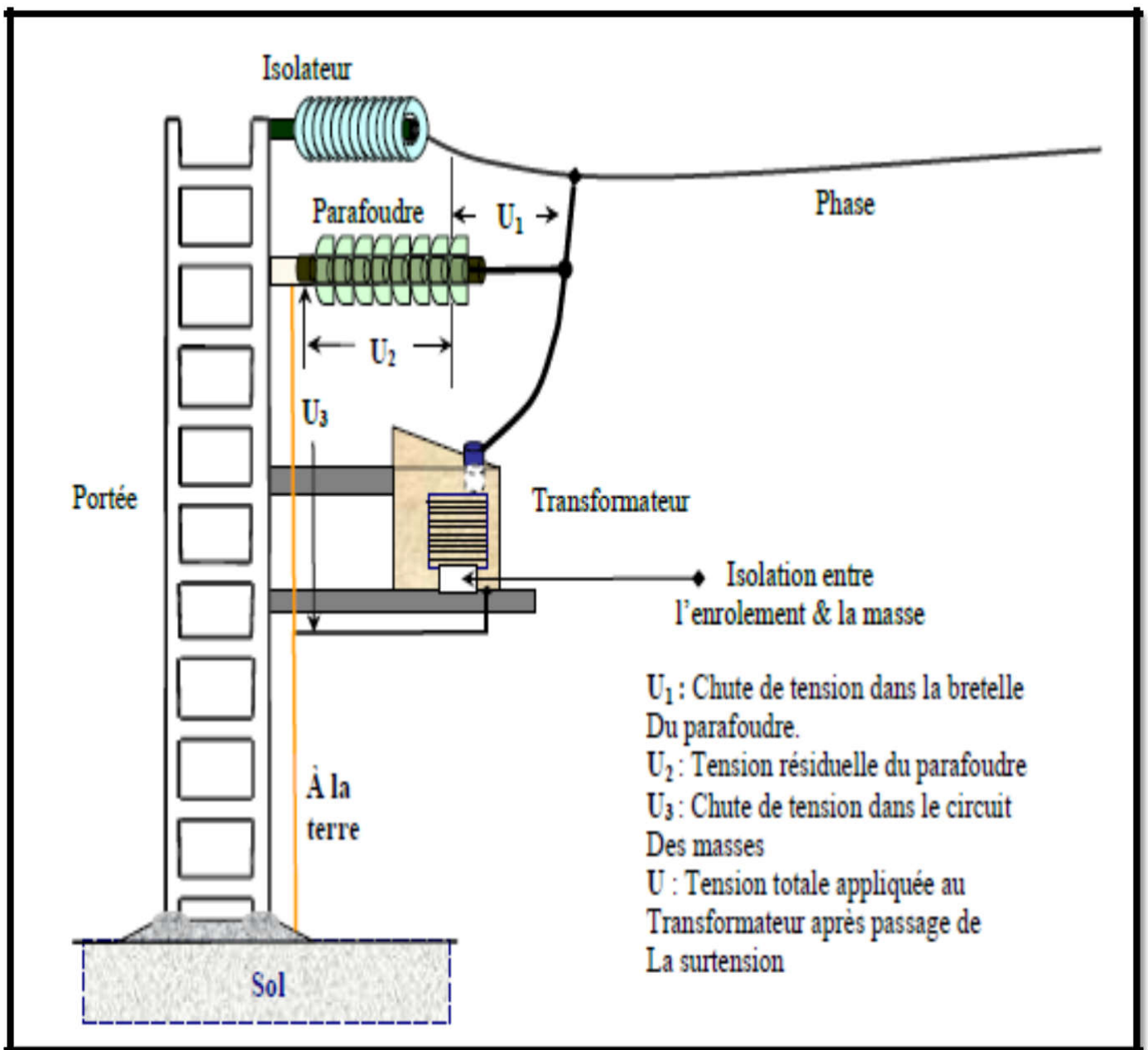


Figure II.9: Tensions appliquées à l'isolation d'un transformateur protégé par un parafoudre après écrêtage d'une surtension.

➤ Coefficient de non linéarité

La vitesse d'augmentation du courant par rapport à la tension est exprimée par le coefficient de non-linéarité α qui distingue la varistance ZnO des autres résistances non linéaire. Il est défini par la pente de la courbe $I(V)$ (région de non linéarité).

Le coefficient de non linéarité est l'un des principaux indices de qualité de la varistance, puisqu'il traduit l'effet varistance dû à la non linéarité. Pour la varistance ZnO, α est compris entre 30 et 100 selon la formulation et le processus de fabrication, mais contrairement pour les anciennes varistances SiC où le coefficient de non-linéarité α compris entre 6 et 10.

La caractéristique non linéarité de la varistance est la résultante des contributions des barrières de potentiel aux joints de grains. L'oxyde de cobalt et de manganèse avec l'oxyde de bismuth permettent l'augmentation de 10 jusqu'à 30. [22]

Le coefficient de non linéarité représente la pente de la caractéristique $I(V)$.

$$I = K.V^\alpha \quad (II.1)$$

$$\log(I) = \log(K.V^\alpha) \quad (II.2)$$

$$\log(I) = \log(K) + \alpha.\log(V) \quad (II.3)$$

Les valeurs qui sont utilisées pour la détermination de α sont : $I_1=1$ mA et $I_2=10$ mA généralement.

Où (I_1, V_1) et (I_2, V_2) coordonnées de deux points correspondent à I_1 et I_2 .

On remplace par les deux valeurs I_1 et I_2 dans l'équation on trouve :

$$\log(I_1) = \log(K) + \alpha.\log(V_1) \quad (II.4)$$

$$\log(I_2) = \log(K) + \alpha.\log(V_2) \quad (II.5)$$

On a fait la soustraction entre (II.5) et (II.4) :

$$\log(I_2) - \log(I_1) = \alpha.[\log(V_2) - \log(V_1)] \quad \Longleftrightarrow \quad \log(I_2 / I_1) = \alpha.\log(V_2 / V_1)$$

D'où :

$$\alpha = \frac{\log(I_2 / I_1)}{\log(V_2 / V_1)} \quad (II.6)$$

II.6 Paratonnerres à dispositifs d'amorçage (PDA):

Ils sont encore appelés ESE, de l'anglais « Early Streamer Emission ».

Ces dernières années ont vu l'apparition de différents dispositifs destinés à améliorer l'efficacité des paratonnerres à tige de type Franklin et, en particulier, à remplacer les dispositifs radioactifs interdits par la loi dès 1986. La France a été particulièrement impliquée dans ces recherches, mais d'autres pays comme l'Australie y ont aussi fortement contribué. Ces recherches sont désormais bien établies et validées par des essais en laboratoire, voire sur site, et correspondant d'ailleurs déjà à des produits industriels.

Pour améliorer l'efficacité d'un paratonnerre à tige, on ne peut agir que sur la décharge ascendante. Toute discussion sur l'efficacité vise donc à voir comment on peut faire démarrer cette décharge ascendante le plus tôt possible avec la meilleure vitesse initiale.

L'idée est donc de jouer sur l'effet couronne aléatoire et de le « piloter », c'est-à-dire soit d'essayer de l'organiser, soit de le renforcer en lui donnant une intensité plus importante. Autour de cette idée, deux voies sont à explorer : [5]

- **Haute tension impulsionnelle** : on applique une haute tension impulsionnelle répétitive à l'extrémité du paratonnerre, l'idée sous-jacente étant d'organiser cet effet couronne initial et de bénéficier d'un effet de mémoire laissé par les décharges précédentes (action des molécules métastables) ;
- **Étincelage au voisinage de la pointe** : on provoque l'étincelage au voisinage de la pointe afin d'assurer la présence d'électrons initiaux en corrélation avec la montée du champ électrique.

En pratique, un PDA de taille égale à une tige de Franklin conduit à une initiation plus rapide de la décharge ascendante, ce qui peut se représenter suivant certains auteurs comme un rayon de protection plus grand (**Figure II.10**) ou, pour un rayon de protection identique, par un accroissement important de la fiabilité du paratonnerre à tige.

II.6.1 Paratonnerres à tige simple:

Les paratonnerres à tige simple constitués d'une pointe simple, de deux descentes et de deux prises de terre, ces paratonnerres assurent la protection de zones plus réduites. [23]

Le schéma d'un paratonnerre à tige simple est illustré dans (**Figure II.10**):

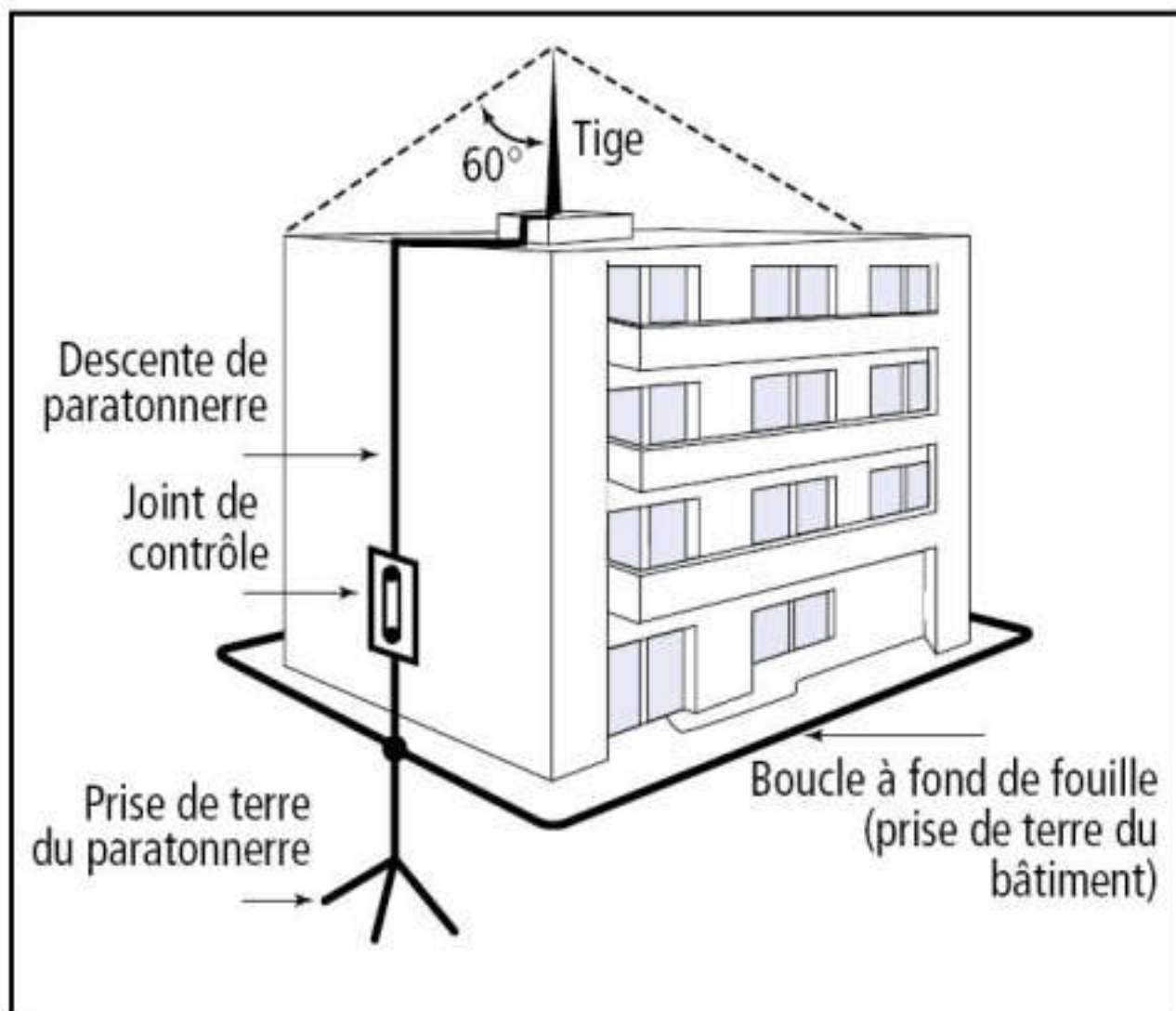


Figure II.10: Paratonnerre à tige simple.

II.6.2 Paratonnerre à cage maillée:

La cage maillée est constituée d'un réseau conducteur disposé à l'extérieur du bâtiment à protéger. Un maillage réalisé en toiture, est muni de petites pointes captrices (0.30 à 0.50 m) ; il est ensuite relié en sol par plusieurs descentes. Toutes ces descentes aboutissent à des prises de terre individuelles, reliées entre elles par une ceinture enterrée.

Il est présenté dans (Figure II.11) suivantes:

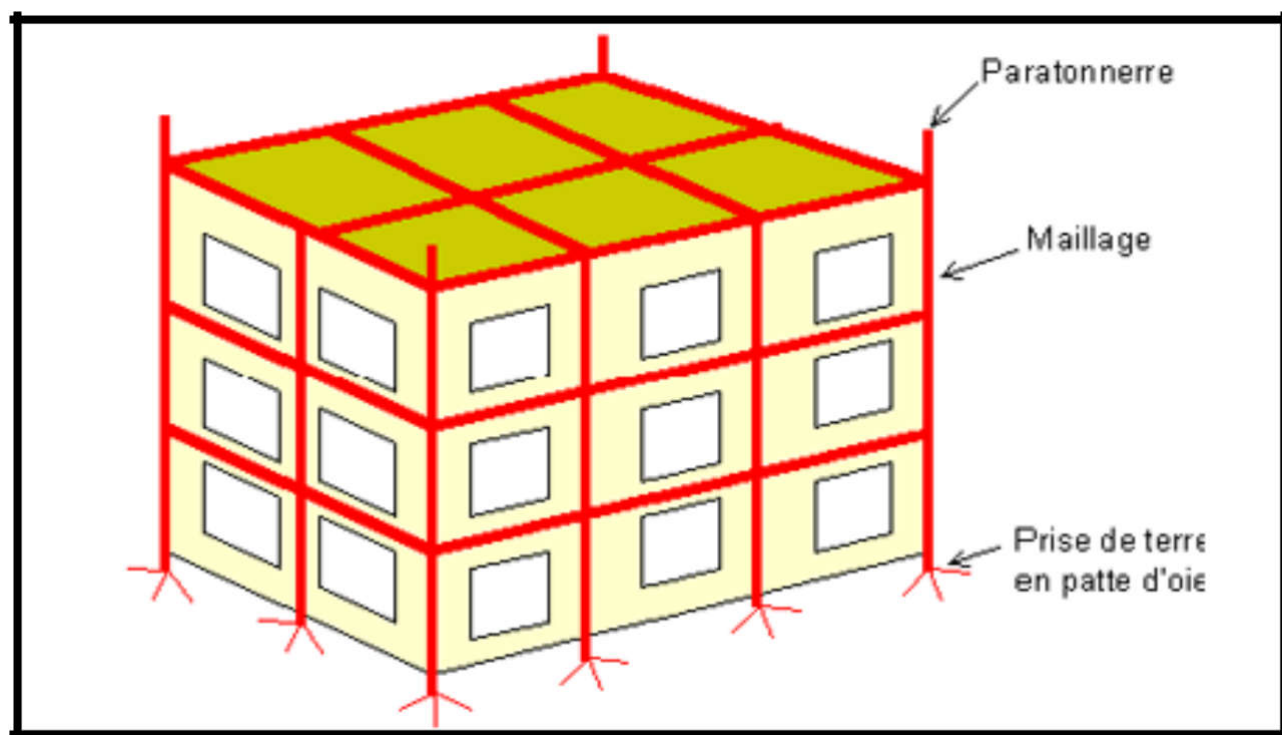


Figure II.11: Paratonnerre à cage maillée.

II.6.3 Paratonnerre à fils tendus:

Ce système de protection est parfois envisagé pour des sites à configuration particulière. Il consiste à tendre au-dessus de la zone à protéger, un réseau de fils conducteurs (Figure II.12).

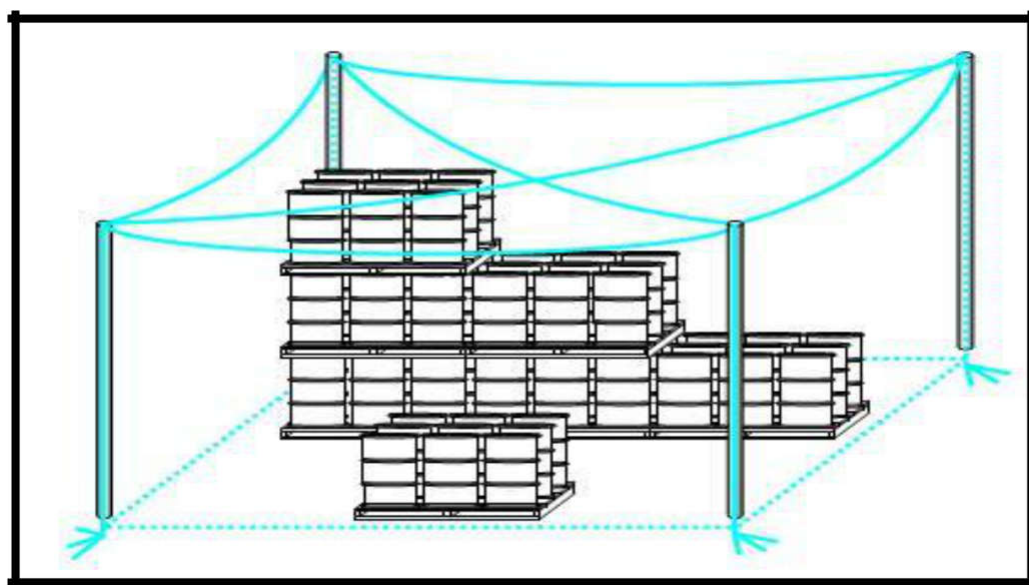


Figure II.12: Paratonnerre à fils tendus.

II.6.4 Influence des paratonnerres et des coups de foudre directs ou proches de la structure:

Quand la foudre frappe le sol en **A** à proximité de la structure (Figure II.13), le potentiel local de la terre augmente et, par couplage avec la terre de la structure, on peut générer une élévation de potentiel de celle-ci qui peut conduire à un amorçage en retour de l'installation électrique de cette structure.

Enfin, quand le choc de foudre frappe le paratonnerre ou la structure (point **B** de la Figure II.13), la terre de la structure monte en potentiel et conduit à son tour à un amorçage en retour sur le réseau BT ou au fonctionnement du parafoudre s'il est présent (ce qui est maintenant obligatoire dès que l'on installe un paratonnerre).

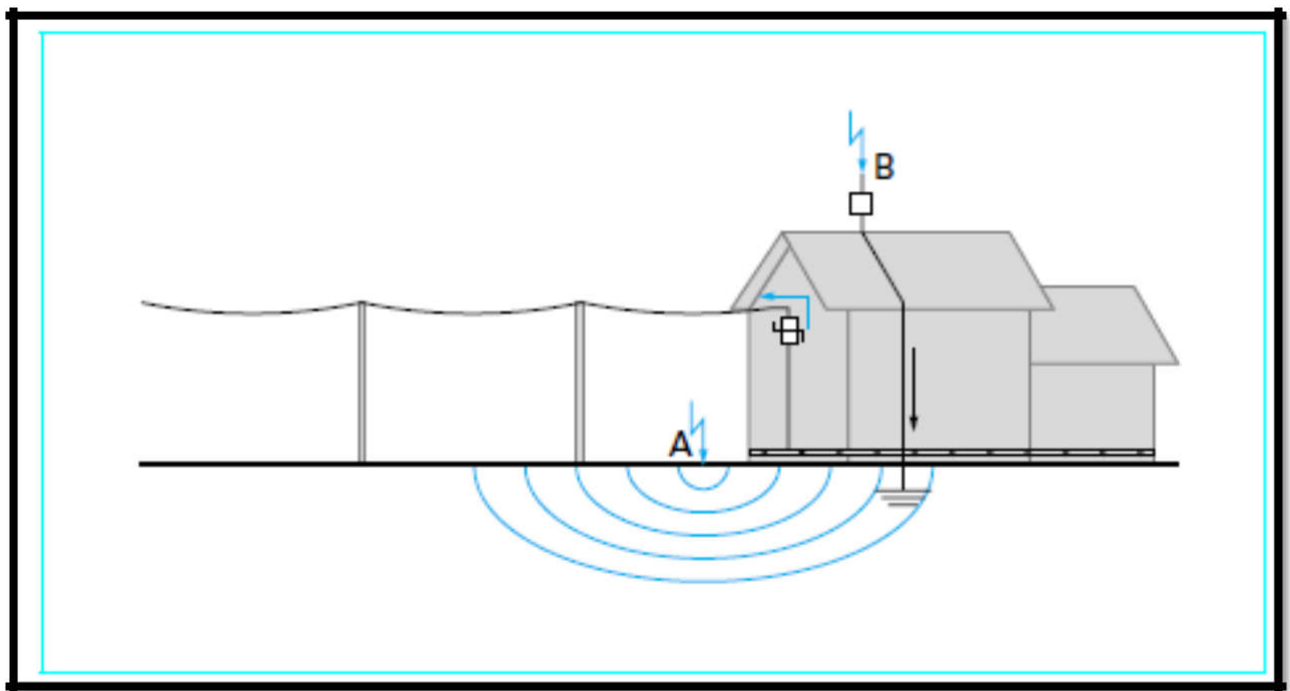


Figure II.13: Choc de foudre sur le sol ou sur le paratonnerre.

On considère que, quand un choc de foudre frappe un paratonnerre, on a en général seulement 50 % du courant de foudre qui circule dans la terre et 50 % du courant qui circule dans les autres éléments reliés à la structure (canalisations, réseau d'énergie et de télécommunication...). On estime que le réseau téléphonique ne peut drainer que 5 % du courant de foudre, compte tenu de son impédance, alors que le réseau d'énergie peut drainer jusqu'à 50 % du courant de foudre réparti équitablement entre les différents conducteurs (phase et neutre).[16]

II.6.5 Méthode de la sphère fictive:

Dans les deux cas (paratonnerres à tige simple et cages maillées), le modèle électro-géométrique permet de déterminer la zone protégée par la méthode de la «sphère fictive» : 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.[8]

Pour une bonne protection il faut que la sphère fictive roulant sur le sol, atteigne un dispositif de protection sans toucher les objets à protéger (Figure II.14).

Ainsi pour une protection contre un courant de foudre très faible, 2 kA environ (probabilité cumulée 100 %), la distance d'amorçage critique est de 15 m. Si une probabilité de 97 % est acceptable, le courant de foudre correspondant est alors de 5 kA et la distance critique de 27 m.

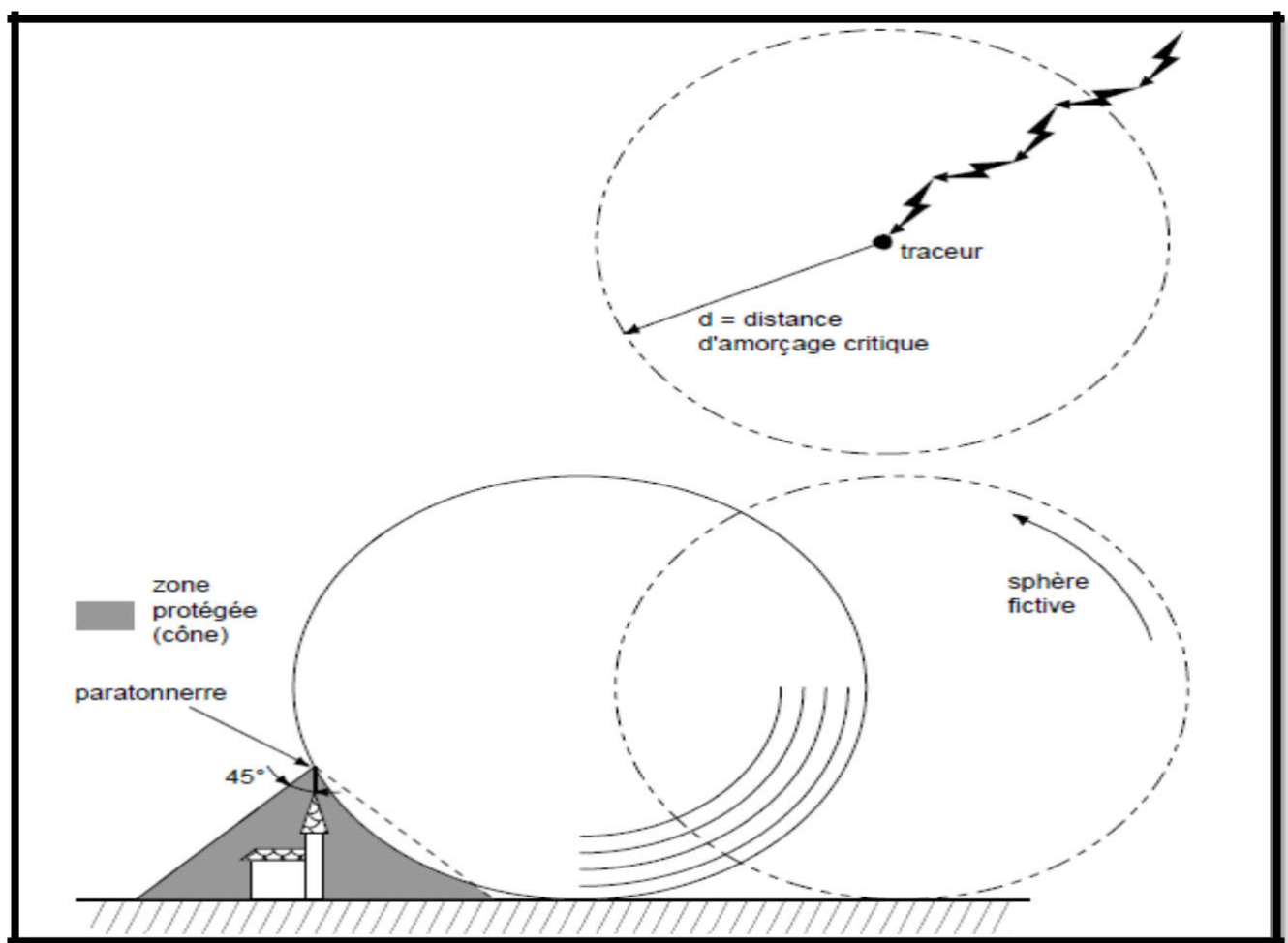


Figure II.14:détermination d'une zone protégée par la méthode de la «sphère fictive».

II.7 Prise de terre:

La prise de terre est une pièce conductrice enterrée ou ensemble de pièces conductrices voisines et interconnectées permettant d'établir une liaison électrique directe avec le sol.

La prise de terre dans les réseaux de distribution a pour but d'éviter l'apparition localement ou à distance, de différences de potentiel dangereuses pour les êtres vivants et les installations électriques.

Pour qu'une prise de terre joue son rôle, il est nécessaire que sa résistance soit suffisamment faible.

[24]

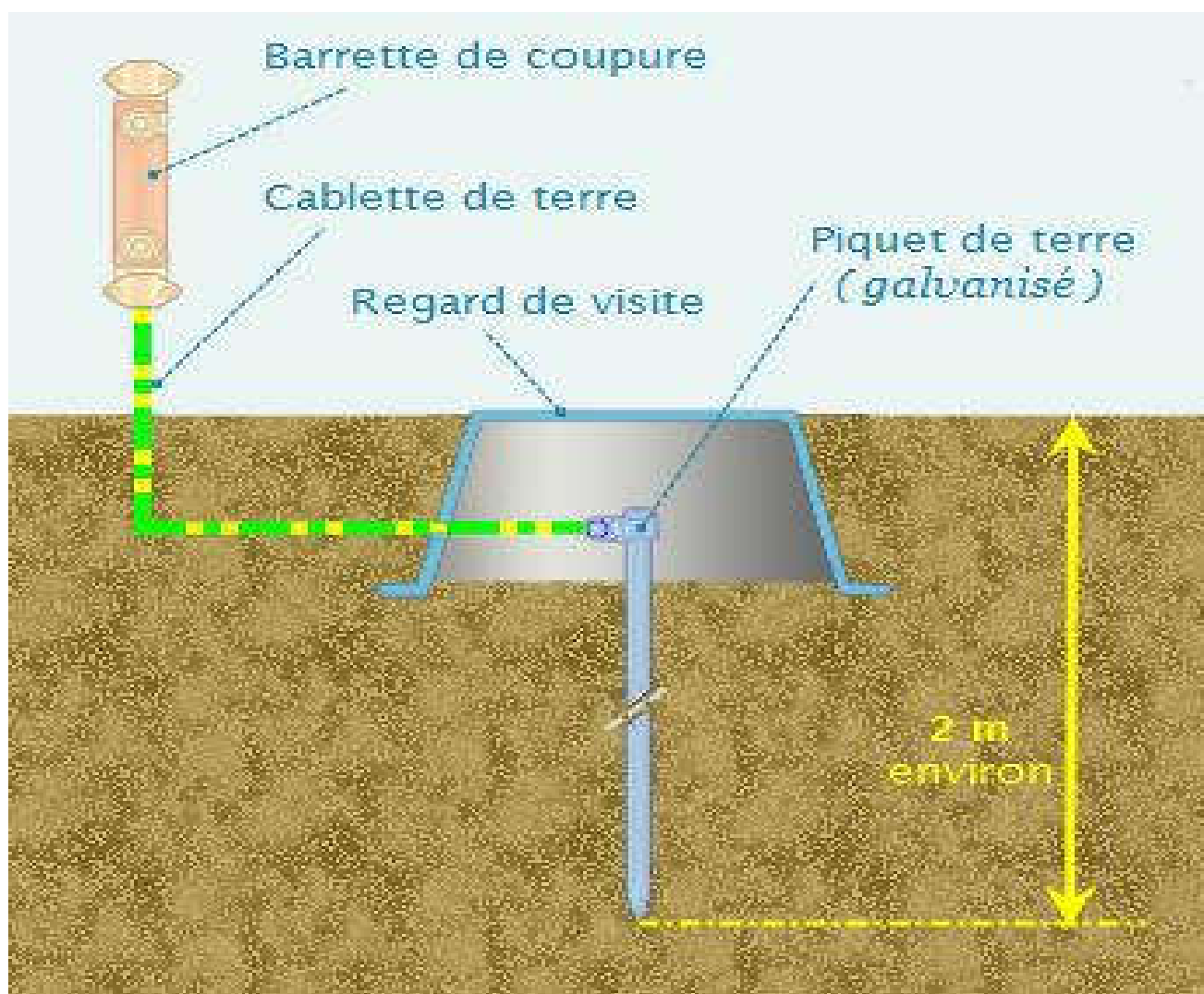


Figure II.15: Schéma d'installation d'une prise de terre.

II.7.1 Nature de la résistance d'une prise de terre:

La résistance d'une prise de terre dépend de:[24]

- La résistance de contact de l'électrode avec le sol.
- La résistance du sol entourant immédiatement l'électrode, elle-même fonction de :
 - Forme de l'électrode.
 - Dimension de l'électrode.
 - Nature du terrain et de sol étant (hygrométrie >20%).

La résistivité des sols varie entre 1 à 3000 $\Omega.m$; et la résistivité des couches superficielles du terrain est influencée par le gel, la sécheresse et l'humidité jusqu'à 1 à 2m de profondeur :

- De 1 à 2 Ω pour des profondeurs de 2m.
- De 1 à 5 Ω pour des profondeurs de 1m.

II.7.2 Résistivité du terrain:

Nature de terrain	Résistance de terrain « $\Omega.m$ »
Terrains marécageux	1 à 30
Limon et tourbe humide	5 à 150
Argile	40 à 60
Schistes	50 à 300
Calcaire tendre	100 à 300
Granites et grès	100 à 1000
Sable compact ou fissuré	200 à 3000
Calcaire compact ou fissuré	500 à 5000
Sol pierreux nu	1500 à 3000

Tableau II.1 : La résistivité du terrain.

II.7.3 La nature de la résistance :

La nature	Détermination
Conducteur enfoui	$R = \frac{2\rho}{L}$
Piquet vertical	$R = \frac{\rho}{L}$
Boucle a fond de fouille	$R = \frac{2\rho}{L}$
Cylindre métallique	$R = \frac{0.366\rho}{L \log \frac{3L}{d}}$

Tableau II.2 : Détermination de la résistance d'une prise de terre.

II.7.4 Les valeurs de la résistance de terre:[24]

Appareils à mettre à la terre	Valeur de la résistance de terre
Terre des masses pour poste d'abonnés alimenté en souterrain	$R \leq 1\Omega$ Terres reliées $R \leq 3\Omega$ Terres séparées $R \leq 10\Omega$ Terres à isolation renforcé
Terre des masses pour poste d'abonnés alimenté en aérien	$R \leq 1\Omega$ Terres reliées $R \leq 3\Omega$ Terres séparées $R \leq 10\Omega$ Terres à isolation renforcé
Terre pour habitations $I_{\Delta n} = 650 \text{ mA}$	$R \leq 37\Omega$
Terre pour habitations $I_{\Delta n} = 500 \text{ mA}$	$R \leq 48\Omega$
Terre pour habitations $I_{\Delta n} = 300 \text{ mA}$	$R \leq 80\Omega$
Terre pour appareils médicaux	$R \leq 10\Omega$

Tableau II.3 : les différentes valeurs des résistances de terre.

II.8 Conclusion:

Dans ce chapitre on a étudié les niveaux de protection contre les risques de foudres.

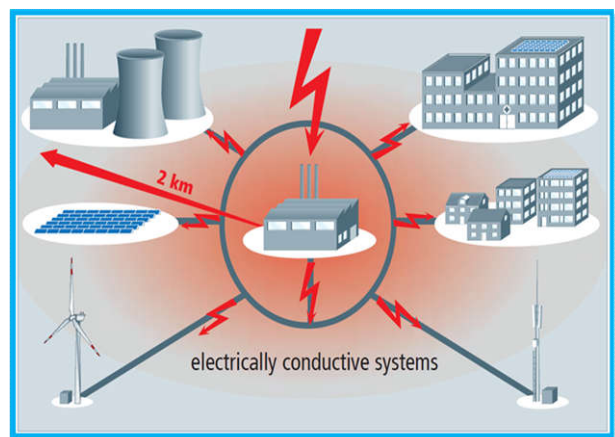
Les deux premiers niveaux de protections sont constitués des moyens suivants :

- Paratonnerres ;
- Cages maillées ;
- Fils tendus ;
- Eclateurs ;
- Parafoudres.

Le troisième niveau de protection est dessiné pour les basses tensions. Après une étude comparative entre ces différents moyens de protection contre les effets de foudre, on a conclu que la protection fiable et efficace des réseaux électriques à haute et très haute tension consiste à utiliser les parafoudres à oxyde de zinc et sans éclateurs.

Chapitre III

Choix des moyens de protection contre la foudre



III.1 Introduction:

En cas de choc de foudre, du fait des phénomènes de propagation, deux points d'un même conducteur peuvent ne pas être au même potentiel. Il est donc illusoire d'imaginer une protection globale d'un réseau électrique, en installant quelques dispositifs anti-foudres tel que parafoudres, éclateurs, câbles de garde et paratonnerres ainsi que les cages maillés en certains nœuds du réseau.

La protection offerte par ces anti-foudres est très locale. Ainsi, il ne suffit pas de connaître les paramètres de ces dispositifs pour connaître la surtension effectivement appliquée au matériel à protéger.

III.2 Implantation des paratonnerres au niveau des pylône eNode B

III.2.1 Provenance Des Matériaux– Echantillon.

III.2.1.1 Provenance des matériaux

Tous les matériaux nécessaires à l'exécution des travaux doivent être conformes à la réglementation et normes techniques en vigueur et devront provenir de carrières ou d'usines. Ils doivent recevoir l'accord du contractant avant leurs utilisations.

L'accord devra être demandé par le partenaire cocontractant en temps utile et la demande, sera appuyée de procès-verbaux des essais, des échantillons, référence justifiant que la qualité des matériaux.

III.2.1.2. Échantillon

Le partenaire cocontractant est tenu de soumettre à l'approbation du bureau d'études chargé du suivi des travaux et le contractant des échantillons de chaque matériau qu'il compte utiliser.

Les échantillons, une fois acceptés, seront conservés par le bureau d'études chargé du suivi des travaux (matériau thèque) et serviront de témoin pour la réception des travaux de même nature au cours de la réalisation.

III.2.1.3. Qualité

Tous les matériaux et produits entrant dans l'exécution de l'ouvrage seront approuvés par le bureau d'études chargé du suivi des travaux et contractant. Ils ne devront en aucun cas présenter des défauts susceptibles de compromettre la bonne exécution des ouvrages.

III.2.2 Fondation Pylône

Il s'agit des travaux nécessaires à la réalisation de la fondation pour pylônes. Tous les travaux et calcul doivent être réalisés dans le respect des normes en vigueur en Algérie et des recommandations d'Algérie Télécom.(voir plan de fondation).

La réalisation des fondations du pylône doit se faire suivant les plans fournis par le fournisseur des pylônes et en fonction du rapport du sol.

Les travaux de génie concernant les massifs tiendront compte des précisions suivantes :

- ✓ Une étude de sol doit être réalisée par un organisme agréé afin de dimensionner les fondations de tous les ouvrages (pylône, dalle groupe, clôture, local technique.
- ✓ Le sous-traitant devra fournir à Algérie Télécom les comptes rendus d'étude de sol ainsi que le type de fondation approprié déjà communiqué par le fournisseur du pylône et validé lors de l'offre technique ;

- ✓ La note de calcul spécifiant les coefficients de sécurité et justifiant la solution préconisée sera impérativement fournie à Algérie Télécom sur l'APD ;
- ✓ Le dimensionnement des fondations se fera suivant le maximum du chargement défini dans la note de calcul déjà communiqué par le Fournisseur du pylône et validé lors de l'offre technique ;
- ✓ La surface du massif sera lissée afin d'éviter la présence d'eau stagnante, le dessus aura une pente de 2 à 3% (pointe diamant) ;
- ✓ Le génie civil des massifs d'ancrage et de l'embase se fera intégralement en béton armé ;
- ✓ La mise en œuvre des différents procédés de réalisation des fondations devra être conforme aux normes en vigueur, notamment celle citées dans le CDC fourniture pylônes.

Le type de ciment à utiliser sera déterminé selon la nature de l'environnement.

Pour assurer une bonne qualité des travaux, il est nécessaire de réceptionner successivement, le fond de fouille, le coffrage et le ferrailage de la fondation du pylône avant le coulage du béton.

III.2.3. Plate Forme Pour Pylône

La plate-forme sera réalisée en treillis soudé, la surface de la plate-forme doit présenter une pente minimum pour permettre l'évacuation des eaux.

III.2.4. Socle Pour Echelle Pylône

Il faut prévoir un massif en béton armé pour la fixation de l'échelle à sa base, qui doit être ancré sur la surface de la plate-forme.

Image 1 : Pylône



Image 2 : raccordement énergie au niveau d'équipement

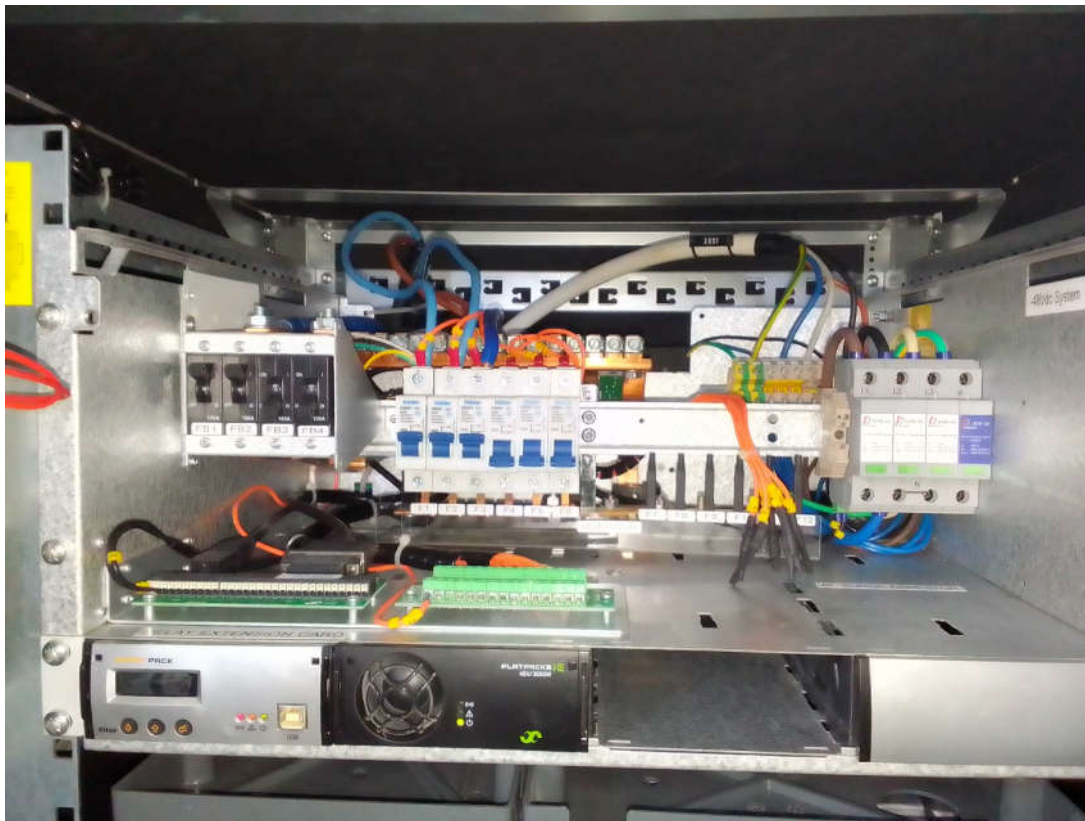


Image 3 : Batteries



Figure 4 : Mise à la terre

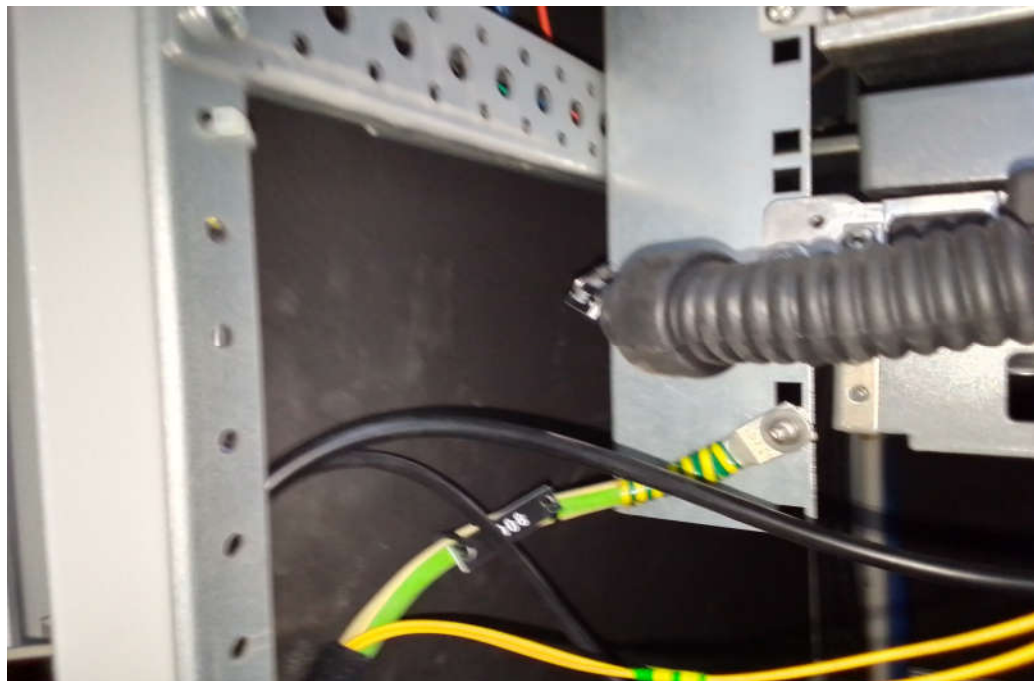


Image 5 : fil de paratonnerre



Image 6 : Mise à la terre



Image 7 : Mise à la terre (autre exemple)



Figure 7 : Mise à la terre d'un pylône de réseaux mobile



III.3 Choix des parafoudres:

Trois caractéristiques sont à prendre en compte dans le choix d'un parafoudre :

III.3.1 La valeur de MCOV en kV (supérieure à la tension de service):

La tension maximum en service continu (Maximum Continuous Operating Voltage : MCOV) fournie par le constructeur assure que la puissance est maintenue dans les limites de conception et qu'il n'y a pas d'emballement thermique entraînant des dommages permanents au parafoudre.

La MCOV d'un parafoudre doit être supérieure (ou égale) à la tension de service du réseau considéré. Elle peut être nettement supérieure tant que le niveau de tension de protection fourni reste acceptable pour l'installation. Le choix d'un parafoudre doit être fait en considérant la tension entre les conducteurs et la terre (tension phase-neutre), alors qu'en général la tension de service du réseau est exprimée en tension composée (phase-phase).

III.3.2 Le niveau de protection fourni :

L'efficacité de la protection d'un parafoudre est mesurée par la tension résiduelle, aux bornes du parafoudre, pendant qu'un courant donné le parcourt. Typiquement, le niveau de protection est défini par un couple de valeurs (par exemple 80 kV/10 kA).

La valeur de la tension qui peut être atteinte durant un coup de foudre doit être suffisamment faible pour conserver une marge de sécurité par rapport à la tension de tenue du matériel. La marge doit être d'au moins 20 % et doit tenir compte du mode d'installation et de câblage des parafoudres.

Un câblage inefficace peut entraîner des tensions notablement plus élevées aux bornes du matériel que la seule tension résiduelle du parafoudre, du fait des chutes de tension dans les impédances parasites.

Un compromis doit être trouvé entre une MCOV plus haute et un niveau de protection néanmoins satisfaisant.

III.3.3 La tenue thermique:

Elle vise à garantir la non-destruction du parafoudre en cas de choc long (supérieur au choc d'essai normalisé). Cette performance sera exprimée par une tenue à un choc de courant.

III.3.4 Exemple de 3 caractéristiques nécessaires aux choix d'un parafoudre (extrait d'une spécification de distributeur d'énergie):

- MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) = 15 kV
- Niveau de protection 75 kV/5 Ka

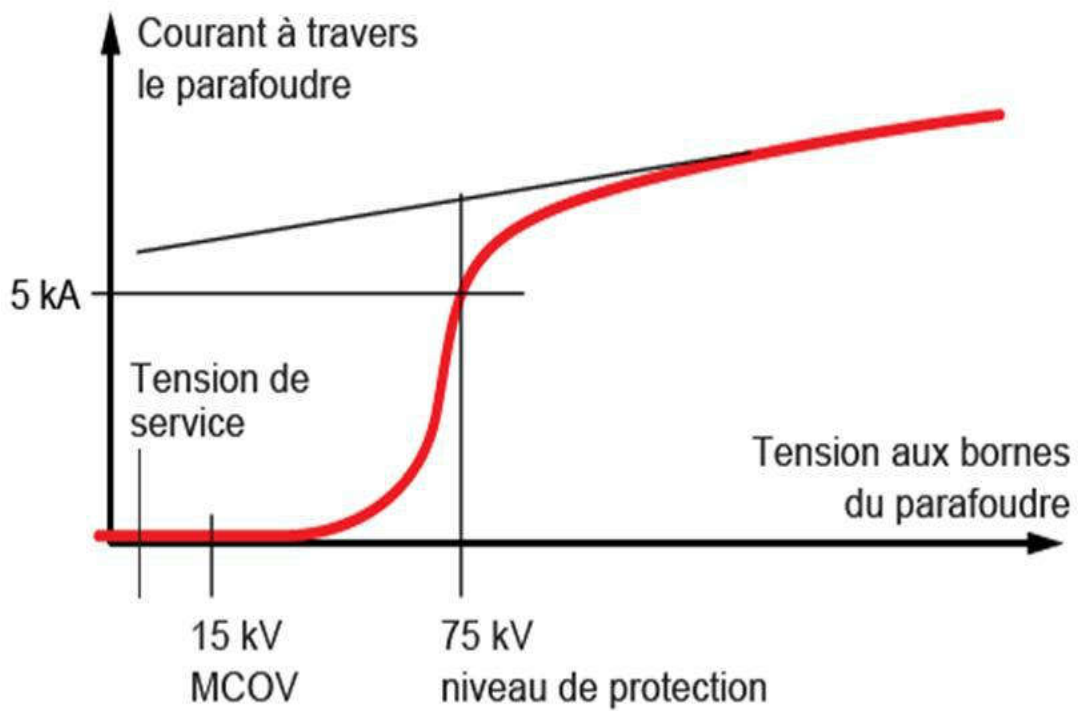


Figure III.1: Ecoulement du courant de foudre vers la terre.

- Tenue choc 65 kA (8/20 μ s) pour couvrir le cas d'un choc 5 kA de 200 μ s



Figure III.2: courant de choc de foudre en fonction de temps.

III.4 Les régimes de neutre:

Les régimes de neutre expriment la position du conducteur de protection par rapport au fil de Neutre.

Les appareils installés doivent garantir la protection des personnes et celle des biens.

Il existe 4 régimes de neutre qui se distinguent par [25] :

- la situation du neutre par rapport à la terre.
- la situation des masses par rapport à la terre ou au neutre.

III.4.1 Les différents types de régime de neutre :

Régime de neutre	Situation de neutre	Situation des masses	Caractéristiques générales
TT	Neutre reliée à la terre	Masses reliées à une Prise de terre	Les masses des appareils sont reliées à la terre. Il n'y a pas de conducteur entre la terre locale et le neutre du transformateur également relié à la terre
TNS	Neutre reliée à la terre	Masses reliées au Conducteur de protection	Le régime TNS, d'origine allemande, utilise un câble de protection entre la terre locale et la terre du neutre du transformateur. En cas de défaut, il y a établissement d'un court-circuit et ce sont les protections magnétiques des disjoncteurs qui assurent l'ouverture du circuit en défaut. Neutre et PE sont séparés.
TNC	Neutre reliée à la terre	Masses reliées au Neutre	Neutre et terre sont confondus. L'a encore un défaut entraîne un court-circuit qui est éliminé par les protections magnétiques. Il est interdit dans le résidentiel et dans les industries avec risques d'explosions
IT	Neutre reliée à la terre	Masses reliées à une prise de terre	Le neutre isolé ou autorise la continuité de fonctionnement avec un premier défaut.

Tableau III.1: Les différents régimes de neutre.

III.4.2 Schémas d'installation:[25]

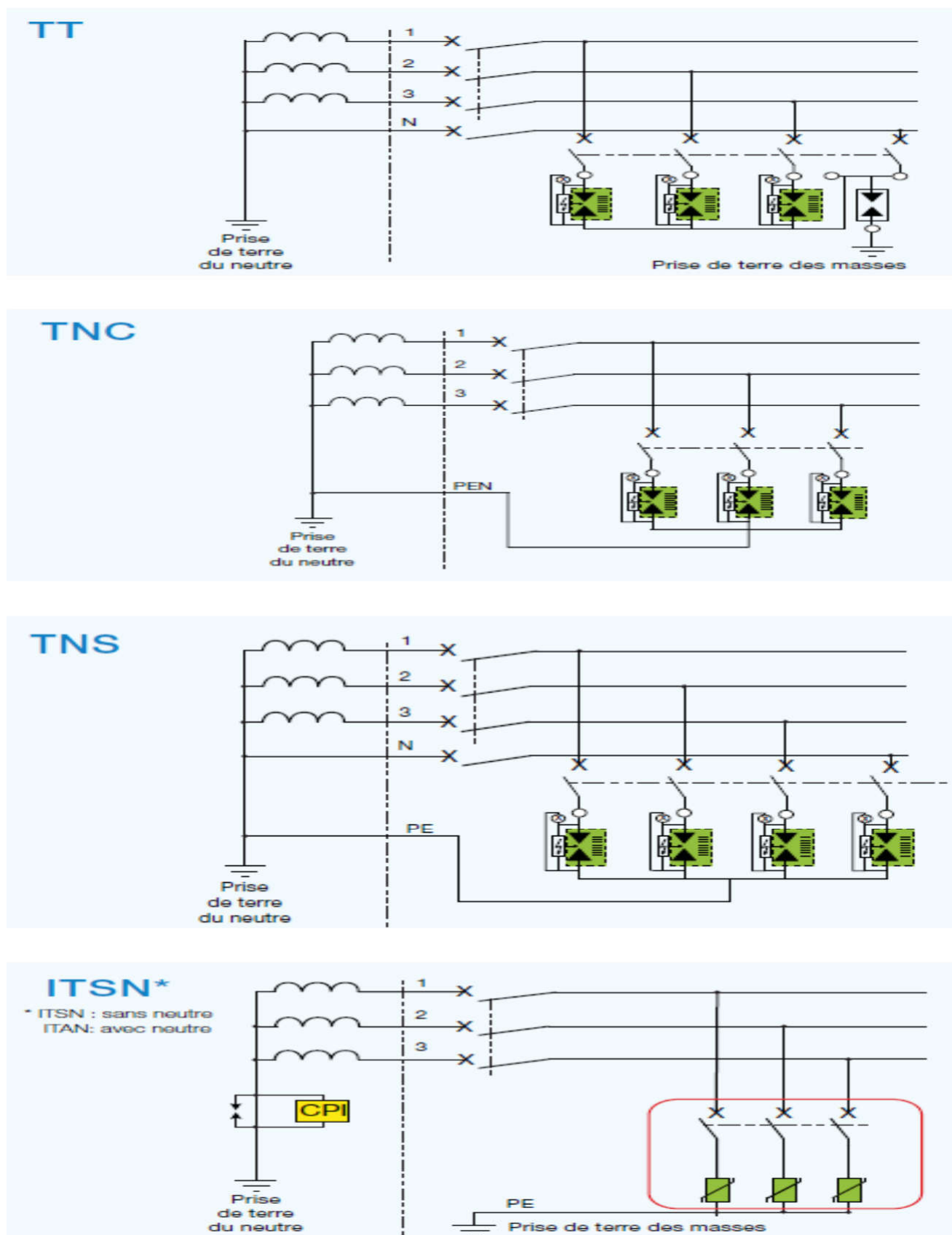


Figure III.3: schéma explicatif des régimes de neutre.

III.5 Les différents types de parafoudres:

Il existe trois types de parafoudres :

- type 1 : parafoudres à très forte capacité d'écoulement
- type 2 : parafoudres à forte capacité d'écoulement
- type 3 : parafoudres à faible capacité d'écoulement.

Les parafoudres de type 1 sont utilisés lorsque le bâtiment est équipé d'un paratonnerre. Situé en tête d'installation, il permet d'absorber une quantité d'énergie très importante. Pour une protection plus efficace des récepteurs, il doit être associé à un parafoudre de type 2 pour absorber les surtensions résiduelles.

Les parafoudres de type 3 assurent la protection "fi ne" des équipements les plus sensibles au plus près des récepteurs.[26]

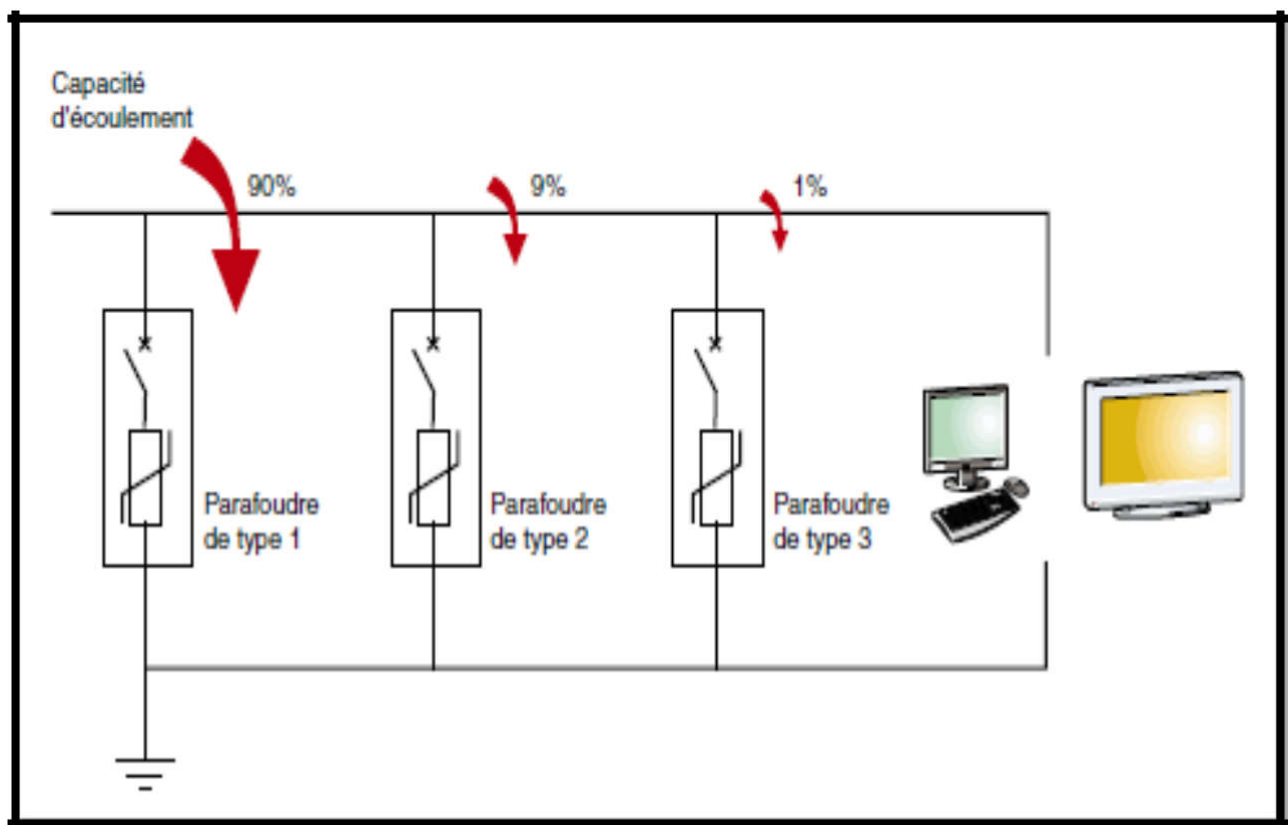


Figure III.4: schéma des différents types de parafoudre.

III.6 Comment et où installer les parafoudres?

Le circuit équivalent au point de raccordement du parafoudre est représenté par le schéma ci-dessous.

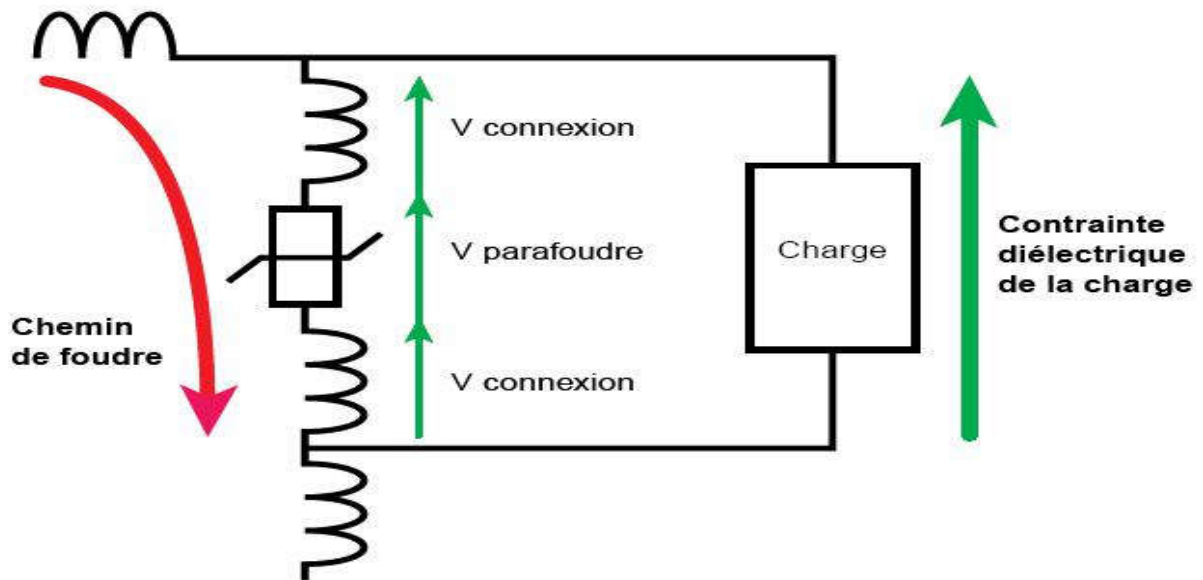


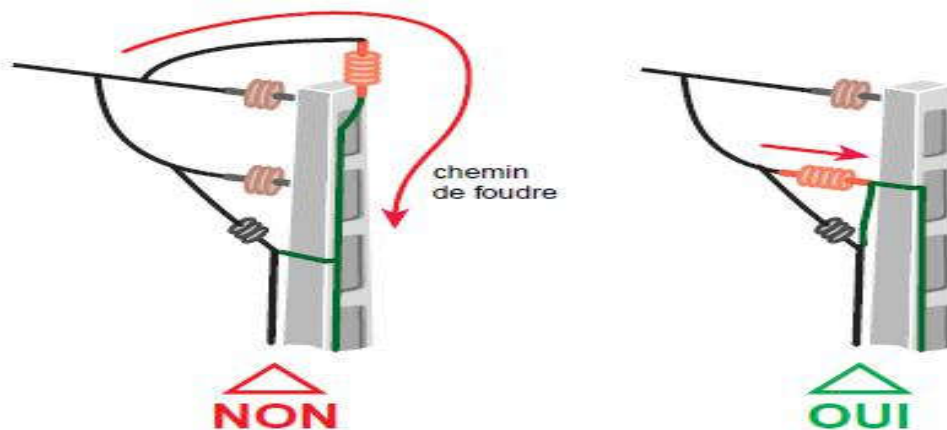
Figure III.5: circuit équivalent de raccordement de parafoudre.

Le courant de foudre s'écoule à la terre par le circuit du parafoudre. La tension aux bornes de la charge est la somme des tensions de connexion et de la tension du parafoudre.[28]

III.7 Règles d'installation des parafoudres:

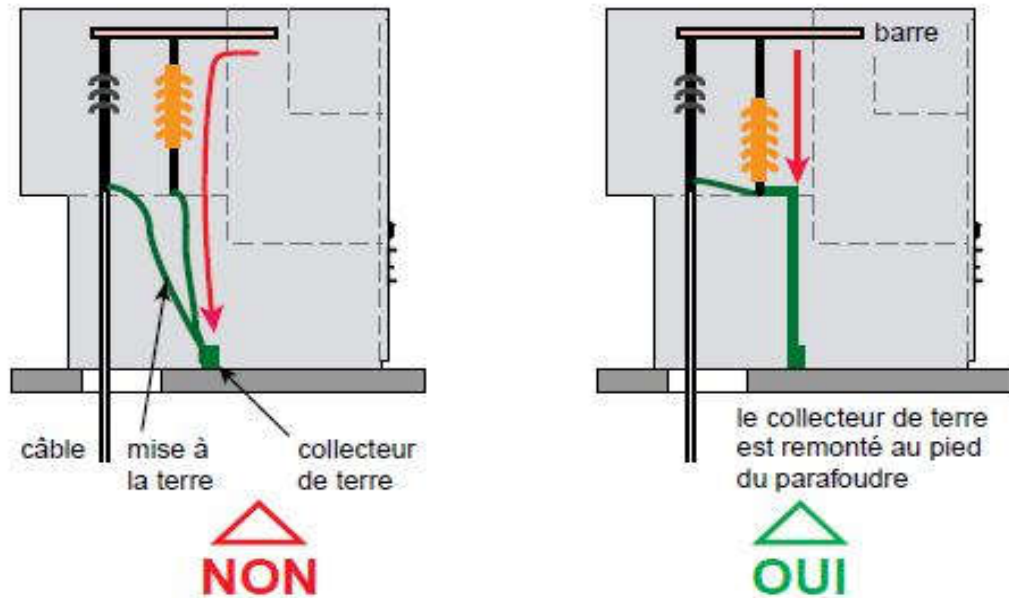
Il y a deux principes d'installation:[26]

1. réduire au maximum les tensions de connexion en réduisant le chemin que va suivre la foudre.



2. connecter la charge directement aux bornes du parafoudre.

Comme les parafoudres fixent la tension à leurs propres bornes, la tension aux bornes de la charge est donc la tension du parafoudre.



Le parafoudre doit être installé au voisinage immédiat des points critiques du réseau :

- jonction aéro-souterraine ;
- bornes de transformateurs ;
- entrées de postes....

Du fait de la vitesse du phénomène, le parafoudre doit être au plus près de la zone à protéger. En moyenne tension, la distance maximale est de l'ordre de 25 mètres.

III.8 Niveau Kéraunique (NK) au nord d'Algérie:

Le nombre de jours orageux par année, où on entend le tonnerre au nord d'ALGÉRIE est égal à 20. Alors pour la région d'El oued $NK = 20$ (jours orageux/année). [4]

III.9 Densité de coup de foudre au sol (N_s):

Elle est égale à :

$$N_s = NK/7 = 20/7 = 2,86.$$

$$N_s = 2,86 \text{ (} 1\text{Km}^2 \text{ année)}.$$

III.10 Nombres de coup de foudres (NL) touchant la ligne :

Ce nombre est calculé selon la formule empirique suivante :

$$NL = N\sqrt{hp/1m} / 400 \text{ Km ; (coups/année km)}$$

III.10.1 La ligne entre Beni saf (ATE) et Ain Temouchent (poste THT):

$$NL = NK\sqrt{24/1m} / 400 \text{ Km} = 0.245 \text{ (coups/année km)}$$

$$= 18.83 \text{ (coups/année km)}$$

III.11 Paramètres de choix des parafoudres:

On peut choisir un parafoudre selon les paramètres suivants :[27]

III.11.1 Tension maximale de régime permanent « U_c »:

C'est la valeur spécifiée admissible de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliqué de façon continue entre les bornes du parafoudre sans affecte son fonctionnement. La valeur de est fonction du régime de neutre du réseau.

➤ Pour les réseaux IT, $U_c \geq 1.732 U_0$

➤ Pour les réseaux TT et TN, $U_c \geq 1.5 U_0$

Avec U_0 ; tension simple du réseau en (volts).

Alors :

➤ Pour $V = 400.000$; on a $U_c \geq 1,1.400000/\sqrt{3} \geq 254335.26 \text{ V}$

Donc pour un réseau de **400 KV** on prend $U_c = (718 \text{ à } 914) \text{ KV}$

III.11.2 Courant de court-circuit admissible « I_{cc} »:

C'est la valeur maximale du courant de court-circuit externe admissible définie par le constructeur, qui peut traverser le parafoudre lors d'un défaut sur la charge entre les bornes d'entrée et de sortie.[27]

Le parafoudre et son dispositif de protection contre les courts circuits doivent choisis de telle façon que le courant de court-circuit admissible I_{cc} soit supérieur au courant de défaut 50Hz au droit du parafoudre.

Pour un réseau de **220 KV** ; $I_{cc} = 25000 \text{ KV}$, pour le réseau de **400 KV**; I_{cc} on a $I_{cc} = 32000 \text{ KV}$.

III.11.3 Niveau de protection « U_p »:

Le niveau de protection U_p est la tension aux bornes du parafoudre lors du passage du courant maximal I_{max} . Le niveau de protection U_p est un paramètre qui caractérise les performances de protection du parafoudre[27].

Alors on prend U_p pour un réseau de **220 KV**; la valeur $U_p = 475 \text{ KV}$ et pour un réseau de **400 KV**, la valeur $U_p = 850 \text{ KV}$.

III.12 Modélisation et simulation d'un Parafoudre:

- La tension de la ligne $U = 735 \text{ KV}$

La Figure III.6 illustre un système de transmission équivalent alimenté à 735 KV une charge à travers une ligne de transmission de 200 Km . La ligne est compensée en série au début et en shunt compensé à son extrémité de réception. Un défaut est appliqué aux bornes de charge. Le défaut est inhibé par l'ouverture du disjoncteur de charge. Pour des raisons de simplification, une seule phase du système de transmission est modélisée.

Le niveau du système de transmission court-circuit triphasé est 15000 MVA. La ligne est en série de 40% compensée par un condensateur (26,2 F à 60 Hz) et de shunt compensée par une inducteur de 330 MVAR (110 MVAR / en phase), à la fin de la charge.

Le condensateur série et l'inductance shunt sont tous protégés par varistances à oxyde métallique (MOV). La varistance MOV1 de condensateur de série se compose de 30 colonnes protégeant le condensateur à 2,5 fois sa tension nominale (tension nominale est obtenue pour une ligne 2000 kA courant nominal). La tension de protection correspondant (défini à 15 KA = 500 A par colonne) est de $2,5 * 26,2 * 2\text{kA} * \sqrt{2} = 185 \text{ KV}$.

L'inducteur shunt est protégé par deux colonne (MOV2), à 1,8 p.u de la tension nominale phase-sol

(424,4 KVrms). La tension de protection correspondant (défini à 1 kA ou 500A / colonne) est de

$$1,8 \cdot 424,4 \cdot \sqrt{2} = 1080 \text{ KV}$$

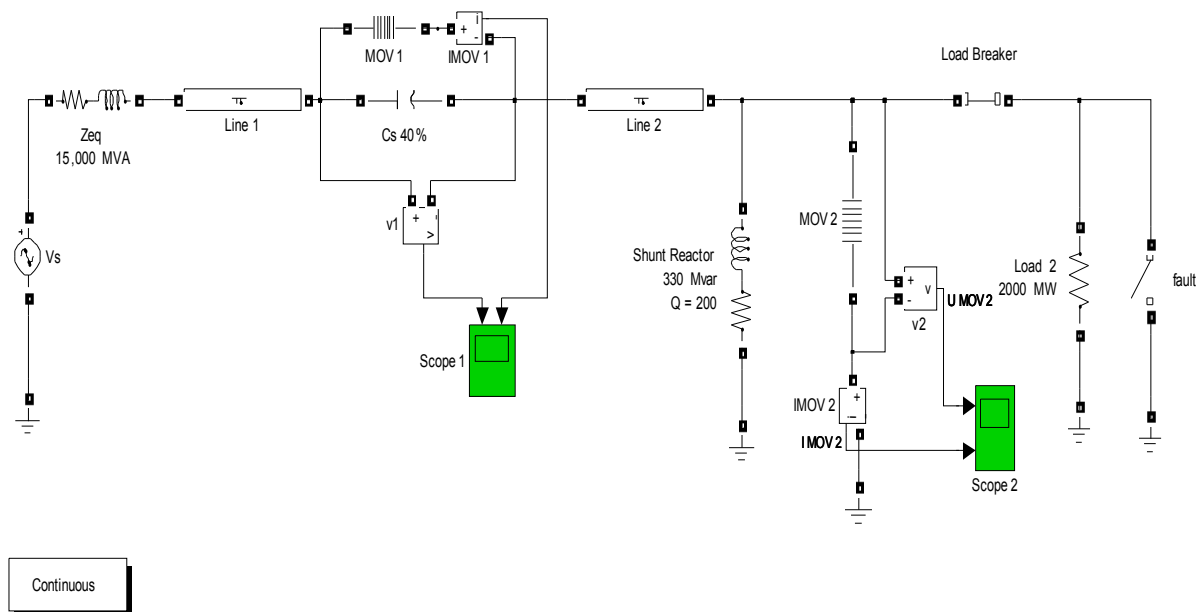


Figure III.6: Le bloc schématique de SIMULINK d'une ligne de transmission protégé par un parafoudre.

Les résultats de simulation du bloc SIMULINK sont montrés sur la Figure III.7 et Figure III.8, pour une tension $U = 735 \text{ KV}$.

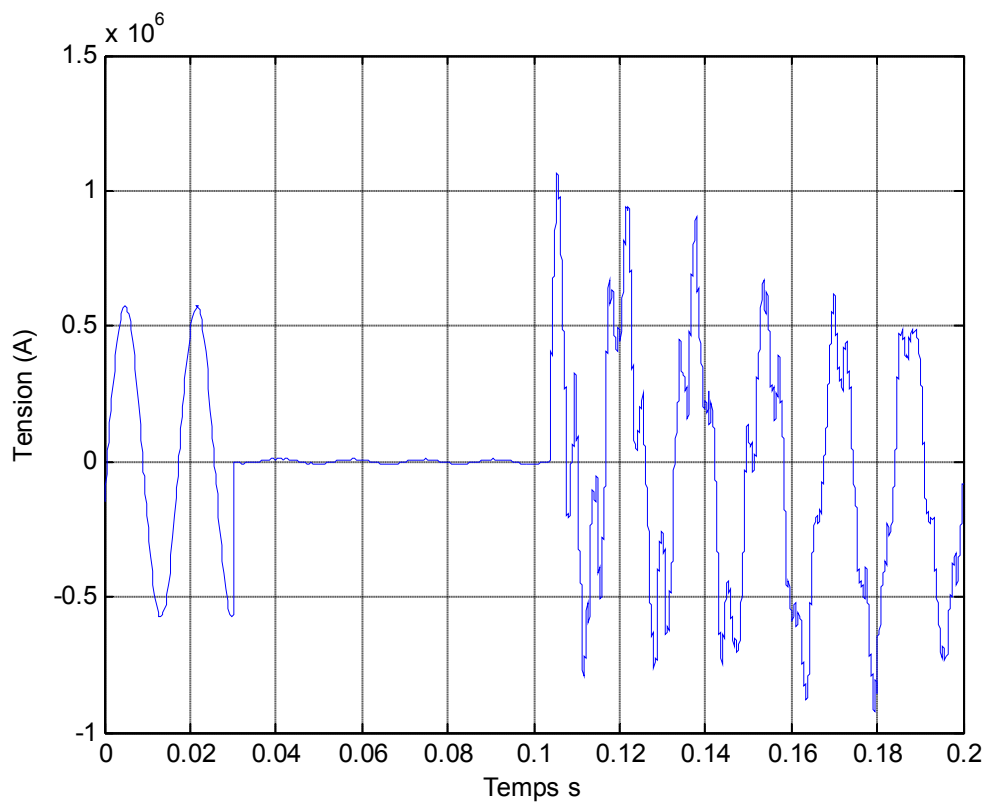


Figure III.7: La tension de parafoudre en fonction du temps.

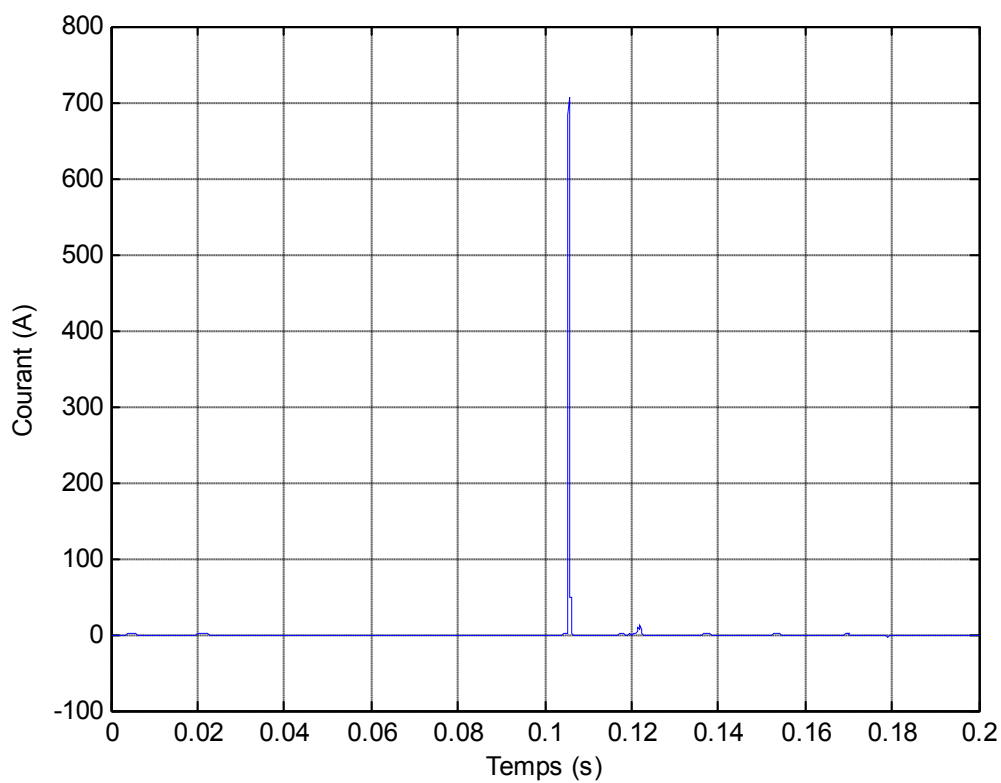


Figure III.8: L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps.

D'après ces résultats de simulation, on peut remarquer:

- Des perturbations de la tension de parafoudre au moment de défaut sur la ligne de transmission (0.11 s). Figure III.7.
- depuis la figure III.8 On peut constater que : pendant la condition de défaut, le courant est devient très élevé (pic) donc il y a surintensité due à la foudre dans le temps (0.11s).
- après ce temps le courant revient à sa valeur nominale c'est-à-dire le parafoudre conduit la surintensité vers la terre.

Le parafoudre (varistance) comporte une résistance fortement non linéaire.

Dans les conditions normales de service la résistance de plusieurs méga-ohm et le courant reste faible (de l'ordre du mA) limite la puissance dissipée.

Dans des conditions de surtension, la résistance chute de manière importante (jusqu'à environ 5 ou 10 ohms), limitant ainsi la tension aux bornes du parafoudre et donc de l'équipement pendant la durée d'écoulement du courant de foudre vers la terre.

• La tension de la ligne U = 220 KV :

Les résultats de simulation du bloc SIMULINK sont montrés sur (Figure III.9) et (Figure III.10), pour une tension U=220 KV et une ligne de 90 Km .

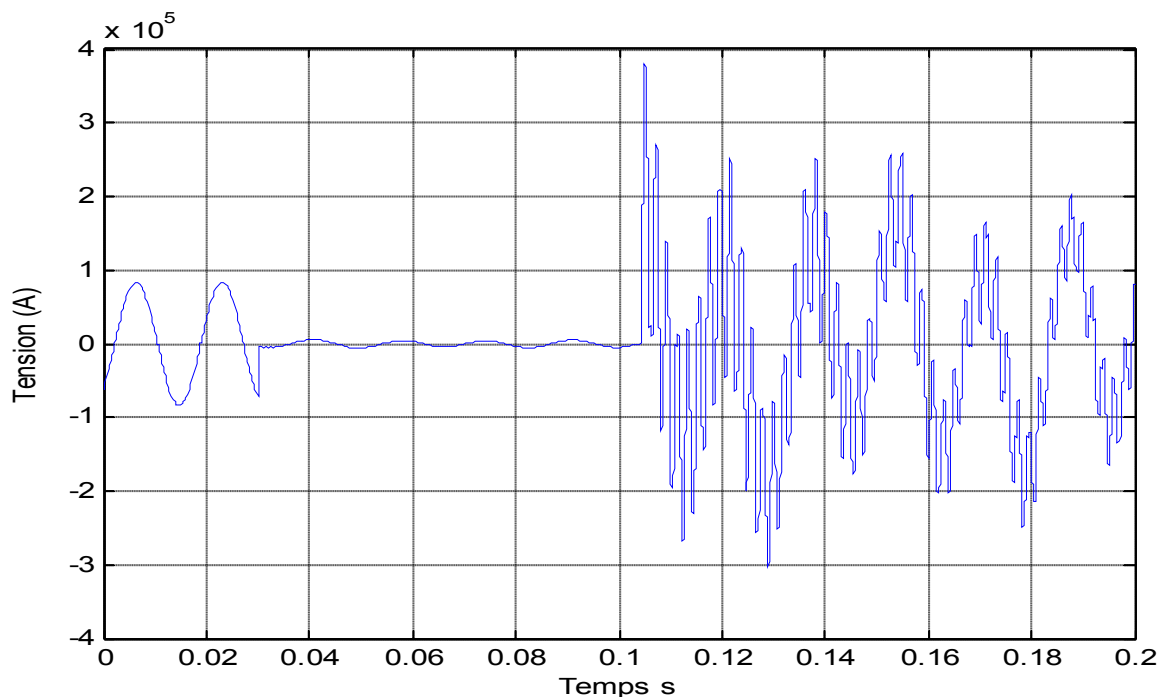


Figure III.9 : L'intensité de la tension de parafoudre en fonction du temps.

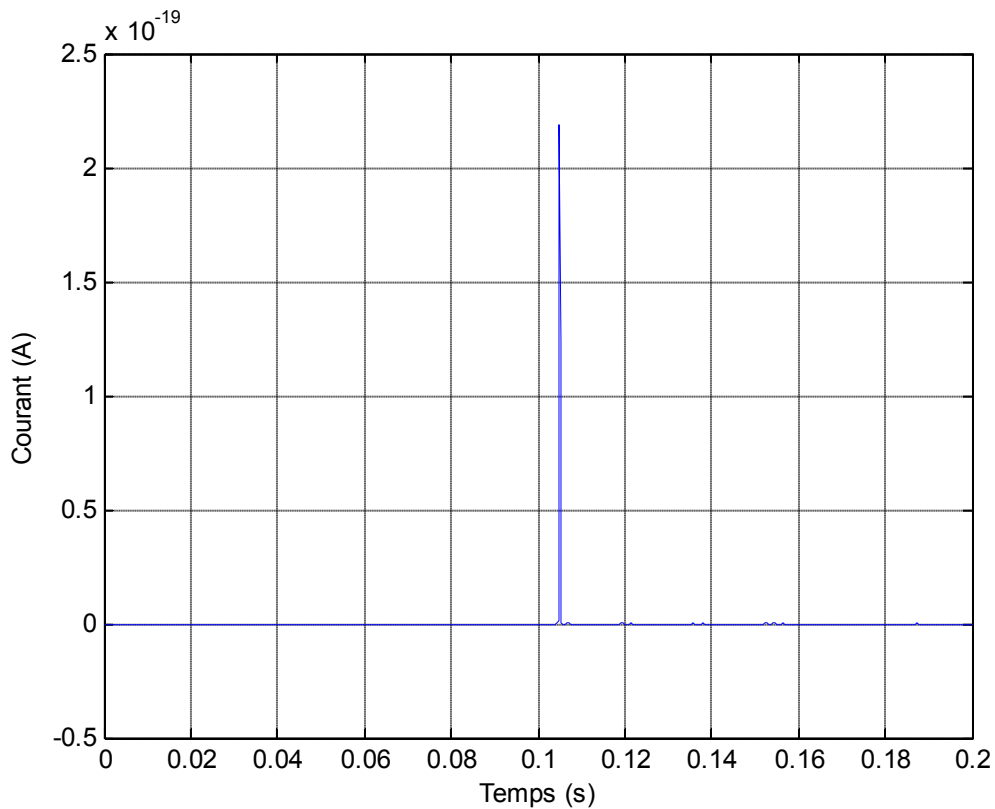


Figure III.10: L'intensité du courant de parafoudre en fonction du temps.

III.13 Conclusion:

Le choix du parafoudre doit se faire en fonction de l'installation monophasée ou triphasée mais aussi de la surtension et l'intensité maximale de décharge estimée.

Un parafoudre doit pouvoir absorber une surtension de plusieurs dizaines de volts, et un surcroît d'intensité de 10KA au minimum.

La plupart des parafoudres standards du marché respectent ce minimum de performance, mais il vaut mieux choisir un parafoudre ayant des performances plus élevées par défaut.

Conclusion générale



CONCLUSION GENERALE

De nos jours, la plus grande disponibilité de l'énergie électrique est demandée pour différents raisons, soit purement économiques (recherche de productivité maximale), soit pour des impératifs de sécurité, ou plus simplement de confort dans les utilisations domestiques.

Il est donc bien évident que dans ce contexte savoir supprimer, ou tout au moins réduire très fortement, les risques et donc les conséquences des surtensions, devient une référence professionnelle.

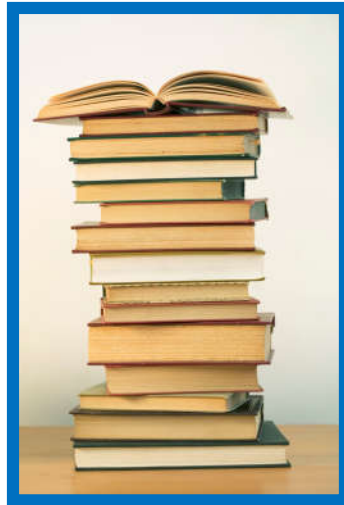
Cette référence passe par la maîtrise de la coordination de l'isolement et tout d'abord par l'application d'une méthode simple d'investigations conduisant à des associations et choix des appareils de protection et des parafoudres. Ces derniers (les parafoudres) devant limiter les surtensions prévisibles sur le réseau à un niveau acceptable par les premiers (appareils de protection).

Pour cela il faut :

- Estimer les surtensions d'origine atmosphérique (la foudre) qui peuvent apparaître sur le réseau électrique.
- Connaître les caractéristiques des appareils de protection installés et plus particulièrement leur principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients.
- Choisir les protections en tenant compte les schémas de liaisons à la terre du réseau électrique.
- Choisir les éléments techniques indispensables aux choix des parafoudres.



Bibliographie



BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.ATAOUA, O. MEHAMMDIA : «Comparaison des Modèles d'Arc en Retour d'un Coup de Foudre en Présence d'une Tour », *Mémoire Master*, Beskra Juin 2010.
- [2] [http/ www.france.paratonnerre.com/paratonnerre](http://www.france.paratonnerre.com/paratonnerre) France.
- [3] J.BERRACHED :«La foudre, Technique de la Haute Tension», polycopie de cours, Avril 2015.
- [4] «Document SONELGAZ, DTE», Ain temouchent , 2022
- [5] A.ROUSSEAU, C. GARY, G.BERGER : «Foudre et protection des bâtiments», *Technique de*
- [6] F.MACIELA : «Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension HTB», *Technique de L'ingénieur D4755*, 10 Mai 2008.
- [7] F.GERARD :«Généralité sur la foudre et les surtensions», Octobre 2008.
- [8] M.GERIN: «La foudre et les installations électriques HT», *Cahier Technique N°168*, Juillet 1993.
- [9] I.LASSOUED et S.SLIMANI :«Etude de la foudre», *Mémoire Magister*, Juin 2006
- [10] C. BOUQUEGNEAU : « la foudre : Phénoménologie, effets et protection » 2004.
- [11] D.ORZAN :« Couplage externe et interne entre un champ électromagnétique et un réseau de Lignes multifilaires», *Thèse de doctorat*, 1998.
- [12] M.MECHATI :« Modélisation du parafoudre à varistance ZnO pour l'étude de l'amélioration de ses propriétés électriques», *Mémoire Magister*, Annaba2010.
- [13] M.DIB : «L'impact de la foudre sur les réseaux électriques», *Thèse de doctorat*, Annaba 2007.
- [14] INERIS. Institut International de l'Environnement et des Risque :« Le risque de foudre et les Installations classés pour la protection de l'environnement », Septembre 2011.
- [15] D.FLUCHIRON :« Surtension et coordination des isolements », *Cahier technique de Schneider N°179*.
- [16] A.ROUSSEAU : « Parafoudres basse tension- Composants réseau basse tension», *Technique de L'ingénieur D4840*, 10 Aout 2003.

- [17] M.BOUKANDOURA :« Protection des réseaux électriques de haute tension contre les Surtensions par les parafoudres à varistances ZnO», *Mémoire Magister*, Annaba 2007.
- [18] A.ROUSSEAU, H.ZADEH, F.MALPIECE :«Parafoudre à oxyde de zinc pour réseaux HTA, Fabrication et Utilisation», RGE, 11/92, p.81-87, (1992).
- [19] H.R. PHILIPP, L.M. LEVINSON: « Degradation phenomena in zinc oxide visitors: A review », *Advances in ceramics V7, Additives and interfaces in electronic ceramics, AM.CERM.SOC, edited by MAN.F.YAN, ARTHUR.H.HEUER 1983.*
- [20] M.HOUABES, C.TALHI :«Effet de l'oxyde d'antimoine sur les varistances ZnO utilisées dans les Parafoudres HT», deuxième conférence nationale sur la Haute Tension, Tizi ouzou Novembre 1997.
- [21] L.WU, C.Y.SHEN, and Y.C. CHEN: « The microstructure of ZnO varistor doped with antimony Oxide », *J.J. App, Phys.Vol.30, No11A, November1991. pp.2850-2856.*
- [22] M.ELFWING: « Nanos cale characterization of barriers to electron conduction in ZnO varistor materials », *PhD Thesis, Uppsala, University Sweden 2002.*
- [23] Guide technique INDELEC : «La foudre apprivoisée »,.
- [24] «Document SONELGAZ, DTE», AIN TEMOUCHENT 2014.
- [25] Guide technique ABB Marché industriel : « les parafoudre »
- [26] Guide technique Schneider : « parafoudres »,2008
- [27] A.DAAS : « Contribution à l'amélioration de la protection contre les surcharge Atmosphériques », *Mémoire Magister*, Annaba Juin 2004.
- [28] Y. CHEMCHOUM, Y.A. AMKASSOU : « Les Parafoudres en HT et EN », *Rapport De Projet D'appareillages Et Installations Electriques*, MAROC 2014.