

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU



*FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE*  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**De MASTER PROFESSIONNEL**  
Domaine : **Science et technologies** Filière : **Génie Electrique**  
Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par  
**Lounis SOULI**

Thème  
**Etudes des protections contre les Surtensions de foudre**

*Mémoire soutenu publiquement le 25 septembre 2017. Devant le jury composé de :*

**M. Mohammed MEGHERBI**

Professeur, U.M.M.T.O, Président.

**M. Mohammed NEDJAR**

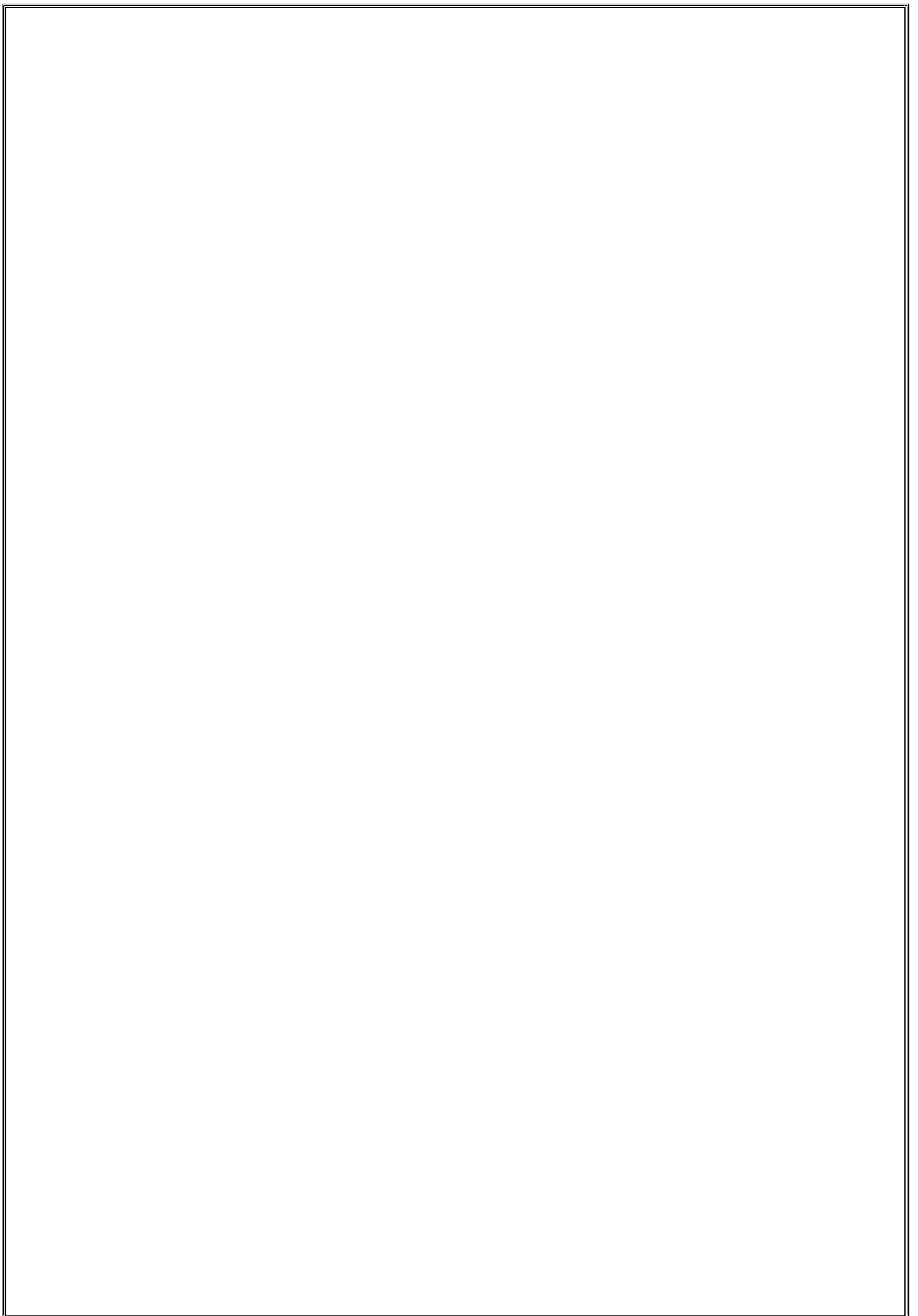
Professeur, U.M.M.T.O, Encadreur.

**M. Mustapha MOUDOUD**

MC/A, U.M.M.T.O, Examineur.

**M. M'hand MEKIOUS**

MA/A, U.M.M.T.O, Examineur.



# Remerciements

---

Mes remerciements Vont à **Monsieur Mohammed NEDJAR**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire, pour ses conseils et ses encouragements incessant durant la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier également :

Monsieur Mohammed MEGHERBI, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, qui me fait l'honneur de présider le jury de présent mémoire.

Messieurs : Mustapha MOUDOUD, Maitre de conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et M'hand MEKIOUS, Maitre-assistant A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

# Dédicaces

---

Je dédie ce modeste travail...

- . A mes chers parents,
- . A mes frères et ma sœur,
- . A toute ma famille,
- . A tous mes amies,

A tous ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études.

**Souli Lounis**

# Sommaire

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

## Chapitre 1 : La foudre

<b>I. La foudre.....</b>	<b>02</b>
I.1. Définition.....	02
I.2. Formation de la foudre.....	02
<b>II. Electricité atmosphérique.....</b>	<b>03</b>
II.1. Par beau temps.....	03
II.2. Par temps nuageux.....	04
II.2.1. Formation du nuage.....	04
II.2.2. Formation des charges.....	05
II.2.3. Répartition des charges.....	05
<b>III. Champ électrique (par temps nuageux).....</b>	<b>05</b>
III.1. Module et sens du champ.....	05
III.2. Pouvoir de pointe.....	06
<b>IV. Classification des coups de foudre.....</b>	<b>06</b>
<b>V. Les effets de la foudre.....</b>	<b>07</b>
V.1. Effets thermiques.....	07
V.2. Effets électrodynamique.....	07
V.3. Surtensions directes.....	07
V.4. Surtensions induites (indirects).....	07
V.5 Montée en potentiel de la prise de terre.....	08

## Chapitre 2 : les surtensions de foudre

<b>I. Surtensions d'origines externes.....</b>	<b>09</b>
I.1. Décharges électrostatiques.....	09
I.2. Impulsions électromagnétiques.....	09

<b>II. Surtensions de foudre</b> .....	09
II.1. Surtensions résultant de coups de foudre indirects.....	10
II.2. Surtensions résultant des coups de foudre directs.....	10
II.3. Les différents modes de propagation.....	10
II.3.1. Le mode commun.....	10
II.3.2. Le mode différentiel.....	11
II.4. Caractéristiques électriques de surtensions de foudre.....	11
II.4.1. Courant de la foudre .....	12
II.4.2. Quelques chiffres concernant le courant.....	13
<b>III. Les phénomènes précurseurs</b> .....	13
III.1. Le nuage orageux.....	13
III.2. Le condensateur terrestre et le courant atmosphérique permanent.....	14
III.3. Effet couronne au sol.....	14
<b>IV. Les effets des surtensions de foudre sur les installations électriques</b> .....	15
IV.1. La foudre tombe sur une structure non protégée.....	15
IV.2. La foudre tombe à proximité d'une ligne aérienne.....	15
IV.3. La foudre tombe à proximité d'une structure.....	15

## Chapitre 3 : les différents dispositifs de protections

### contre les surtensions de foudre

<b>I. Modes de protections</b> .....	16
I.1. Modes indirects.....	16
I.2. Modes directs.....	16
<b>II. Les éclateurs</b> .....	16
II.1. Eclateur à cornes.....	16
II.2. Eclateur à tige.....	18
I.3. Inconvénients et avantages de l'éclateur.....	18
<b>III. Parafoudres</b> .....	19
III.1. Parafoudres à résistances variables et éclateurs.....	19

III.2. Parafoudres à oxyde de zinc( $ZnO$ ).....	21
III.2.1. Principe de fonctionnement des varistances.....	21
III.3. Parafoudre à enveloppes synthétique.....	24
III.4. Avantages de parafoudres.....	24
III.5. Fonctionnement.....	24
III.6. Distance de protection.....	25
III.7. Implantation.....	26
<b>IV. Paratonnerre.....</b>	<b>26</b>
IV.1. Paratonnerre à tige (tige de Franklin).....	26
IV.2. Paratonnerre à dispositif d'amorçage.....	26
IV.3. Modèle électro géométrique.....	28
IV.4. Mise en œuvre du modèle électro géométrique.....	29
IV.4.1. Principe de la méthode.....	29
IV.4.2. Définition de la zone de protection.....	29
<b>V. Câbles de garde.....</b>	<b>31</b>
V.1.1. Ondes induites.....	32
V.1.2. Coup de foudre direct.....	32
V.2. Répartition du foudroiement d'une ligne entre les pylônes et les conducteurs.....	33
V.3. Détermination du courant critique.....	33
V.4. Abaque de détermination de l'angle de protection.....	34
V.5. Nombre de fils de garde nécessaires à la protection d'une ligne.....	34
V.5.1. Ligne à configuration verticale (triangle, double drapeau).....	34
V.5.2. Ligne symétrique horizontale (en nappe).....	35
V.5.3. Ligne de configuration horizontale à deux ternes.....	35

## Chapitre 4 : Applications

<b>I. Protection d'un transformateur <i>MT/BT</i> de 160 kVA, 30 kV/380 V sur</b>	
<b>Poteau avec un parafoudre.....</b>	<b>37</b>
I.1. Description de poste sur poteau.....	38
I.2. Surtension en présence d'une puissante foudre.....	39

I.3. Protection contre les coups de foudre directs.....	40
I.3.1. Etude de système de protection.....	41
I.4. Amélioration de méthode de protection .....	43
<b>II. Protection d'une ligne de haute tension 220 kV avec câble de garde.....</b>	<b>46</b>
II.1. Caractéristiques de la ligne.....	46
II.2. Protection par câble de garde.....	47
II.2.1. Détermination de l'angle de protection.....	47
CONCLUSION GENERALE.....	61







# Introduction générale

# INTRODUCTION GENERALE

Les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique sont soumis à des surtensions de foudre qui sont plus souvent induites par des coups de foudre indirect proche de la ligne et les coups de foudre direct qui sont presque destructifs. Ces surtensions peuvent engendrer des dégâts considérables aux éléments du réseau électrique. Pour maîtriser les perturbations engendrées par les surtensions atmosphériques (la foudre), les chercheurs et les concepteurs des réseaux se sont penchés sur ce problème, en concevant des appareils de protections (éclateurs, parafoudres, paratonnerres, et câbles de garde). D'une manière générale, le travail s'articule sur quatre chapitres.

Le premier chapitre consacré à la foudre : sa définition, sa formation, ses différentes classifications, et la forme de son courant, en plus ces effets sur la ligne direct ou indirects.

Le deuxième chapitre traite les surtensions de foudre, qui constituent un risque majeur pour les réseaux aérienne et les installations électriques, en va étudier les différents modes de propagation, ainsi ses effets directs et indirects sur les réseaux et les installations électriques.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des différents dispositifs de protection contre les surtensions de foudre qui sont : les éclateurs, les parafoudres, les paratonnerres, les câbles de garde chacun son principe de fonctionnement, ainsi leurs avantages et inconvénients.

Le dernier chapitre est réservé pour deux applications, la première sur la protection d'un transformateur *MT/BT de 160kVA, 30 kV/380 V* sur poteau avec un parafoudre, la deuxième en la protection d'une ligne de haute tension *220 kV* avec câble de garde.

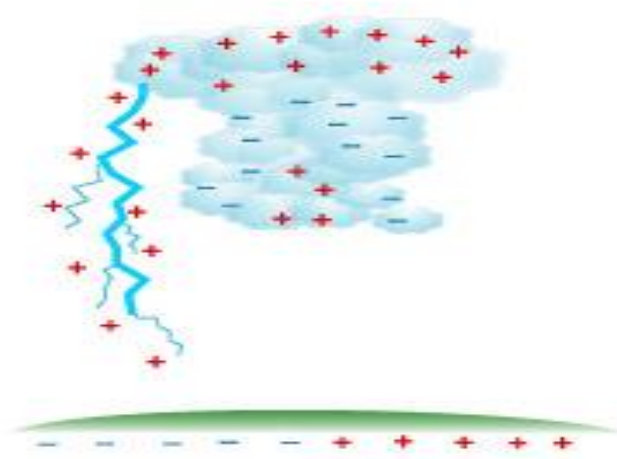
Chapitre 1 :

La foudre

## I. La foudre

### I.1. Définition

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrique (**figure I.1**) qui se produit à partir des orages de nuages (cumulonimbus), à l'intérieur d'un nuage, entre nuages ou entre le nuage et le sol. Elle peut occasionner des sérieux dégâts lorsqu'elle frappe des constructions ou des êtres vivants.



**Figure I.1** : Décharge électrique [1].

. L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Il produit une surtension considérable [1].

. L'étude de la foudre a deux aspects :

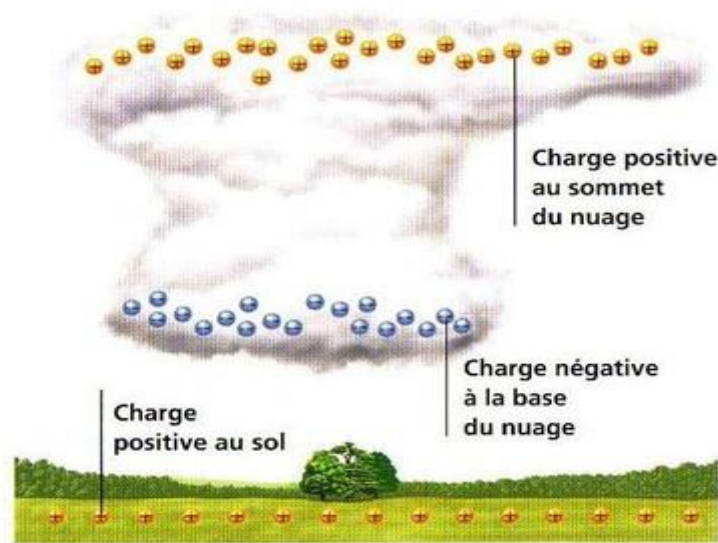
Aspect physique : mécanisme de la foudre.

Aspect électrique : protection contre la foudre.

Remarque : La foudre frappe la surface de la terre environ 5 millions de fois par jour. Si l'essentiel du temps elle ne cause pas de dégâts, il arrive régulièrement qu'elle frappe un arbre, et peut causer un incendie.

### I.2. Formation de la foudre

Lorsqu'un front froid rencontre un front chaud, ce premier passe sous le second, créant des vents ascendants et descendants dans les cumulonimbus, pouvant être épais de plusieurs kilomètres. Les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace en suspension se percutent tandis que le frottement génère l'électrisation du nuage, tandis que les cristaux de glace, chargés positivement, occupent les plus hautes altitudes. Cette différence de potentiel peut générer des éclairs à l'intérieure du cumulonimbus ou entre deux nuages (**figure I.2**).



**Figure I.2** : Formation de la foudre [1].

Ces modifications altèrent également la charge électrique au sol, qui devient négative. Lorsque la différence de potentiel est très importante, il y a une violente décharge électrique entre le nuage et le sol, le plus souvent, ou entre les nuages [1].

## II. Electricité atmosphérique

### II.1. Par beau temps

Electro sphère : couche atmosphérique ionisée.

L'électro sphère et la terre forment un gigantesque condensateur terrestre (**figure I.3**), où le champ électrique beau temps dirigé du haut vers la terre vaut environ  $100$  à  $120$   $V/m$ . Les armatures du condensateur terrestre sont l'électro sphère et le globe terrestre, entre lesquelles il y a la troposphère et la stratosphère qui constituent le diélectrique, dont l'épaisseur est d'environ  $100$   $km$ . Cette épaisseur forme le condensateur terrestre est d'environ  $50$   $km$ , la capacité de ce condensateur sphérique est donnée par [1] :

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_e \cdot R_t}{R_e - R_t}$$

Avec :  $R_t = 6367$   $km$                       Rayon de la terre.

$R_e = (6367 + 100)km$                       Rayon de l'électro sphère.

L'air comprend en permanence des charges électriques, positives et négatives, créées par les rayonnements cosmiques ou la radioactivité de la terre. Par beau temps, il en résulte un courant atmosphérique, tendant à décharger le condensateur.

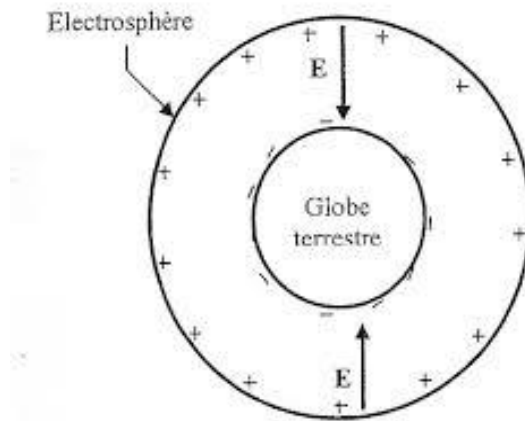


Figure I.3 : Condensateur terrestre.

## II.2. Par temps nuageux

### II.2.1. Formation du nuage

Le nuage orageux est généralement du type cumulonimbus (forme d'enclume, couleur sombre à la base). Il constitue une gigantesque machine thermique dont la base est à 2 km et le sommet à 14 km d'altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol (**figure I.4**). Lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage. La partie supérieure où il fait plus froid est occupée par les particules de glace, tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure, ces dernières se chargent négativement tandis que les particules de glace prennent une charge positive [1].

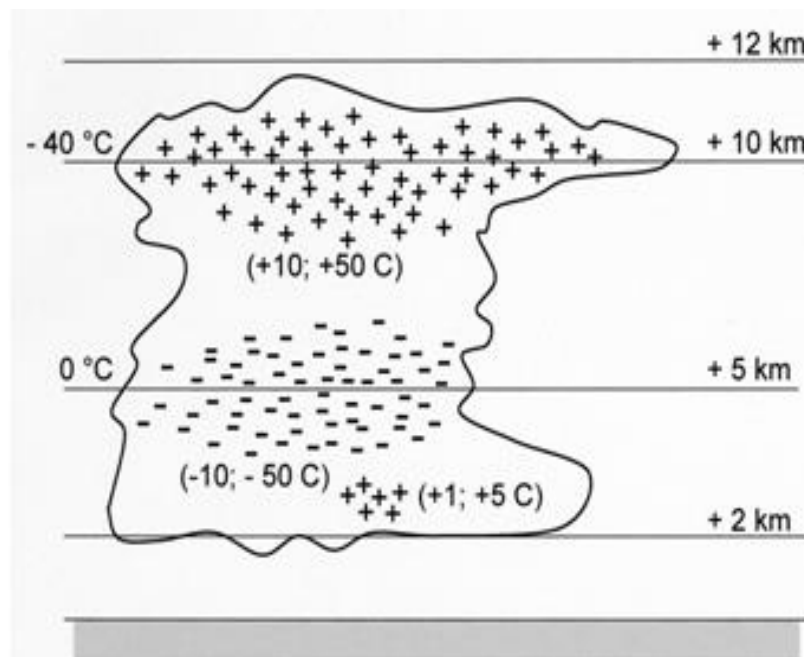


Figure I.4 : constitution du nuage [1].

## II.2.2. Formation des charges

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

## II.2.3. Répartition des charges

Les micro-particules de glace plus légères et chargées positivement, sont emportées par le courant d'air ascendant vers le haut, occupent la partie supérieure du nuage et forment le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif. Une petite quantité de charges positives demeurent à la base du nuage. Le nuage fait apparaître sur la terre, par influence électrique, une charge de signe opposé et crée ainsi deux véritables dipôles électriques [1].

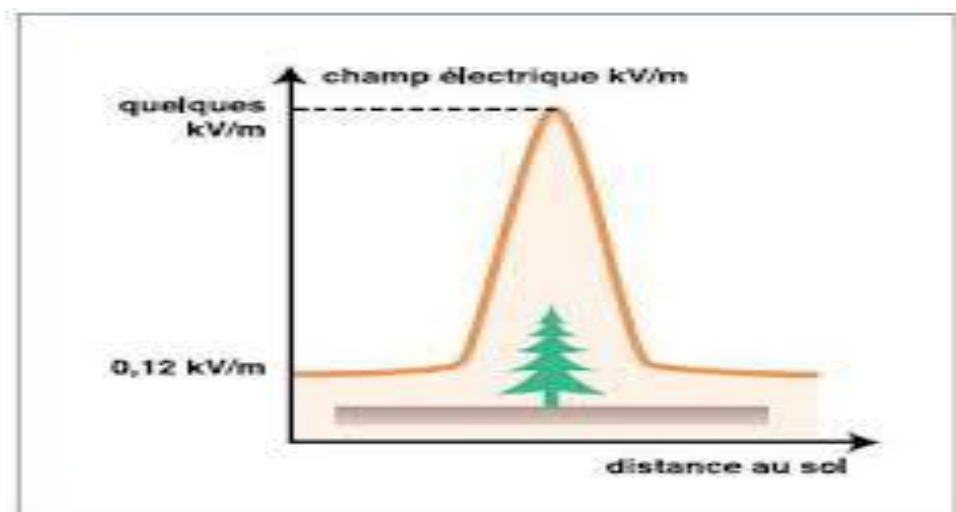
- Un dipôle interne, généré entre les pôles positif et négatif du nuage : si le champ interne  $E_{int}$  devient suffisamment grand, il provoque un claquage interne dans le nuage => éclaircie.
- Un dipôle externe, entre la base du nuage et la surface de la terre : si le champ externe  $E_{ext}$  atteint les conditions critiques, il finit par provoquer une grande décharge entre le nuage et la terre => foudre.

## III. Champ électrique (par temps nuageux)

### III.1. Module et ses du champ

Le champ électrique au sol qui était par temps normal est de  $120 \text{ V/m}$  et dirigé vers la terre, avec l'arrivée du nuage chargé électriquement, il s'inverse et peut atteindre  $15 \text{ à } 20 \text{ kV/m}$ . Au droit du nuage (sous le nuage) (**figure I.5**), le module du champ atteint la valeur maximale :

$$E_{max} = 20 \text{ kV/m} .$$



**Figure I.5** : Graphe donnant la variation du champ électrique en fonction de la distance au sol [1].

## III.2. Pouvoir de pointe

Sur les régions à faible rayon de courbure le champ atteint des valeurs très élevées :

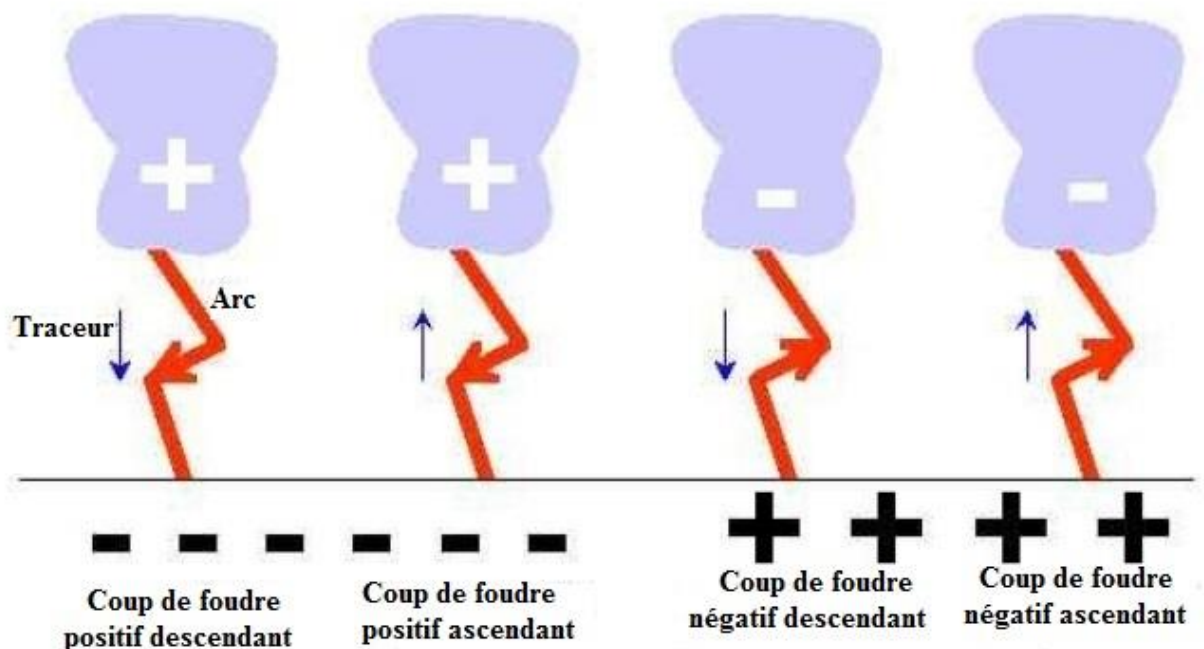
- Une demi-sphère :  $E_p \approx k E_i$  où  $k \approx 3$  ;
- Demi-ellipsoïde :  $E_p \approx k E_i$  où  $k \approx 300$ .

Remarque : ce phénomène favorise l'apparition du coup de foudre à cet endroit ; pour cela, la foudre frappe en général les installations les plus élevées et les plus pointues (tours, montagne, arbre, pylônes.....). Il est donc recommandé de s'éloigner de ces endroits par temps orageux pour éviter l'impact de la foudre [1].

## IV. Classification des coups de foudre

• Le traceur : le traceur est une décharge préliminaire peu lumineuse qui se produit entre la terre et le nuage, préparant le chemin au canal de la foudre. Les coups de foudre sont classés selon (figure I.5) :

- Le sens de progression du traceur ;
- Le signe de la décharge.



**Figure I.5** : Les différents types des coups de foudre [1].

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, 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.

## V. Les effets de la foudre

### V.1. Effets thermiques

- . Fusion d'éléments au point d'impact ( $\approx 30000\text{ °C}$ ).
- . Risque d'incendie dû à la circulation d'un courant important.

### V.2. Effets électrodynamique

Lorsque les courants de la foudre circulent dans des conducteurs parallèles, la force magnétique qui en résulte (attraction et répulsion) peut entraîner des déformations mécaniques et même des ruptures.

### V.3. Surtensions directes

L'impact direct sur une ligne électrique ou téléphonique, génère une onde de tension qui propage. Cette onde, qui est amortie par l'effet couronne et la longueur de la ligne, elle sera coupée soit par l'isolateur à cornes ou par les moyens de protection au poste [1].

### V.4. Surtensions induites (indirectes)

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres. Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude à celle obtenus par choc de foudre direct. Leur caractéristique principale est leur front très raide (de l'ordre de la microseconde), et leur amortissement très rapide. Ce rayonnement est d'autant plus important que le front de montée est raide (20 à 100  $kA/\mu s$ ).

Un coup de foudre tombant à proximité d'une ligne développe un champ d'induction magnétique suffisamment important pour y créer une surtension induite, dont l'ordre de grandeur être estimé par la formule suivante [1] :

$$U_{ind} = Z_o \cdot I \cdot h/d \quad \text{Avec :} \quad Z_o = (0,25/\pi)(\sqrt{\mu_o}/\epsilon_o)$$

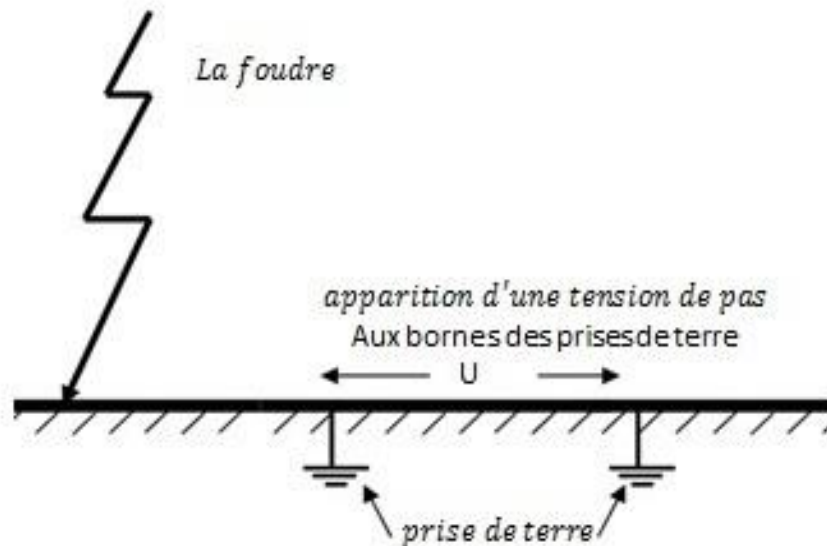
$h$ : Hauteur du conducteur.

$d$ : Distance entre la ligne et le point d'impact de la Foudre.

$I$ : Courant de la foudre.

### V.5 Montée en potentiel de la prise de terre

Une élévation du potentiel de terre aura lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre. Le courant circulant dans la terre peut provoquer la montée en potentiel des équipements par les prises de terre (**figure I.6**).



**Figure I.6** : schéma expliquant la montée en potentiel de la prise de terre [1].

Tension de pas : la distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin parcouru. Dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée « Tension de pas ». Les charpentes métalliques des bâtiments et les prises de terre doivent être toutes reliées, être elles afin d'éviter des tensions dangereuses pour l'homme, ainsi que pour les risques d'incendie et d'explosions dus aux amorçages d'arc.

Remarque : c'est ce phénomène qui explique souvent le foudroiement indirect des animaux : même à 100 m du point d'impact, un cheval dans un pré peut subir entre ses pattes arrières et ses pattes avant, une différence de potentiel de 500 V [1].



Chapitre 2 :

Les surtensions de foudre

Dans le monde, entre 2000 et 5000 orages sont constamment en formation, ces orages accompagnés de coups de foudre qui constituent un sérieux danger pour les personnes et les matériels. Parmi ces risques, les surtensions d'origines externes (la foudre) qui seront étudiée dans le deuxième chapitre.

### I. Surtensions d'origines externes

Ces surtensions sont indépendantes de la tension de service du réseau. Elles sont dues à plusieurs perturbations qui sont : la décharge électrostatiques, l'impulsion électromagnétique et la foudre [2].

#### I.1. Décharges électrostatiques

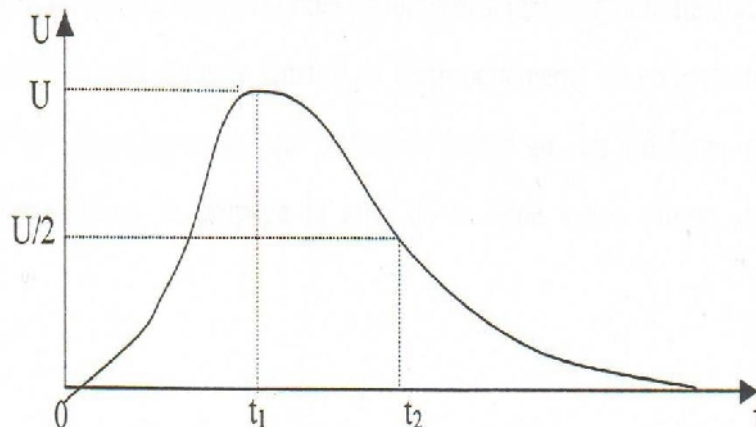
Le phénomène de décharge électrostatique, est un transfert de charge déclenché par un contact direct des deux éléments ou plusieurs ou par influence. L'origine de ce phénomène réside dans la création d'une charge électrostatique portée par ces éléments.

#### I.2. Impulsions électromagnétiques

L'impulsion électromagnétique résulte d'une explosion nucléaires ou d'une décharge de foudre. Intervenant à très haute altitude, l'impulsion électromagnétique est la seule composante à considérer pour un équipement au sol, elle représente une menace considérable pour les installations électriques par suite du champ créé  $> 50 \text{ kV/m}$  et par suite de la très importante surface ouverte (plusieurs milliers de kilomètres carrés, selon l'amplitude de l'explosion).

### II. Surtensions de foudre

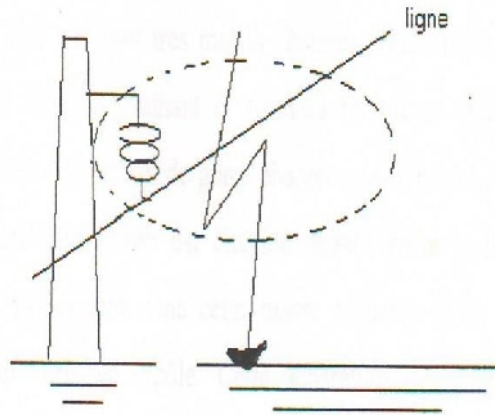
Les surtensions de foudre sont plus souvent induites par des coups de foudre indirects proche de la ligne et les coups de foudre directs qui sont presque toujours destructifs. Ces surtensions ont la forme représentée sur la (**figure II.1**) ; la durée du front montant  $t_1$  est de quelques microsecondes, alors que la durée de décroissance jusqu'à la demi-amplitude varie de 1.5 à 50 microsecondes.



**Figure II.1** : Forme d'onde de choc de foudre [1].

### II.1. Surtensions résultant de coups de foudre indirects

Ce type de surtensions peut avoir une origine électromagnétique. En effet, si la foudre tombe près d'une ligne, le courant circulant dans l'arc ionisé par l'éclair induit une force électromagnétique (*f. e. m.*) dans la ligne (**figure II.2**). Cette surtension se propage le long de la ligne.



**Figure II.2** : Coup de foudre indirect (induction électromagnétique) [2].

Remarque : De telles surtensions ont des répercussions dangereuses surtout pour les réseaux à basses et moyenne tensions.

### II.2. Surtensions résultant des coups de foudre directs

Lorsqu'un coup de foudre frappe un conducteur d'une ligne, tout se passe comme si l'arc en retour se comporte comme un courant injecté dans ce condensateur. Ce courant se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact, en se propageant le long du conducteur, sous forme d'onde mobile. Les lois de propagation des ondes mobiles enseignent qu'à toute onde de courant est nécessairement associée à une onde de tension, et réciproquement vrai. Un coup de foudre direct sur un conducteur d'une ligne provoque une surtension locale qui, en 4 à 5 ms, peut atteindre 5000 kV [2]. Cette surtension se propage le long de la ligne à une vitesse donnée par la formule [3] :

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ ( km/s )}$$

Avec :  $L$ : L'inductance linéique en ( $\Omega/\text{km}$ ) [3].

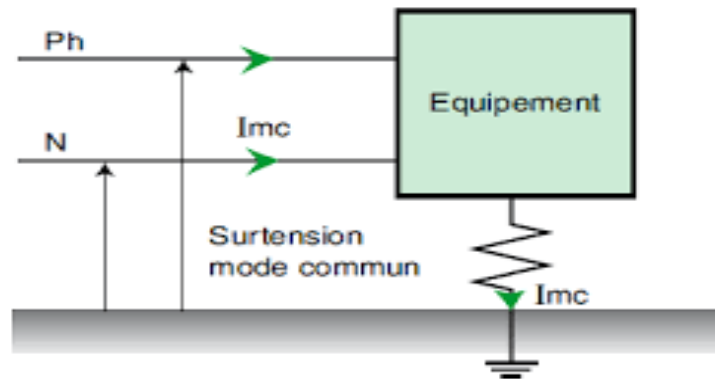
$C$ : Capacité de la ligne par phase et par ( $\text{km}$ )[3].

### II.3. Les différents modes de propagation

#### II.3.1. Le mode commun

## Chapitre 2 : les surtensions de foudre

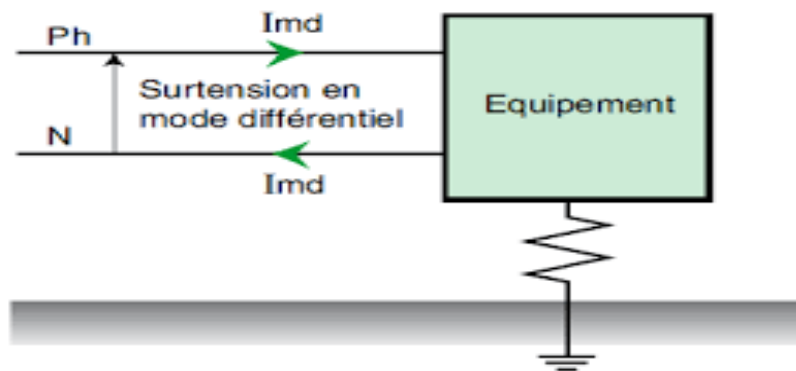
Les surtensions en mode commun apparaissent entre les conducteurs actifs et la terre : *phase/terre* ou *neutre/terre* (**figure II.3**). Elles sont dangereuses surtout pour les appareils dont la masse est connectée à la terre en raison des risques de claquage diélectrique [4].



**Figure II.3** : Mode commun [4].

### II.3.2. Le mode différentiel

Les surtensions en mode différentiel apparaissent entre conducteurs actifs *phase/phase* ou *phase/neutre* (**figure II.4**). Elles sont particulièrement dangereuses pour les équipements électroniques [4], les matériels sensible de type informatique, etc.



**Figure II.4** : Mode différentiel [4].

### II.4. Caractéristiques électriques de surtensions de foudre

Dans le (**tableau II.1**) sont rassemblées les valeurs les plus significatives des principales caractéristiques des courants de foudre.

Probabilité de dépassement	Crête de courant	Charge de Courant	Pente $\frac{di}{dt}$	Energie $\int i^2 dt$	Durée totale	Nombre de décharges
$P(\%)$	$I(kA)$	$Q(c)$	$S(kA/\mu s)$	$[(kA^2) \cdot S]$	(s)	$N$

## Chapitre 2 : les surtensions de foudre

50	26	9	48	0,50	0,09	1,8
10	73	69	74	1,90	0,56	5
1	180	330	97	35	2,70	12

**Tableau II.1** : Principales caractéristiques des courants de foudre [5].

Remarque :

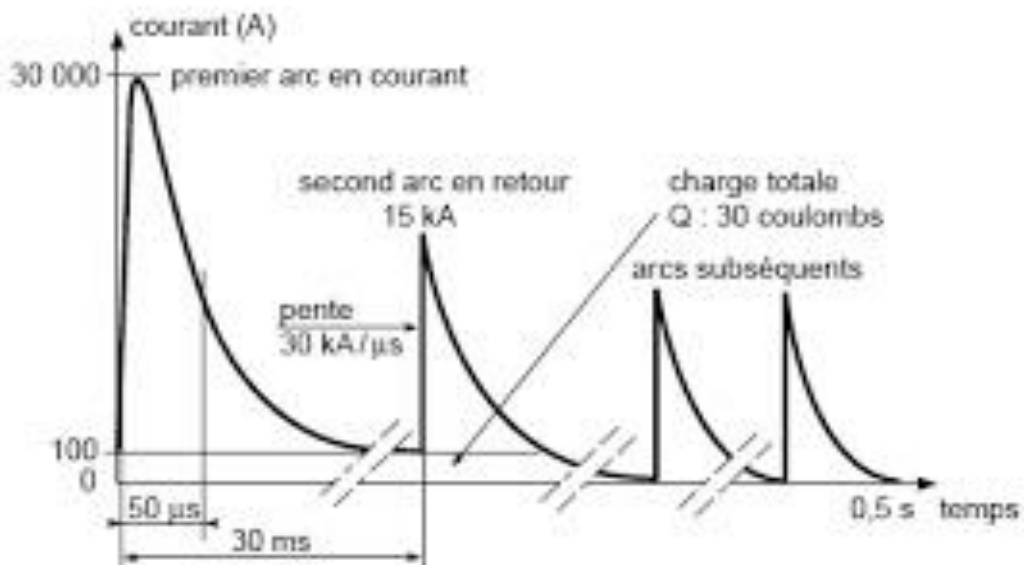
- La charge  $Q$  écoulée par un coup de foudre est intéressante à connaître, par ce que l'effet de fusion au point d'impact est proportionnel à la charge écoulée [5].

- Quant à la somme  $\int i^2 dt$  : c'est celle-ci qui va servir au calcul de la section de la conduite par laquelle le courant de foudre devra s'écouler [5].

### II.4.1. Courant de la foudre

Le courant 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  $10^8 \text{ m/s}$ . C'est « l'arc en retour » [1].

Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé. Lorsque la décharge, principale est terminée, après une durée environ de  $100 \text{ ms}$  apparaît une ou plusieurs décharges secondaires (**figure II.5**).



**Figure II.5** : Forme du courant de la foudre [1].

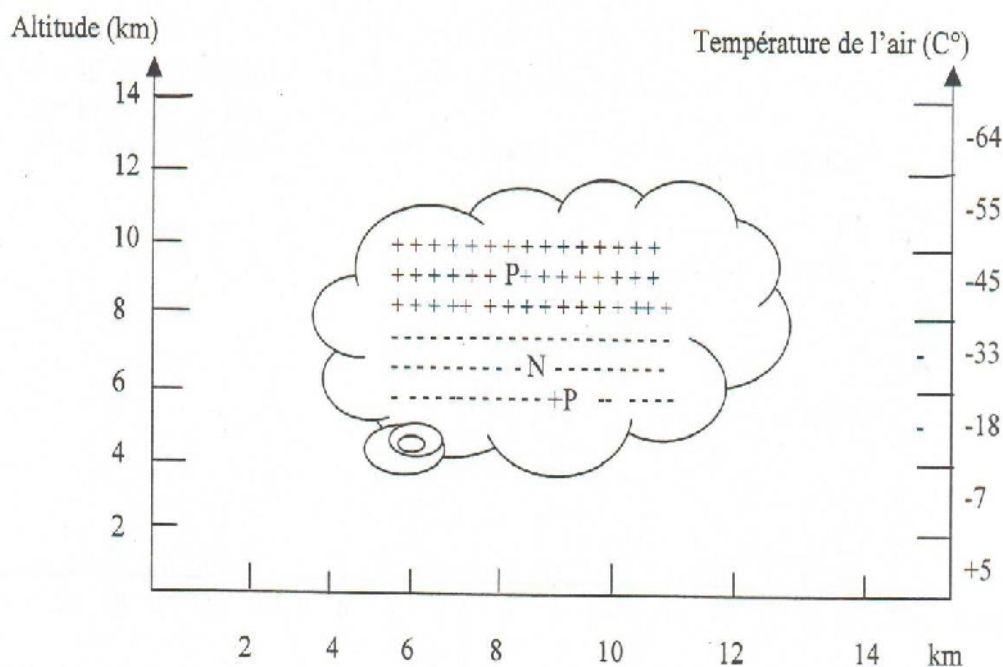
### II.4.2. Quelques chiffres concernant le courant [1]

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

## III. Les phénomènes précurseurs

### III.1. Le nuage orageux

Un nuage orageux est généralement du type « cumulo-nimbus » ; son volume peut dépasser  $100 \text{ km}^3$ , sa masse est de l'ordre de centaines de milliers de tonnes d'eau, sa base se trouve à environ 2 à 3 km au-dessus du sol (**figure II.6**). Il est formé sous l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement local du sol. Il y a alors formation, puis ascension d'une masse d'air chaud et humide. Comme l'air transmet très mal la chaleur, cette « bulle » s'élève pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant et formera un nuage orageux aux altitudes. La partie supérieure constituée de cristaux de glace chargée positivement « léger », et la partie inférieure constituée de gouttelettes d'eau est chargée négativement « lourdes ». Souvent un ilot de charges positives est enserré dans cette masse négative (zone de pluie intense). Le nuage constitue donc un véritable dipôle. Cette séparation des charges, due à des phénomènes mécaniques de mouvement d'air, crée des contraintes électriques entre les différentes couches intérieures ; lorsque le gradient limite de claquage dans l'air est atteint, il y'a décharge électrique soit entre deux zones de nuage « éclair », soit entre le nuage et le sol « foudre » [5].



**Figure II.6** : Séparation des charges dans un nuage orageux [2].

### III.2. Le condensateur terrestre et le courant atmosphérique permanent

On peut considérer la terre comme un gigantesque condensateur sphérique, dont les deux armateurs seraient constitués par le globe terrestre lui-même et par l'électro sphère (zone conductrice de l'atmosphère). Entre les deux, la troposphère et la stratosphère constituent le diélectrique dont l'épaisseur est de l'ordre de  $50\text{ km}$ , des mesures montrent qu'il existe par beau temps un champ électrique faible permanent dirigé vers le bas (haute atmosphère positive) (terre négative) dont l'amplitude est de  $100$  à  $150\text{ V/m}$ . Le condensateur terrestre est donc chargé en permanence [5].

A l'approche d'un nuage orageux, le champ électrique atmosphérique au sol commence à s'inverser, puis croit dans de fortes proportions. Le signe négatif résulte de la convention de sens choisi. Pour le champ au sol, il est négatif lorsque les charges électriques atmosphériques sont négatives. La (figure II.7) schématise l'allure du champ électrique sous un nuage.

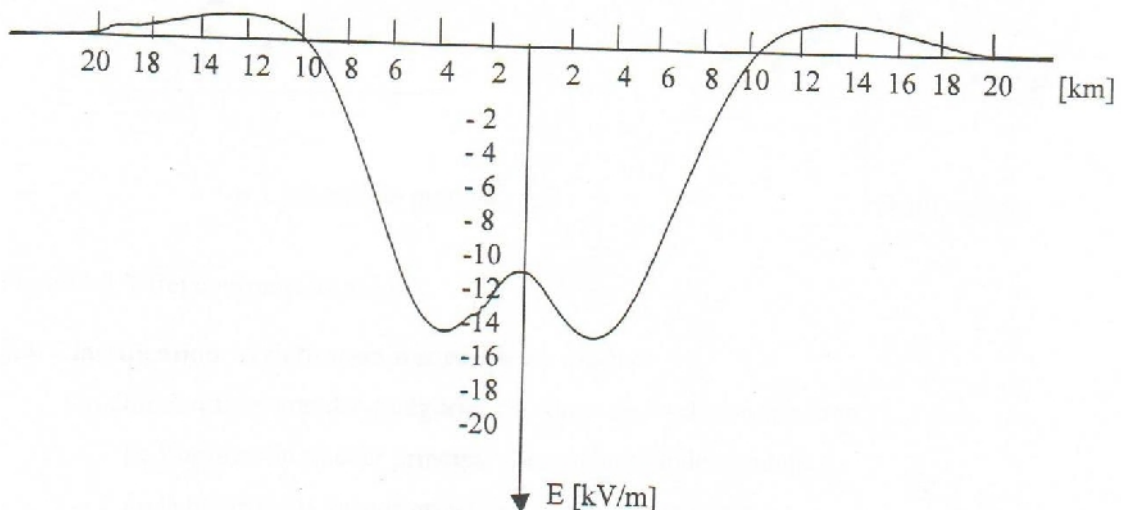


Figure II.7 : Allure du champ électrique sous un nuage [2].

### III.3. Effet couronne au sol

Les valeurs de champ électrique au sol indiquées ci-dessus supposant un sol horizontal plat, mais on sait que toute aspérité par un effet de concentration de lignes de forces et de tassement des surfaces équipotentielles, peut considérablement augmenter le champ superficiel local.

On peut calculer qu'au sommet d'une demi-sphère posée sur un plan, le champ est le triple du champ moyen. Lorsque le demi-sphère se déforme pour devenir un demi-ellipsoïde positive, cet effet s'accroît encore ainsi, pour un rapport entre grand axe et petit axe de l'ellipsoïde égal à 50, le champ est multiplié par facteur 300 [1].

Comme le seuil d'ionisation de l'air atmosphérique est de l'ordre de  $30\text{ kV/cm}$ , on voit que, dans ces conditions particulières, il suffit qu'un champ ambiant de  $4$  à  $5\text{ kV/m}$  pour provoquer un effet couronne au sommet de l'ellipsoïde (figure II.8).

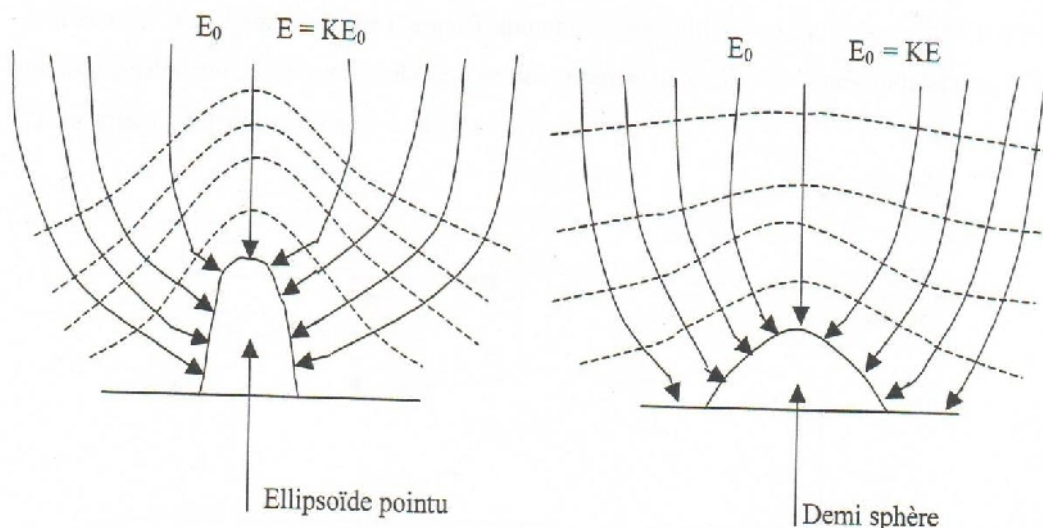


Figure II.8 : Effet couronne au sol [2].

### IV. Les effets des surtensions de foudre sur les installations électriques

La foudre endommage particulièrement les installations électriques ou électroniques : les transformateurs, les compteurs électriques, les appareils électroménagers dans le résidentiel comme dans l'industrie. Dans tous les cas, les conséquences pour les installations électriques et les récepteurs peuvent être dramatiques, parmi ces cas et leurs causes on a :

#### IV.1. La foudre tombe sur une structure non protégée

Le courant de foudre s'écoule à la terre à travers les structures plus ou moins conductrices du bâtiment avec des effets très destructives, parmi ces effets :

- Effets thermiques : échauffement très violents des matériaux provoquant l'incendie.
- Effets mécanique : déformation de structures.
- Amorçage thermique : phénomène particulièrement dangereux en présence des matières inflammables ou explosives (hydrocarbures, poussières.....).

#### IV.2. La foudre tombe à proximité d'une ligne aérienne

Le courant de coup de foudre génère des surtensions par induction électromagnétique dans le réseau de distribution. Ces surtensions se propagent le long de la ligne jusqu'aux équipements électriques à l'intérieur des structures.

#### IV.3. La foudre tombe à proximité d'une structure

Le coup de foudre génère les mêmes types de surtensions. De plus, le courant de foudre remonte de la terre vers l'installation électrique provoquant ainsi un claquage des équipements.



Chapitre 3 :

Les différents dispositifs  
de protections contre les  
surtensions de foudre

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

Depuis les temps les plus reculés de l'humanité, la foudre est connue et ces effets sont redoutés. Parmi ces effets les surtensions de foudre qui affectent les réseaux de distribution, peuvent être destructifs. Il est important donc d'équiper ces réseaux avec des différents dispositifs de protections (éclateurs, parafoudres, paratonnerres, et câbles de garde), ces dispositifs qui seront l'objet de notre étude dans le troisième chapitre.

### I. Modes de protections

#### I.1. Modes indirects

L'utilisation de câbles de garde, de paratonnerres, de conducteurs de terre a pour but de soustraire partiellement les installations à l'influence des surtensions ou d'en atténuer l'action. De même, la mise à la terre du neutre réduit les surtensions qui prennent naissance lors de manœuvres et constituent un mode indirect de protection contre les surtensions. Une protection efficace contre les coups de foudre directs, réside dans l'utilisation de conducteurs de garde. Ce sont des fils ou des câbles métalliques, tendus à un niveau convenable au-dessus des installations à protéger et maintenus au potentiel du sol par un nombre suffisant de mise à la terre [2].

#### I.2. Modes directs

Les modes directs de protections constituent à utiliser un ensemble d'appareils de protections capable de réduire l'amplitude des surtensions ou de réduire le front des ondes de choc ou encore d'amortir les oscillations. Les appareils de protections peuvent être : des appareils de coordination comme les éclateurs et les parafoudres qui établissent une communication entre l'installation à protéger et la terre, diminuant ainsi l'amplitude des surtensions. Ou des étouffeurs d'ondes (inductance, condensateurs, résistances) qui déforment les ondes mobiles ou amortissent les oscillations des circuits [2].

### II. Les éclateurs

Les éclateurs constituent un moyen de protection contre les surtensions, utilisés depuis très longtemps en raison de leur simplicité. On distingue deux types d'éclateurs.

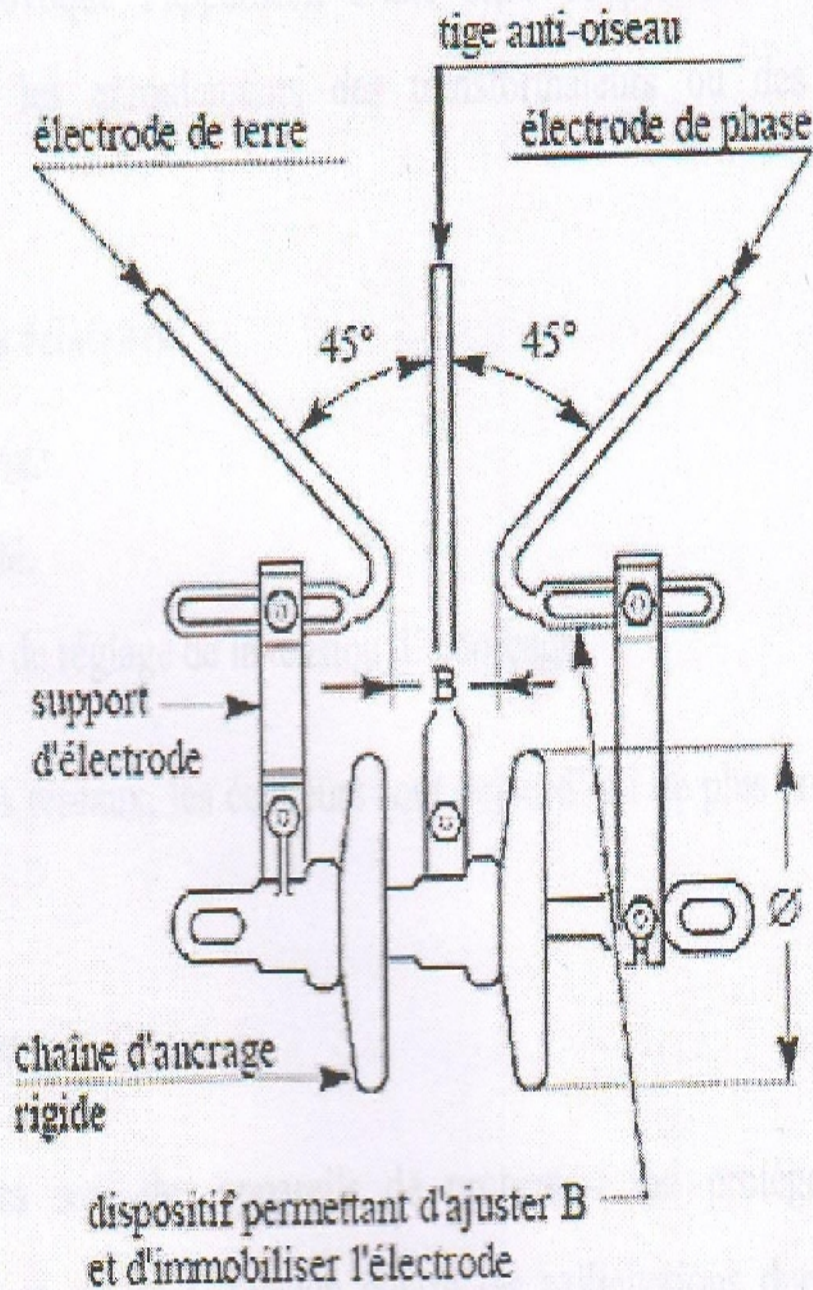
#### II.1. Eclateur à cornes

Un éclateur à cornes est constitué de deux électrodes : l'une est reliée au conducteur et l'autre à la terre ; ces deux électrodes sont montées sur une chaîne d'isolateurs. Les électrodes constituant les éclateurs, utilisés dans des réseaux de distribution moyenne tension, sont en fer étiré d'au moins  $80 \text{ mm}^2$  de section ; la liaison à la terre est établie par un conducteur en cuivre de  $29 \text{ mm}^2$  de section. La distance entre les deux électrodes est réglée de manière à obtenir un amorçage pour une certaine valeur de la tension appliquée. Afin d'empêcher certains amorçages intempestifs ( par oiseaux, par exemple), les éclateurs comportent fréquemment, entre les deux électrodes, une tige intermédiaire : de tel éclateurs sont dits de type anti-oiseaux (**figure III.1**).

L'efficacité des éclateurs anti-oiseaux peut encore être améliorée en utilisant, à la place d'une tige, un ensemble de deux tiges reliées électriquement mais séparées par un intervalle ; l'arc qui

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

prend naissance sur les électrodes se trouve ainsi fractionné en deux parties séparées par un milieu qui garde sa rigidité diélectrique [2].



Un éclateur MT avec tige anti-oiseaux

Exemple : sur les réseaux EDF 24 kV.

B= 25 mm

**Figure III.1** : Eclateur à corne [2].

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

### II.2. Eclateur à tige

Dans certaines postes existants, l'installation d'éclateurs à cornes peut se heurter à des difficultés, en particulier du fait de la façon dont est réalisé l'ancrage de l'arrivée moyenne tension. On peut alors utiliser des éclateurs à tige à l'intérieur du poste, en n'oubliant pas d'éliminer tout fusible en amont du point d'installation [2].

Toutefois, alors que l'éclateur à cornes, l'usure due aux arcs ne se produit que vers l'extrémité des cornes, dans l'éclateur à tige, au contraire cette usure a pour effet d'augmenter progressivement la distance entre électrode ; il est donc nécessaire de revoir périodiquement le réglage des éclateurs à tige et de les installer que sous certaines conditions.

En particulier, sur les réseaux à neutre à la terre où le courant de défaut franc à la terre peut atteindre 300 A, il faut s'assurer que les deux conditions suivantes sont remplies, pour limiter l'usure des éclateurs [2] :

- Le poste protégé est situé sur un départ moyen tension équipé de déclenchement non temporisé.
- Le poste protégé est suffisamment éloigné du point d'alimentation du réseau pour que le courant de défaut triphasé ne dépasse pas 500 A.

Utilisés en moyenne et en haute tensions, ils sont placés sur les points des réseaux particulièrement exposés et à l'entrée des postes *MT/BT*. Les éclateurs n'ont aucun pouvoir de coupure. Ils sont destinés en dernier ressort, à écrêter les surtensions, dans la cas où les autres systèmes n'auraient pas fonctionné.

### II.3. Inconvénients et avantages de l'éclateur

Son mode de fonctionnement présente un certains nombres d'inconvénients [6] :

- . Les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables (jusqu'à 40 %) en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité, pression) qui modifient l'ionisation du milieu diélectrique (l'air) entre les électrodes.
- . Les éclateurs présentent une dispersion des tensions d'amorçages qui ne permet pas de fixer un niveau de protection au choc parfaitement uniforme [2].
- . 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.
- . Les éclateurs peuvent augmenter le nombre des déclenchements [2] :

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

Lorsque l'éclateur fonctionne à la suite d'une surtension et qu'un arc important en résulte, il peut persister jusqu'à ce qu'une protection agisse pour séparer l'éclateur de la source. Dans ce cas, il en résulte une augmentation du nombre des déclenchements.

- L'amorçage provoque l'apparition d'une onde à front raide susceptible d'endommager les enroulements des transformateurs ou des moteurs situés à proximité.

Malgré leurs inconvénients, les éclateurs sont largement utilisés en raison de leur simplicité et de leur prix extrêmement réduit.

Encore en place sur les réseaux, les éclateurs sont aujourd'hui de plus en plus remplacés par les parafoudres.

### III. Parafoudres

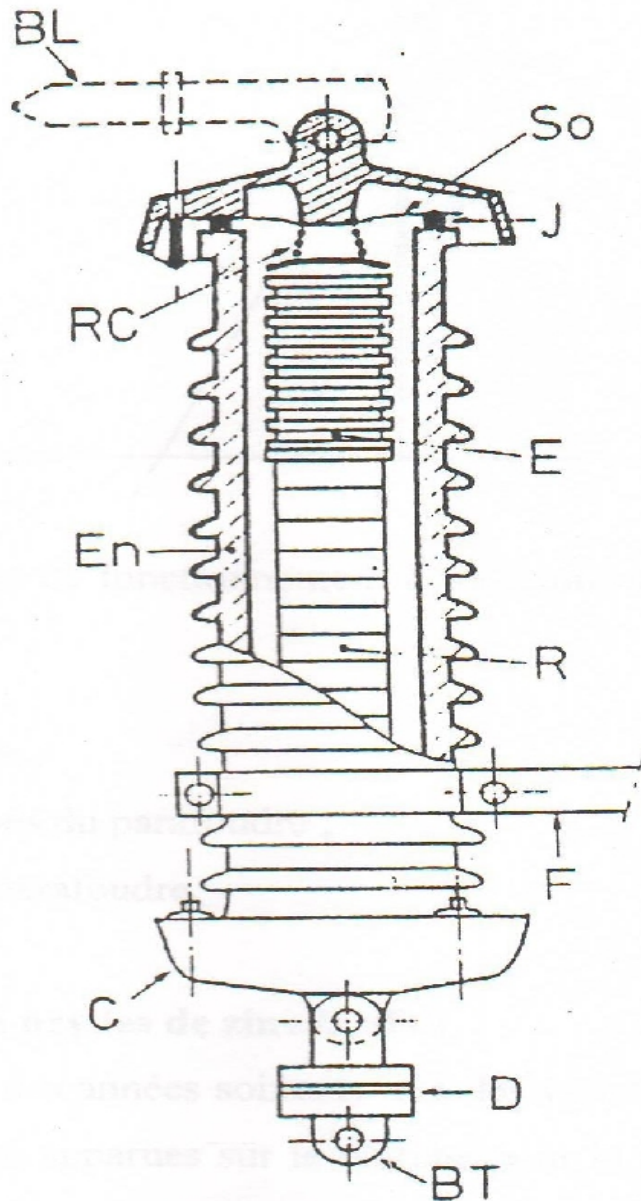
Les parafoudres sont des appareils de protections pour les équipements de haute et moyenne tension contre les sollicitations dues à des surtensions inacceptables. Ces surtensions peuvent être provoquées par des décharges de foudre ou des manœuvres de couplage dans l'installation. Le parafoudre assure la protection contre les surtensions, en réduisant leurs amplitudes, par écoulement de courant à la terre. Dès que l'on veut réduire l'isolement des matériels ou améliorer la qualité de service, il est nécessaire d'utiliser des parafoudres. Ces dispositifs présentent de meilleures caractéristiques de protection par rapport aux éclateurs, moyennant toutefois un prix élevé. Grâce à leur pouvoir élevé d'absorption d'énergie et leur grande rigidité mécanique, les parafoudres se prêtent particulièrement bien à la protection contre les surtensions des transformateurs, des câbles, des moteurs et des autres appareils et installations à haute et moyenne tension [6]. Il existe aujourd'hui sur le marché des parafoudres :

- Parafoudres au carbure de silicium et éclateurs ( $SiC$ ) ;
- Parafoudres à oxyde de zinc ;
- Parafoudres à oxyde de zinc et enveloppe synthétique.

#### III.1. Parafoudres à résistances variables et éclateurs

Les modèles au carbure de silicium ( $SiC$ ) (**figure III.2**) ne sont pas capables de supporter de manière permanente la tension de service car leur courant résiduel est trop important et génère un dégagement de chaleur inadmissible. Ils sont donc associés à un éclateur en série capable d'interrompre le courant résiduel et de tenir la tension de service [6].

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre



*BL* : Bronche de raccordement à la ligne.

*BT* : Corne de raccordement à la terre.

*C* : Capot.

*D* : Dé connecteur.

*E* : Eclateur multiple (avec plusieurs éclateurs).

*En* : Enveloppe de porcelaine.

*F* : Ferrure de fixation.

*J* : Joint d'étanchéité.

*R* : Résistance variable au carbure de silicium (*SiC*). *RC* : Ressort de compression.

*So* : Soupape.

**Figure III.2** : Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs [2].

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

### • Caractéristiques

Ce type de parafoudre est caractérisé par :

- Sa tension d'extinction, ou tension assignée, qui est la tension à fréquence industrielle la plus élevée sous laquelle le parafoudre peut se désamorcer spontanément. Elle doit être supérieure à la plus forte surtension temporaire à fréquence industrielle susceptible d'apparaître sur le réseau.
- Ses tensions d'amorçage suivant les formes d'ondes (fréquence industrielle, choc de manœuvre, choc de foudre...), elles sont définies statistiquement.
- Son pouvoir d'écoulement de courant de choc, c'est-à-dire la capacité de dissipation d'énergie. On traduit généralement la capacité d'absorption par la tenue à des ondes rectangulaires de courant.

### III.2. Parafoudres à oxyde de zinc ( $ZnO$ ) [6]

Ils sont constitués uniquement de varistances et remplacent de plus en plus les parafoudres à résistances variables. Les modèles à l'oxyde de zinc (**figure III.3**) présentent une non-linéarité beaucoup plus accentuée, qui leur permet d'avoir, en l'absence d'éclateur, un courant de fuite à la tension de service de l'ordre de 100 mA. De ce fait, il est possible de maintenir les parties actives en permanence sous tension. Leur très forte non-linéarité améliore également l'efficacité de la protection aux forts courants. Les parafoudres à oxyde de zinc ( $ZnO$ ), dont l'usage tend à se généraliser, ils sont disponibles dans des réalisations adaptées aux utilisations sur réseaux aériens, en cellules ou en extension sur des accessoires de prises embrochables. Cette non-linéarité est telle que la résistance passe de 1,5 M $\Omega$  à 15 M $\Omega$  entre la tension de service et la tension au courant nominale de décharge. Ces parafoudres ont pour avantages des performances de limitation et une fiabilité accrue par rapport aux parafoudres au carbure de silicium. Ces parafoudres existent en enveloppes porcelaines pour à peu près toutes les tensions de service.

#### III.2.1. Principe de fonctionnement des varistances

Les varistances à  $ZnO$  sont constituées d'une juxtaposition de cristaux de  $ZnO$  formant un matériau poly-cristallin. Ces cristaux présentent des caractéristiques d'un semi-conducteur de type  $N$  : la conductivité est de type thermoélectrique. La non-linéarité entre le courant et la tension est accentuée par l'adjonction de dopants ( $B_i, C_o, M_n, N_i \dots$ ). La courbe de courant tension (**figure III.4**) comporte plusieurs zones distinctes, chacune d'elles étant caractérisée par un régime particulier de conduction.

- a) Zone ohmique : elle correspond à un fonctionnement linéaire où la densité de courant est de l'ordre de quelques nA/cm<sup>2</sup> ; cette zone n'est plus exploitée dans la protection [2].

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

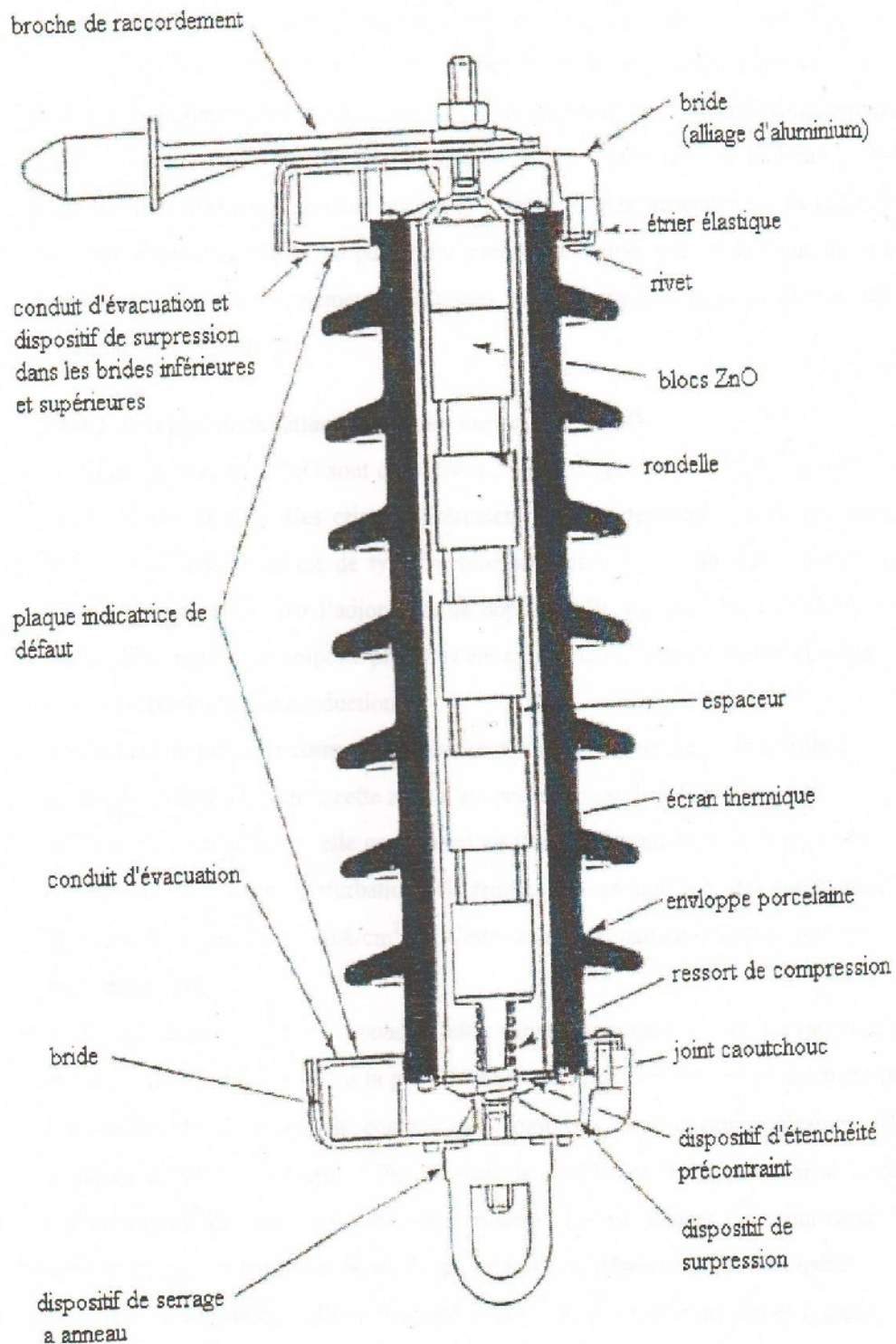


Figure III.3 : Parafoudre à oxyde de zinc ( $ZnO$ ) [2].

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

- b) Zone de pré avalanche : elle correspond au fonctionnement à l'état de repos de la varistance, en absence de toute perturbation électrique. Le phénomène de conduction est activé thermiquement (quelques  $\mu A/cm^2$ ). Cette zone est particulièrement importante pour les applications [2].
- c) Zone avalanche : elle correspond à l'effet varistance proprement dit. La variation du courant  $I$  en fonction de la tension  $V$  est la plus élevée et peut être présente empiriquement par :

$$I = k V^N$$

Avec :  $N$ : Coefficient de non-linéarité.

Les valeurs de la densité de courant sont comprises entre quelques dizaines de  $\mu A/cm^2$  et quelques dizaines de  $A/cm^2$  par ailleurs, le coefficient de non-linéarité  $N$  passe par le maximum pour des valeurs proche de  $1 mA/cm^2$  [2]. Les varistances  $ZnO$  sont caractérisées dans cette zone, par une tension de seuil  $V_s$  qui est très peu dépendantes de la température.

- d) Zone de saturation : elle correspond à des densités de courant élevés (quelques centaines d' $A/cm^2$  ou plus), c'est-à-dire le fonctionnement de varistances en écrêtage, la relation entre la densité de courant et la tension tend à devenir ohmique pour des densités de courant dépassant  $10\ 000 A/cm^2$  [2]. Dans ce cas, la conductivité est limitée par la résistivité des cristallines de  $ZnO$ .

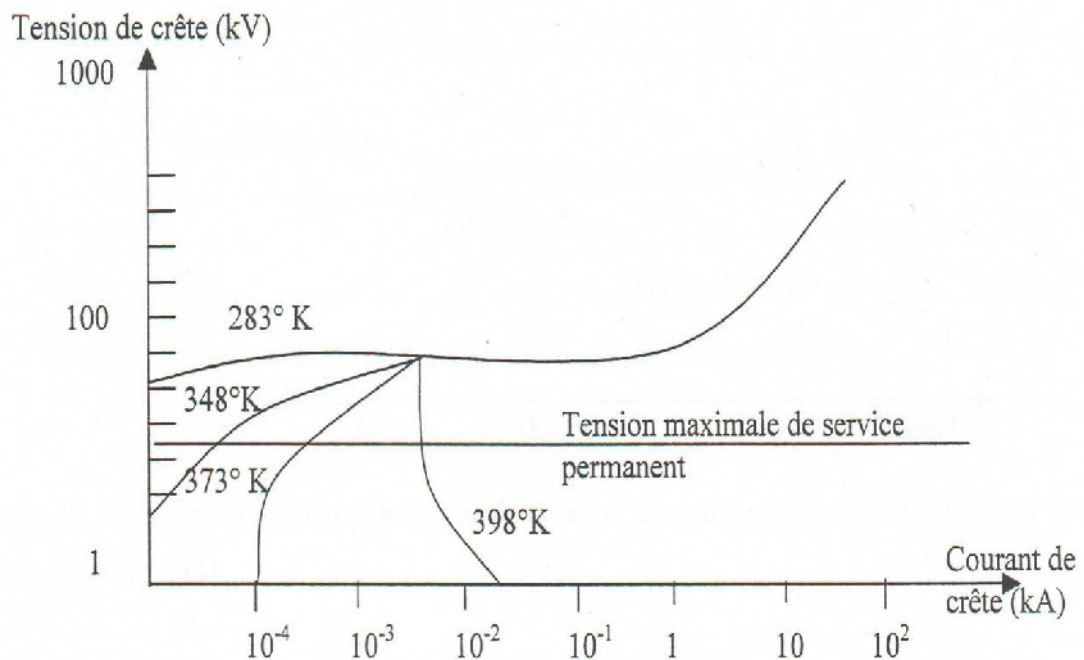


Figure III.4 : Caractéristique statique d'une varistance  $ZnO$  [2].

### • Caractéristiques

Un parafoudre à  $ZnO$  est caractérisé par :

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

- Sa tension maximale de service permanent ;
- Sa tension assignée qui peut être liée, par analogie avec les parafoudres au carbure de silicium, à la tenue aux surtensions temporaires ;
- Le niveau de protection, défini arbitrairement comme la tension résiduelle du parafoudre soumis à un choix de courant donné (5,10 ou 20 kA selon la classe), onde 8/20 ms [6];
- Courant nominale de décharge ;
- Tenue aux courants de choc. (Elle traduit le besoin de tenue à des ondes longues entraînant une dissipation d'énergie importante et non la nécessité d'écouler de tels courants en exploitation).

### III.3. Parafoudre à enveloppes synthétique [6]

On rencontre les parafoudres à enveloppes synthétiques (fibre de verre plus résine) dans les réseaux de distribution. L'humidité est en effet la principale cause de défaillance identifiée sur les parafoudres  $ZnO$ . L'extérieure de ces parafoudres est généralement constitué de polymère silicone assurant la tenue à l'environnement et la reconstitution de lignes de fuite suffisantes. Ces parafoudres, pour leur constitution interne et leurs enveloppes silicones, sont beaucoup plus tolérants sur les positions d'installation et permettent également d'optimiser la mise en œuvre (par exemple : montage à l'horizontale).

En résumé il apparait que ces différents types de parafoudres sont utilisés pour la protection d'appareillage, de transformateurs et de câbles. Dans ce cas la quasi-totalité des dispositifs mis en service sont des parafoudres à oxyde de zinc qui remplacent progressivement les éclateurs à cornes et les parafoudres au carbure de silicium. Cette évolution vise à obtenir une meilleure précision des niveaux de protection permettent de mieux garantir la coordination des isolements.

### III.4. Avantages des parafoudres [6]

Leurs avantages est de ne pas présenter de courant de suite et d'éviter que le réseau soit mis en court-circuit, puis hors tension après amorçage. Leurs avantages sur l'éclateur est :

- Une dispersion moins grande de la tension d'amorçage ;
- Une extinction spontanée de l'arc, le parafoudre limite l'amplitude et la durée des courants de suite sans que les disjoncteurs du réseau n'aient à fonctionner ;
- Une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après amorçage, évitant aussi la transmission d'une onde de tension coupée ;
- Une insensibilité (jusqu'à un certain point) aux agressions extérieurs.

### III.5. Fonctionnement [6]

Leur principe de fonctionnement est très simple et repose sur la caractéristique fortement non-linéaire des varistances à  $ZnO$ . Cette non-linéarité est telle que la résistance passe de 1,5 M $\Omega$  à 15  $\Omega$  entre la tension du service et la tension au courant nominal de décharge. A la tension maximale d'exploitation  $U_c$  il ne passe qu'un faible courant capacitif de l'ordre

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

du  $mA$ . Une augmentation supplémentaire de la tension est limitée à la valeur spécifique de la tension résiduelle. Après l'amortissement de l'onde de surtension, le parafoudre revient aussitôt à l'état de non ou de faible conduction. Le parafoudre à oxyde de métallique transforme l'énergie de l'onde de surtension en chaleur qu'il évacue vers l'environnement.

### III.6. Distance de protection [6]

Le parafoudre ne joue son rôle protecteur que sur une distance limitée  $l$ . Ce paramètre est lié au niveau de protection du parafoudre (tension résiduelle  $U_p$ ) et à la raideur  $S$  du front de l'onde. Sa valeur est calculée avec l'équation donnée ci-dessous, et suppose le cas le plus défavorable avec réflexion d'onde complète à une extrémité ouverte. Sachant que les parafoudres n'offrent pas tous le même niveau de protection, leur distance de protection varie également. Plus la distance séparant le parafoudre et l'équipement est courte, meilleure est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection maximale, le parafoudre doit être installé près de l'équipement, voire directement intégré à celui-ci. Cette notion de distance de protection doit impérativement être prise en compte lors de l'implantation, dans un poste, des parafoudres ou des éclateurs de protection des matériels.

#### • Calcul de la distance de protection avec réflexion complète de l'onde [6]

Le parafoudre écrête à une tension  $U_p$ . S'il est situé à une distance élevée, la tension maximale au niveau du matériel à protéger sera donc  $2U_p$ . Or, la tenue au choc du matériel est généralement inférieure à  $2U_p$ . Pour pallier cet inconvénient, on installe le parafoudre à une distance inférieure à la distance de protection  $l$ . Le parafoudre subit alors la somme de l'onde incidente et de l'onde réfléchi. Il amorce donc pour une onde incidente inférieure à  $U_p$ . En supposant qu'au point de raccordement du matériel, l'onde est totalement réfléchi, la surtension au niveau du matériel est limité à  $U = U_p + 2S \frac{l}{V}$  pour une tension de tenue au choc de foudre  $U_{BIL}$ , il faut que le parafoudre soit situé à  $l$  telle que :

$$U_p + 2S \frac{l}{V} \quad \text{D'où :} \quad l = \frac{U_{BIL} - U_p}{2S} \cdot V$$

$l$ : Distance de protection ( $m$ ).

$U_{BIL}$ : Tension de tenue au choc de foudre ( $kV$ ).

$BIL$ : Niveau de tenue au choc de foudre standard ( $1,2/50 \mu s$ ).

$BSL$ : Niveau de tenue au choc de manœuvre standard ( $250 \times 2500 \mu s$ ).

$U_p$ : Niveau de protection du parafoudre ( $kV$ ) ; égal à la tension résiduelle.

$S$ : Raideur de l'onde de surtension (environ  $1200 kV/\mu s$ ).

$V$ : Vitesse de propagation de l'onde. Dans une ligne aérienne environ  $300 m/\mu s$ , dans un câble souterrain environ  $1200 m/\mu s$ .

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

Alors que la distance de protection s'accroît lorsque la tension résiduelle  $U_p$  diminue, elle décroît si la raideur de l'onde  $S$  augmente. En cas de choc de foudre éloigné, une raideur d'environ  $1200 \text{ kV}/\mu\text{s}$  est typique.

### III.7. Implantation [6]

Les parafoudres protègent les appareils uniquement quand ceux-ci se trouvent à l'intérieur du périmètre de protection. Cette distance de protection n'est que de quelques mètres. La longueur des raccordements est déterminante. Les parafoudres doivent être placés au voisinage immédiat des transformateurs. En effet, du fait qu'ils présentent une grande impédance, il y aura réflexion et donc augmentation locale de la tension. La combinaison des ondes peut conduire à des nœuds et des ventres de tension. Un parafoudre placé à quelques dizaines de mètres peut très bien se trouver dans un nœud et ne jamais s'amorcer. Dans les grands postes, il y a même intérêt à placer plusieurs parafoudres sur les mêmes barres. Les parafoudres doivent être placés à raison un par phase. Liaison à la terre s'effectue par une ligne de terre aussi courte que possible et une prise de terre de très faible résistance.

## IV. Paratonnerre

C'est un dispositif supprimant les surtensions dues à des coups de foudre directs, en écoulant le courant vers la terre. Il existe deux types de paratonnerres.

### IV.1. Paratonnerre à tige (tige de Franklin)

c'est une simple tige en fer, verticale et pointue, édifiée en partie haute d'une structure, de façon à être le point d'impact en cas de coup de foudre, sa mise à la terre est assurée par le biais d'une descente dont sa prise de terre doit être munie d'une impédance aussi faible que possible. Son rôle consiste à [2] :

- . L'amplification du champ électrique à sa pointe ;
- . L'aménagement d'un espace permettant le démarrage de la décharge ascendante ;
- . Le détournement de la décharge descendante ;
- . Création d'une zone de protection contre la foudre.

### IV.2. Paratonnerre à dispositif d'amorçage

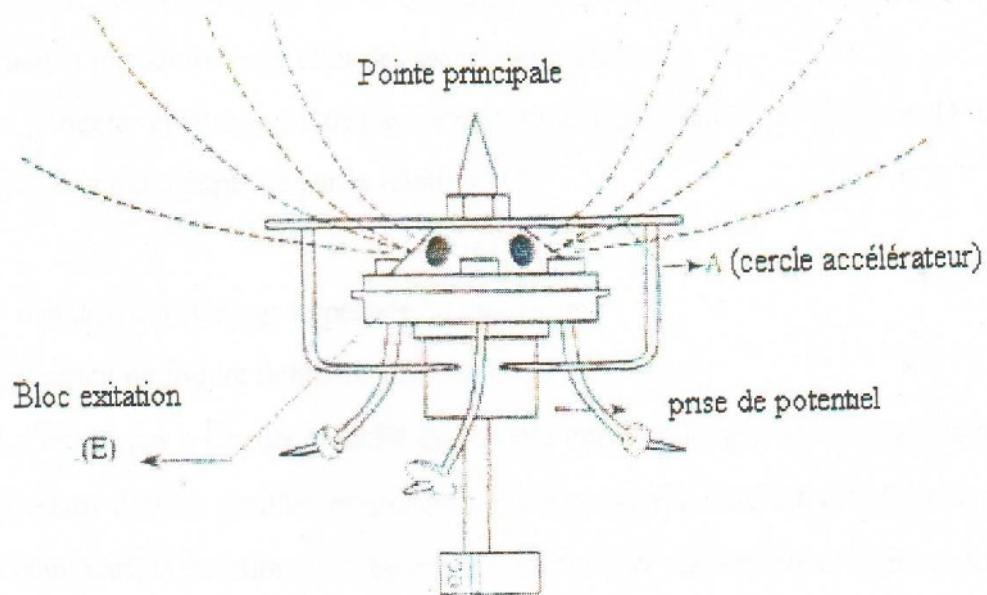
Paratonnerre ionisant : c'est un paratonnerre classique, munis d'une source ionisante qui permet le maintien d'un grand nombre d'électrons germe à l'extrémité de la tige, afin d'augmenter la conductivité locale d'air à la pointe. Ces types de paratonnerres, protégeant une zone plus grande du fait qu'ils développent un traceur ascendant plutôt qu'une tige

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

simple. Ce traceur ascendant rejoindra donc le traceur descendant, tout en augmentant ainsi le rayon de protection [2].

Paratonnerre radioactif : en substituant la source ionisante par une substance radioactive, on obtient un paratonnerre à source radioactive. L'émission du rayonnement provoque une forte ionisation de l'air au tour de la pointe du paratonnerre d'où la création d'un site favorisant l'anticipation de la décharge ascendante (**figure III.5**).



**Figure III.5** : Eléments du paratonnerre à dispositif d'amorçage [2].

Paratonnerre à haute tension impulsionnelle (pulsar) : ce type de paratonnerre à un dispositif d'amorçage qui génère des impulsions de haute tension à fréquence et à amplitude contrôlées, permettent la réduction du retard de la formation de la décharge de capteur et favoriser sa propagation au cours des premières étapes de son développement (**figure III.6**).

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

1 : Pointe de longueur 75 cm et diamètre 18 mm que soit le modèle pulsar.

2 : Disque métallique de diamètre et d'épaisseur différents selon le modèle pulsar.

3 : Cylindre métallique contenant le dispositif électrique.

4 : Tige de pulsar de diamètre extérieur 30 mm.

5 : Collier de raccordement pour fixation du conducteur de terre.

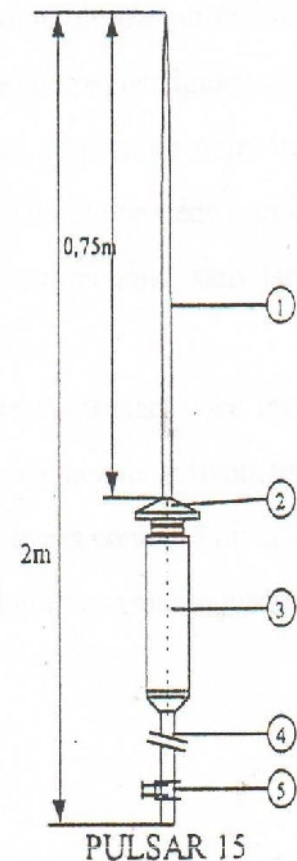


Figure III.6 : Paratonnerre pulsar [2].

### IV.3. Modèle électro géométrique

Il a pour objet la prédétermination des points d'impacts les plus probables de la foudre, afin de pouvoir apprécier l'ampleur des dégâts éventuels et le pouvoir des dispositifs de protections appropriés le problème à résoudre pour élaborer un modèle de foudroiement consiste à analyser les conditions de développement de la décharge ascendante puis de sa jonction avec le traceur descendant et introduire à cet effet des valeurs numériques.

Le modèle électro géométrique définit essentiellement une distance  $d$  dite « distance d'amorçage » ; qui s'exprime par la relation [2] :

$$d = \alpha I^\beta \quad \text{Où : } d: \text{ Distance d'amorçage exprimée en } (m).$$

$I$ : Courant de foudre donnée en (kA).

Il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle universellement reconnu et les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  varient dans d'assez grande proportions :  $\beta$  est compris entre 0,6 et 0,8,  $\alpha$  est entre 6 et 10. Ce dernier étant parfois en fonction de la hauteur de la structure susceptible d'attirer la foudre [2]. Notons que dans la plupart des cas, la relation  $d = 10 \cdot I^{2/3}$  est entièrement satisfaisante.

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

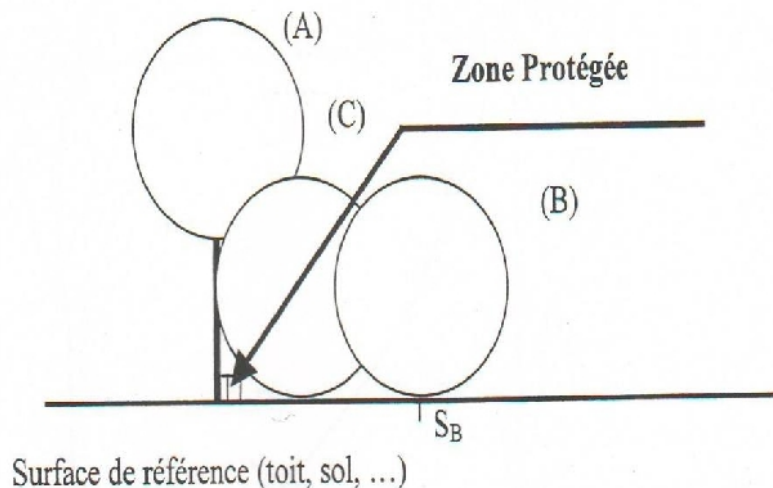
### IV.4. Mise en œuvre du modèle électro géométrique

#### IV.4.1. Principe de la méthode

Selon le modèle électro géométrique, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera, le premier, à la distance d'amorçage du traceur descendant, même si cet objet est le sol plat lui-même. Tout se passe comme si la pointe du traceur était entourée d'une sphère fictive, de rayon, centrée sur elle. Cette sphère accompagne rigidement la pointe d'un traceur dont la trajectoire est aléatoire. A l'approche du sol, le premier objet que touchera la sphère déterminera le point d'impact du coup de foudre [2]. D'où le procédé : on imagine que la sphère fictive de rayon  $d$  est roulée au sol, dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact soit avec le sol, ou un objet proéminent. Si au cours de ce mouvement, la sphère fictive entre en contact avec les dispositifs de protection ( tige verticale, fil horizontale, cage de farady), sans jamais pouvoir toucher l'un des objets à protéger, la protection de ceux-ci est assurée. Dans le cas contraire où la sphère entre en contact avec l'objet à protéger, le dispositif de protection doit être remanié jusqu'à ce qu'aucun de ces contacts ne puisse se produire.

#### IV.4.2. Définition de la zone de protection

Pour mieux mettre en évidence les propriétés des paratonnerres, nous assimilerons celui-ci à une tige verticale de hauteur  $H$  placée sur un sol plan ( $XoY$ ). Au cours de la trajectoire de coup de foudre, la sphère fictive pourra atteindre le sol suivant trois possibilités (**figure III.7**).



**Figure III.7** : Principe du modèle électro géométrique [2].

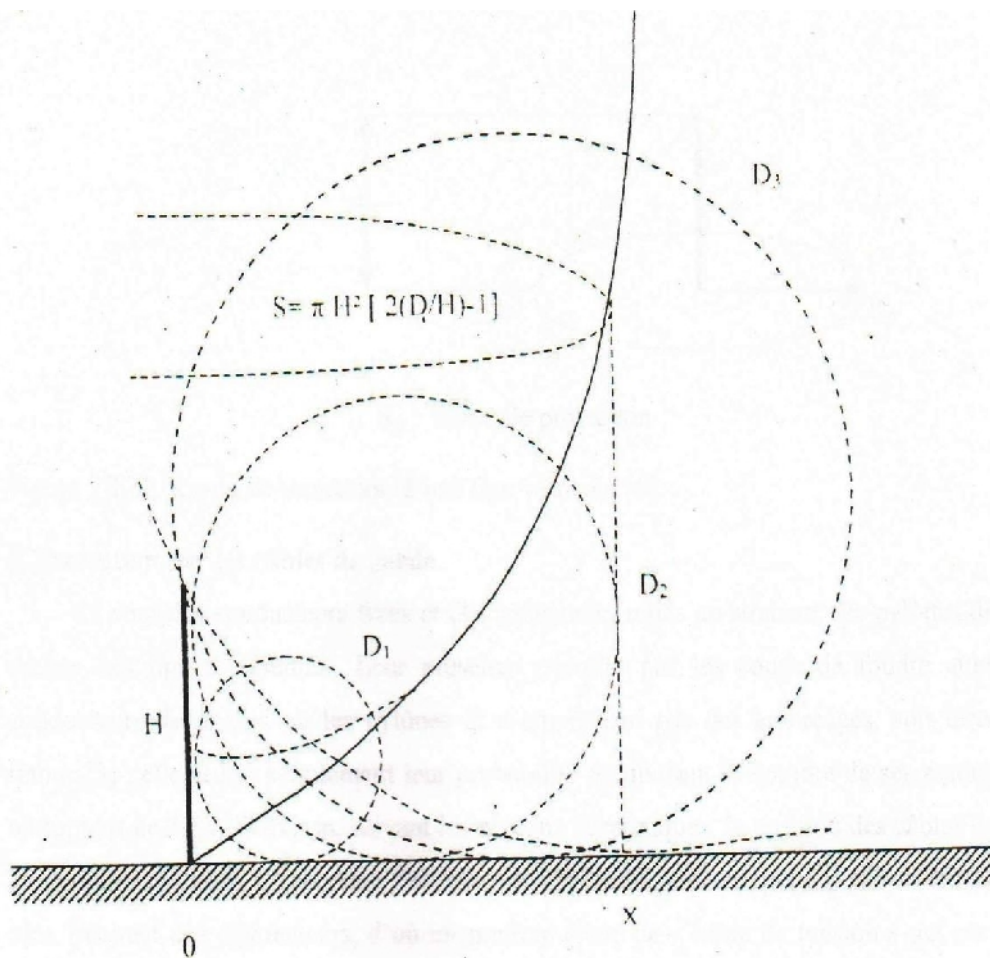
- Cas A: si la sphère entre en contact avec uniquement la tige verticale, celle-ci constituera le point d'impact du coup de foudre.

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

• Cas *B*: si la sphère entre en contact avec le sol, sans toucher la tige, le coup de foudre touchera le sol au point  $S_B$ .

• Cas *C*: si la sphère entre en contact simultanément avec la tige et le sol, le coup de foudre pourra toucher soit l'une soit l'autre, mais l'impact ne pourra jamais se produire dans la zone de protection de la tige verticale.

La zone de protection assurée par une tige verticale, dépendra de la sphère de rayon  $D_1$ , de hauteur  $H$ , correspondant à un courant de foudre  $I_1$  (**figure III.8**).



**Figure III.8** : Méthode électro géométrique [2].

En particulier, si  $D$  est inférieur à  $H$  hauteur de la tige, le courant avec celle-ci peut avoir lieu bien au-dessus de la pointe. Considérons alors l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol : le lieu des centres de ces sphères déterminera la zone d'attraction de la tige. On constate que, tant que  $D < H$ , le lieu est une droite issue du pied de la tige et inclinée à  $45^\circ$ . A l'instant où  $D$  atteint la valeur  $H$ , et pour  $D_1 > H$ , ce lieu devient une parabole  $P$ , Metant un point de cette parabole, et  $X$  sa projection à la surface du sol. La distance

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

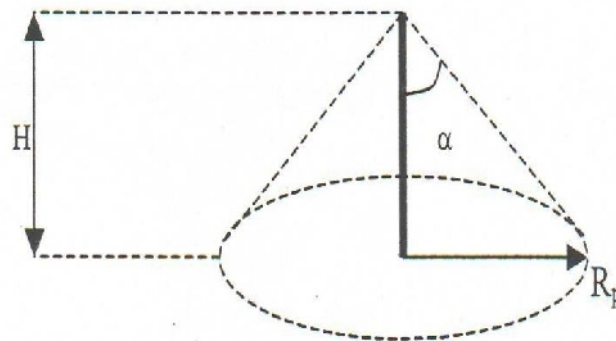
$OX$  constituera le rayon de protection de la tige (**figure III.9**), relative à un coup de foudre d'une intensité donnée. Cette distance est donnée par l'expression :

$$OX = H\sqrt{(2D/H) - 1}$$

Avec :  $OX$ : Rayon de protection de la tige ( $m$ ).

$H$  : Hauteur de la tige ( $m$ ).

$D$  : Rayon de la sphère ( $m$ ).



$R_p$  : rayon de protection

**Figure III.9** : Rayon de protection d'une tige verticale [2].

### V. Câbles de garde

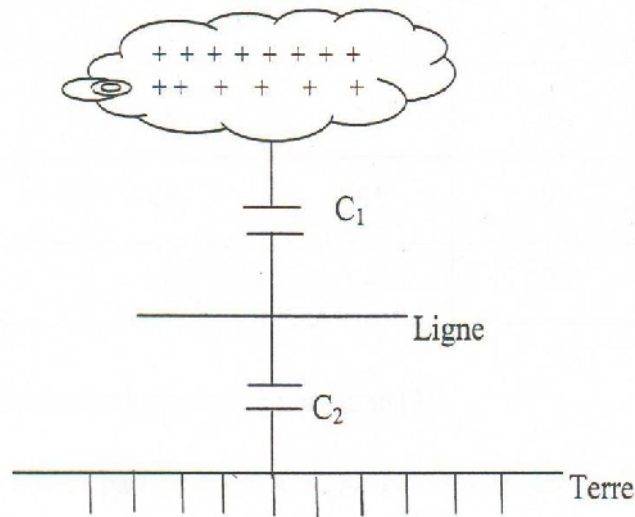
Ce sont des conducteurs fixés et électriquement reliés au sommet des pylônes disposés au-dessus des lignes aériennes. Leur présence n'exclut pas les coups de foudre atteignant les conducteurs de phases où les pylônes et n'empêchent pas des amorçages, soit direct ; soit en retour [5] ; elle réduit simplement leur probabilité en divisant le nombre de ses amorçages dans un rapport de 1,5 à 5 environ, suivant les niveaux kérauniques (nombre de fois où le tonnerre a été entendue dans l'année dans une région donné [ $N_k$ ]), la position des câbles de garde ou la nature des terrains. Cependant, l'absence des câbles de garde se traduira par un fonctionnement plus fréquent des disjoncteurs, d'où un nombre élevé de « creux de tension » qui nécessite des réenclenchements rapides, triphasés et monophasés.

Leur action s'exprime par deux mécanismes différents, selon qu'il s'agit d'ondes induites par la foudre ou par des coups de foudre directs.

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

### V.1. Ondes induites

Considérons un conducteurs de ligne isolé du sol, et se trouvant sous l'influence d'un nuage chargé (**figure III.10**). Le conducteur présente des capacités  $C_1$  par rapport au nuage et  $C_2$  par rapport au sol. Si le nuage se décharge sans toucher la ligne, la surtension induite dans cette dernière sera d'autant plus restreinte que  $C_2$  sera plus grande par rapport à  $C_1$  ; il y'a donc intérêt à placer des conducteurs de ligne aussi près que possible au sol (c'est là l'une des justifications de la configuration en nappe horizontale). Comme il n'est toujours possible d'adopter cette disposition, et que d'autres parts la hauteur minimale doit être choisie suffisante, on peut accroître artificiellement la capacité  $C_2$  en tendant un conducteur au dessus de la ligne qui soit au potentiel du sol.



**Figure III.10** : Influence du nuage sur la ligne [2].

### V.2. Coup de foudre direct

Si un coup de foudre frappe la ligne, celle-ci pourrait être préservée si la décharge rencontre un conducteur relié au sol par les pylônes. Il y'a toutefois lieu de prendre deux mesures de précaution :

- Le pied du pylône doit être mis efficacement à la terre.
- Pour que le fil de terre assure une protection adéquate des conducteurs de lignes, il ne faut pas que ces derniers débordent très fort : c'est pour cette raison que les lignes à configuration horizontale sont en général munies de deux câbles de garde. Pour cela, il faut déterminer la position du câble de garde, en fonction des dimensions des pylônes pour que son efficacité vis-à-vis de la foudre soit optimale, cette position est déterminée par le modèle électro géométrique.

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

### V.3. Répartition du foudroisement d'une ligne entre les pylônes et les conducteurs

A la suite de nombreuses observations, on admet selon l'équipement en câbles de garde, les proportions de foudroisement données dans le (**tableau III.1**). Du fait de l'attraction préférentielle des pylônes, une partie des portées adjacentes à chaque pylône se trouve en quelques sortes « à l'ombre » de celui-ci.

Nombre de câbles de garde \ Foudroisement	0	1	2	3
Sur pylône (%)	55	35	20	10
Sur portée (%)	45	65	80	90
$\alpha$	1,65	1,40	1,20	1,05

**Tableau III.1** : Répartition du foudroisement d'une ligne [5].

On peut estimer que la part protégée des portées, soit  $p$ , est de l'ordre de 25 % pour les lignes sans câbles de garde, et de 5 % pour lignes à 2 ou 3 câbles de garde. Bien que cette action protectrice ait moins d'importance pratique lorsque les lignes sont équipées de tels câbles, elle intervient pour déterminer le foudroisement total de la ligne. En effet, si  $L$  est la longueur réellement touchée par la foudre se réduit à  $L(1 - p)$  [5]. En ajoutant à ce foudroisement celui qui subit les pylônes, le nombre total de coups de foudre reçue par une ligne de longueur  $L$  (par exemple pour un niveau kéraunique 30 ). S'établit à [5] :

$$N_{30} = (N_1 + N_2) \cdot L \cdot \alpha \quad \text{Où :} \quad \alpha = (1 - p) \left[ \frac{\%(\text{pylone})}{\%(portée)} + 1 \right]$$

$N_1$  : Nombre de coups de foudre touchant un conducteur (par an) de 100 km situé à une distance  $H$  du sol.

$$N_2 = \frac{3}{7L}.$$

$\alpha$  : Facteur d'influence des pylônes.

### V.3. Détermination du courant critique

Par courant critique  $I_c$ , on entend, le courant au-dessus duquel le câble de garde doit jouer son rôle protecteur. Le courant de foudre frappant un conducteur est donné par [5] :

$$I_c = 2U_f/Z_c \quad \text{Avec : } U_f: \text{ Tension d'isolement au choc de la ligne (V).}$$

$Z_c$ : Impédance d'onde de la ligne ( $\Omega$ ).

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

### V.4. Abaque de détermination de l'angle de protection

En fonction des paramètres  $Y$ ,  $C$  et  $d_c$ , l'abaque de la (figure III.11) fournit l'angle de protection théorique à considérer avec :

$Y$ : Hauteur pondérés des conducteurs au-dessus du sol ( $m$ ).

$C$ : Distance moyenne entre le conducteur et le câble de garde ( $m$ ).

$d_c$ : Distance d'amorçage critique correspondant au courant critique  $I_c(kA)$ .

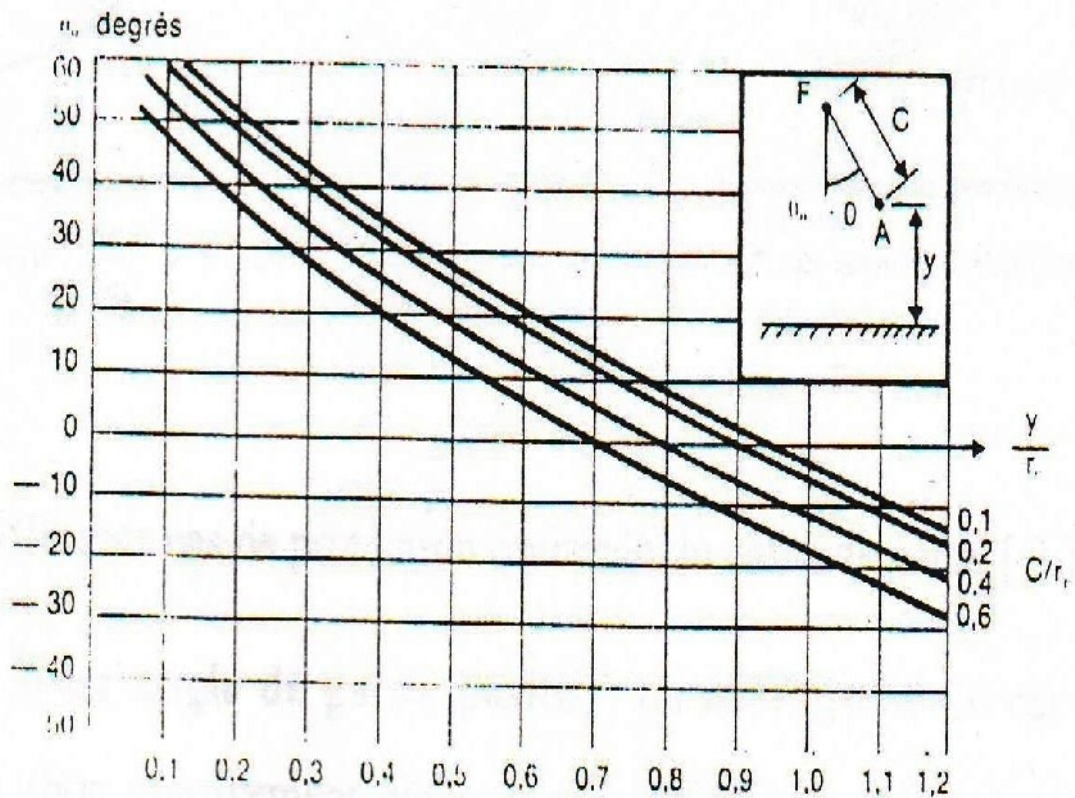


Figure III.11 : Abaque de détermination de l'angle de protection  $\theta_0$  d'un câble de garde [5].

### V.5. Nombre de fils de garde nécessaires à la protection d'une ligne

Après l'étude de la protection de l'un des conducteurs les plus exposés d'une ligne, il convient maintenant d'examiner la protection de tous les conducteurs de celle-ci. En fait, il faut déterminer le nombre et la position des fils de garde nécessaires à la protection de tous les conducteurs. Ce nombre varie selon la configuration de la ligne [5].

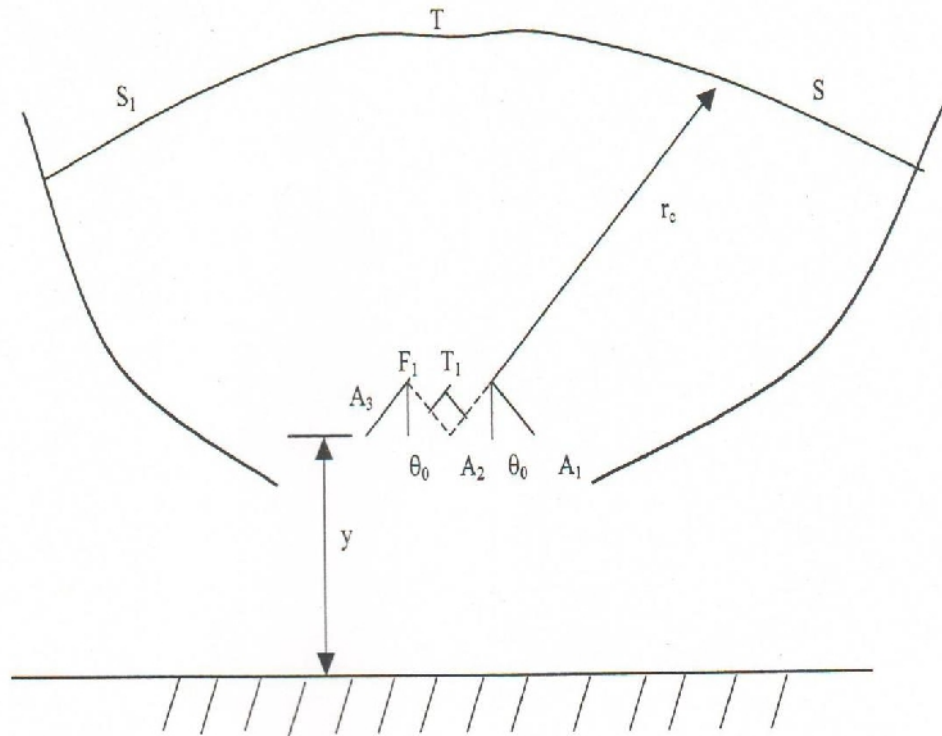
#### V.5.1. Ligne à configuration verticale (triangle, double drapeau)

Pour de telles lignes, les conducteurs sont relativement groupés près du fût du pylône, l'installation d'un seul câble de garde est suffisant pour assurer leur protection. Toutefois, il faut vérifier, en appliquant l'abaque à chacun des conducteurs, que ceux-ci sont tous protégés par ce seul câble.

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

### V.5.2. Ligne symétrique horizontale (en nappe ou nappe voûte)

En ce qui concerne ces lignes, il est évident qu'un seul câble de garde n'est suffisant que si la construction géométrique permet son emplacement dans l'axe de la ligne. Dans le cas le plus fréquent, deux câbles de garde au moins seront nécessaires, chacun protégeant l'un des conducteurs extérieurs les plus exposés. Le conducteur médian sera alors protégé, si l'une des conditions suivantes est remplie (**figure III.12**) [5].



**Figure III.12** : Condition de protection du conducteur médian d'une ligne en nappe [5].

- Soient  $S$  et  $S_1$ , les arcs des cercles centrés respectivement sur  $F$  et  $F_1$  de rayon commun  $d_c$  et soit  $T$  leur point d'intersection, au-dessus du conducteur médian  $A_2$ . On doit avoir :  $TA_2 \geq 1,1d_c$ .
- Les médiatrices de  $A_2F$  et de  $A_2F_1$  se coupent en  $T_1$ . On doit avoir :  $T_1A_2 < d_c$ . Si les deux conditions sont très largement remplies, il pourra être avantageux, pour améliorer la protection globale de la ligne, d'écartier légèrement les câbles de garde, ce qui revient à diminuer l'angle de garde.

### V.5.3. Ligne de configuration horizontale à deux ternes

Ces lignes sont très larges. La protection des deux phases intérieures peut nécessiter ou bien de surélever les deux câbles de garde ou bien d'en installer un troisième ; dans ce cas ce câble de garde sera dans l'axe de la ligne. Ici encore, les deux autres câbles de garde pourraient alors être écartés [5].

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

Remarque : les couloirs de lignes sont généralement situés près des postes et des centrales : la protection doit être alors particulièrement efficace. Si les lignes sont assez proches les unes des autres, il peut avoir protection mutuelle [5].

## Chapitre 3 : Les différents dispositifs de protections contre les surtensions de foudre

---

Chapitre 4 :

Applications

En vue de protéger les réseaux électriques et les édifices (bâtiments,.....) contre les effets directs de la foudre, on est ramené à utiliser, généralement, des dispositifs de protection appropriés, tels que les paratonnerres et les câbles de garde. Toutefois, dans les nombreux cas (postes en antenne, matériel placé à côté d'une ligne ouverte.....), cette protection n'est plus suffisante à cause des ondes de surtensions. On la complète alors par des éclateurs ou par des parafoudres. Par ailleurs, cette protection ne peut être satisfaisante que dans le cas où ces dispositifs de protection soit bien dimensionnés et susceptibles de fonctionner dans des conditions défavorables. Le nombre de dispositifs de protection à utiliser varie selon le matériel et l'étendue de la zone à protéger. Ce chapitre consacré à des applications sur la protection contre les surtensions de foudre, la première est sur la protection d'un transformateur *MT/BT* de 160 kVA, 30 kV/380 V sur poteau avec un parafoudre, la deuxième consiste la protection d'une ligne de haute tension 220 kV (en déterminant l'angle de protection).

### **I. Protection d'un transformateur *MT/BT* de 160 kVA, 30 kV/380 V sur poteau avec un parafoudre**

Les statistiques d'avaries des transformateurs utilisés par la Sonelgaz, montrent que, malgré un choix judicieux des transformateurs mis en exploitation, beaucoup d'entre eux sont sujet de pannes ou d'anomalies de fonctionnement. Parmi les causes des avaries de ces transformateurs les coups de foudre (direct et indirects), notre étude consiste à étudier la protection contre les dues aux coups de foudre indirects, deux moyenne de protection sont utilisés de manière large : les éclateurs et les parafoudres.

A propos du transformateur *MT/BT* de 160 kVA, 30 kV/380 V sur poteau, nous étudierons les mesures à prendre pour améliorer la protection de ce présent transformateur, contre la foudre. Un de nos objectifs, consiste à fournir un point de repère général de protection contre la foudre du transformateur monté sur poteau, pour assurer une meilleure installation et réduire le taux d'échec de la protection contre les coups de foudre [6].

- La longueur de séparation entre le parafoudre et le transformateur.
- Le taux d'échec de la protection.

Ces deux premières points devaient être prés en comte après avoir étudié la configuration de l'installation, la mise à la terre de l'installation, l'impédance caractéristique de l'installation, la longueur du fil de la terre du parafoudre et la densité de la foudre. Le choix du parafoudre avec une bonne tension résiduelle donne une contribution considérable à la protection du transformateur. Le rôle de la résistance à la terre et sa contribution que ce soit du côté moyenne tension ou basses tension en raison des défaillances dues à la foudre sont discutées, en indiquant le mode typique de l'échec. La détermination d'une valeur sûre de la résistance de terre est généralement présentée [6].

### I.1. Description de poste sur poteau

Notre étude sera basée sur un transformateur *MT/BT* de 160 kVA, 30 kV/380 V sur poteau. La (figure IV.1) nous montre un exemple d'un transformateur sur poteau.

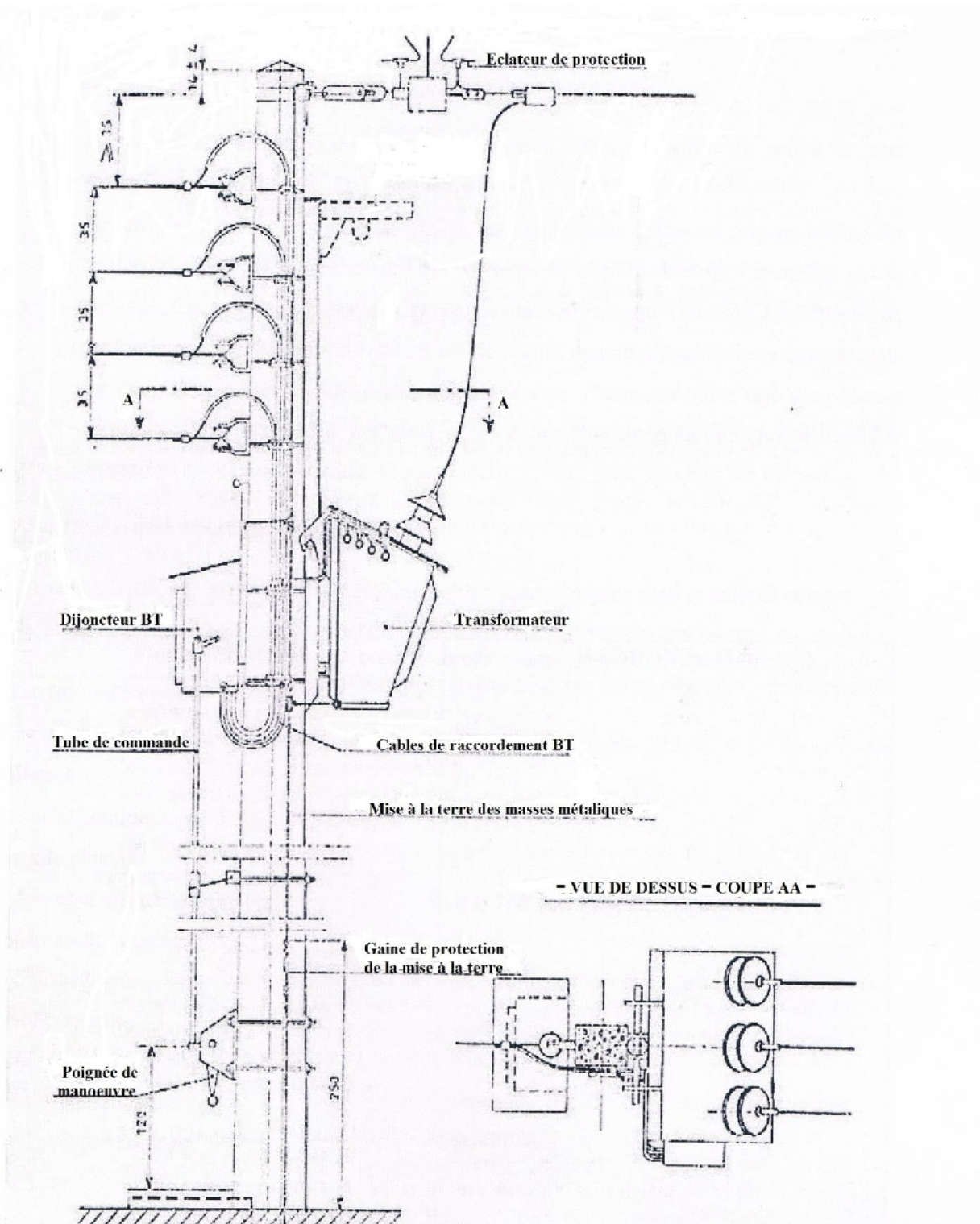


Figure IV.1 : Poste de transformation sur poteau [6].

I.2.Surtension en présence d'une puissante foudre

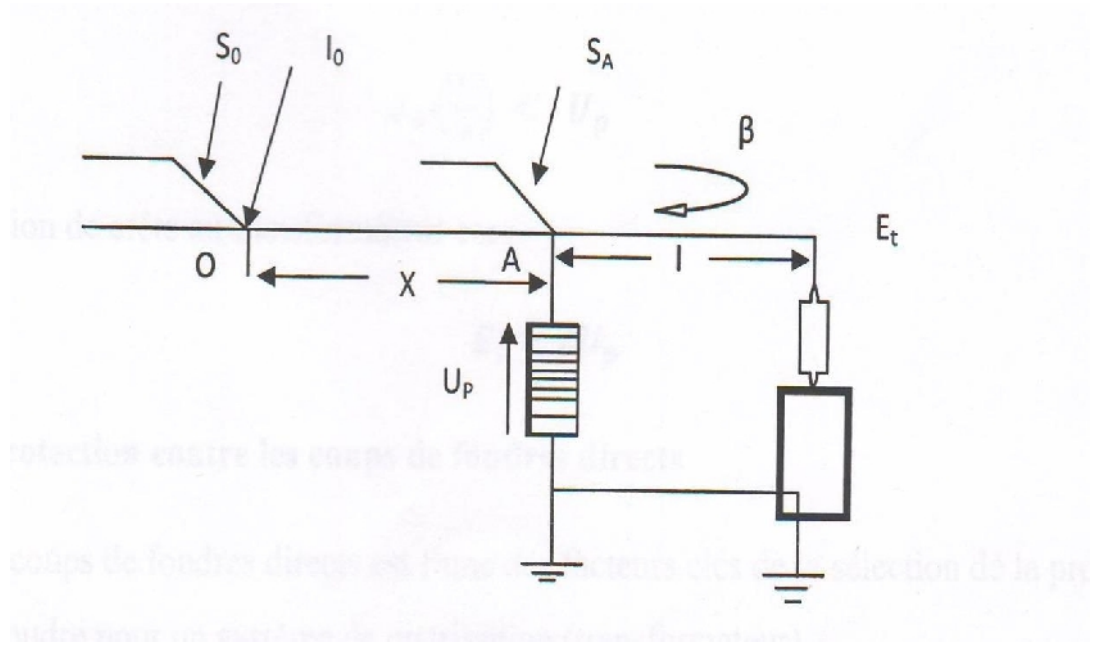


Figure IV.2 : Protection par parafoudre d'un transformateur [6].

Une surtension  $E_o$  est induite, lorsqu'un coup de foudre de courant  $I_o$  frappe le point  $O$  distant de  $X$  du point  $A$  là où le parafoudre est installé.

$$E_o = \left(\frac{I_o}{2}\right) Z \dots\dots\dots(1)$$

Avec :  $E_o$ : Surtension induite (kV).

$I_o$ : Courant de coup de foudre (kA).

$Z$ : Impédance caractéristique de la ligne (Ohm).

$$S_o = \left(\frac{I_o}{2}\right) \left(\frac{Z}{t_f}\right)$$

Où :  $S_o$ : ( $de/dt$ ): Vitesse de montée de la tension au point d'impact(kV/ $\mu$ s).

$t_f$ : Temps de front d'onde ( $\mu$ s).

Puisque l'onde se déplace, sa pente sera réduite au point  $A$  et qui sera :

$$S_A = \frac{1}{\frac{1}{S_o} + kX} \dots\dots\dots(2)$$

Avec :  $k = 1,5 \times 10^{-6}$  ( $\mu$ s/kV.m)

$S_A$ : ( $de/dt$ ): Le taux de montée de la tension à la fin de réception A(kV/ $\mu$ s).

$X$ : Distance d'itinéraire de l'onde de surtension de foudre (m).

## Chapitre 4 : Applications

---

En utilisant la théorie de réflexion, le pic de surtension à la borne primaire moyenne tension du transformateur est :

$$E_t = U_p + \beta S_A \left( \frac{2l}{V} \right) \dots\dots\dots (3)$$

Où :  $E_t$  : Surtension de crête du transformateur (  $kV$ ).

$U_p$  : Tension résiduelle du parafoudre (  $kV$ ).

$\beta$ : Coefficient de réflexion de l'onde surtension qui arrive au transformateur.

$l$ : Longueur de séparation entre le parafoudre et le transformateur (  $m$ ).

$V$ : Vitesse de propagation des ondes (  $m/\mu s$ ).

Dans la pratique la résistance du transformateur est beaucoup plus grande que celle de la ligne, par conséquent et en général on peut supposer que le coefficient de réflexion  $\beta = 1$  avec cette hypothèse :

$$E_t = U_p + S_A \left( \frac{2l}{V} \right) \dots\dots\dots (4)$$

Cette expression est valable pour:  $S_A \left( \frac{2l}{V} \right) < U_p$  .

La surtension de crête au transformateur est :

$$E_t = 2U_p$$

### I.3. Protection contre les coups de foudre directs

Les coups de foudre directs est l'une des facteurs clés de la sélection d'une protection contre la foudre pour un système de distribution (transformateur). Le nombre de coups de foudre directs dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- La hauteur de la ligne.
- La distance horizontale entre les conducteurs de phases.
- Le facteur de blindage.
- La densité de foudroiement au sol.

Le nombre de coups de foudre directs, peut être calculé comme suit :

$$N = N_g(b + 28H^{0,6})(1 - S_f)10^{-6}X \dots\dots\dots(5) \quad \text{coup/km.}$$

Avec :

$N$ : Nombre de coups de foudre directs.

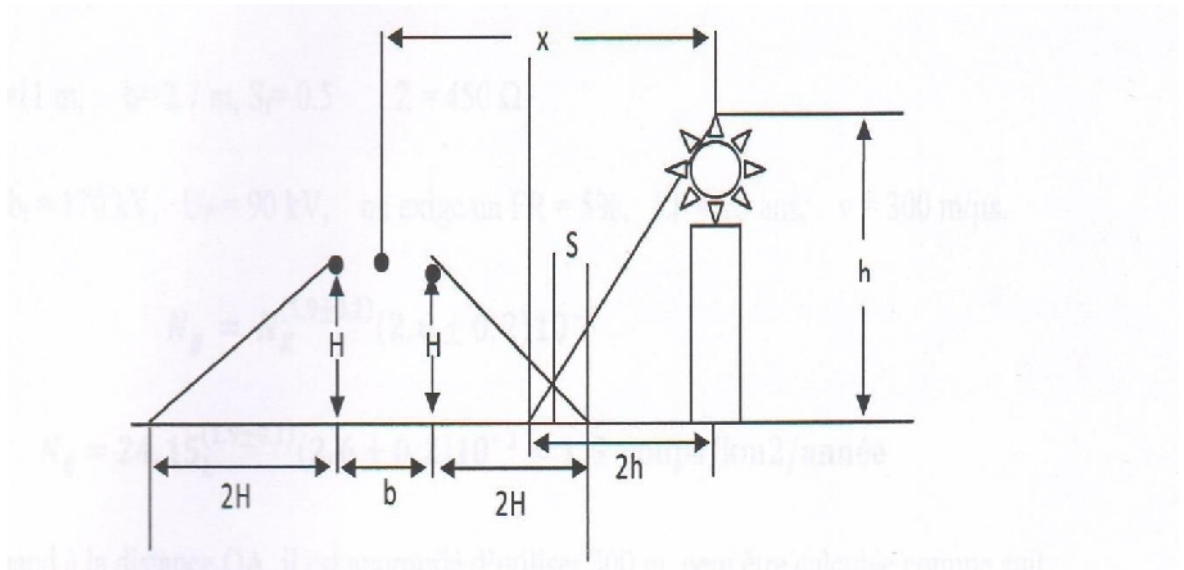
$N_g$ : Nombre de coups de foudre par  $km$  et par années.

$b$ : Portée horizontale entre les conducteurs externes ( $m$ ).

$H$ : Hauteur de la ligne au-dessus du sol ( $m$ ).

$S_f$ : Facteur de blindage dû aux objets proches.

Pour un arrangement comme la (**figure IV.3**) l'indique, le facteur de blindage  $S_f$  varie ainsi :  $0,3 < S_f < 0,5$ , dans un tel système  $h = H$  et  $x = X$ .



**Figure IV.3** : Protection en raison de proximité aux objets [6].

Même si aujourd'hui ce transformateur sera protégé par un parafoudre, il peut enregistrer encore un taux d'échec élevé. La plus part de ces échecs semble être en raison de la longueur de séparation excessive entre le parafoudre et le transformateur.

### I.3.1. Etude de système de protection

La position du parafoudre doit être déterminé afin d'assurer que le taux d'échec sera au-dessus d'une valeur au cours de la durée de vie du transformateur. Pour avoir un taux d'échec inférieur à  $FR(\%)$ , le transformateur doit être protégé contre la foudre qui se produit qu'une seul fois en  $t_s$  ans, avec :

$$t_s = \left( \frac{t_f}{FR} \right) \cdot 100$$

Où :  $t_s$ : Durée entre deux éclaires de surtension qui causent des dommages au transformateurs (en année).

$t_f$ : Temps de front d'onde ( $\mu s$ ).

## Chapitre 4 : Applications

*FR*: Le taux d'échec (%).

Le nombre de coup de foudre reçus par le segment *OA* de la (**figure IV.2**) pendant  $t_s$  est :

$$N_s = N \cdot t_s \cdot X$$

Pour éviter tout échec, le transformateur doit être protégé contre les coups de foudres qui sont égaux au moins graves que ceux qui peuvent se produire qu'une fois tous les  $N \cdot t_s \cdot X$ .

$$(P_{I_o}) = \left( \frac{1}{N \cdot t_s \cdot X} \right) \cdot 100\% : \text{Probabilité d'obtenir un coup de foudre en dehors de } N \cdot t_s \cdot X.$$

Ainsi le transformateur doit être protégé contre les surtensions de foudre de courant ( $I_o$ ) qui a une probabilité ( $P_{I_o}$ ) supérieure à la valeur ( $I_o$ ). L'étude suivante consiste à déterminer la distance séparant le parafoudre et le transformateur.

A 30 kV, 3 fils de distribution pour la ligne, avec un niveau kéraunique de 24,15 *jours* à son emplacement.

$$H = 11m, \quad b = 2,7m, \quad S_f = 0,5, \quad Z = 450 \text{ Ohm}, \quad N_c b_t = 170 \text{ kV}.$$

$$U_p = 90 \text{ kV}, \quad \text{On exige un } FR = 5\%, \quad LF = 25 \text{ ans}, \quad V = 300 \text{ m}/\mu\text{s}.$$

$$N_g = N_k^{(1,9 \pm 0,1)} (2,6 \pm 0,2) 10^{-3}$$

$$N_g = 24,15_k^{(1,9 \pm 0,1)} (2,6 \pm 0,2) 10^{-3} = 1,5 \text{ coups}/2\text{km}^2 / \text{année}$$

Avec :

$N_c b_t$ : Niveau d'isolement de base du transformateur (kV).

$N_g$ : Nombre de coups de foudre par km et par année.

$k$ : Constante d'amortissement ( $\mu\text{s}/\text{kV} \cdot \text{m}$ ).

Quant à la distance *OA*, il est approprié d'utiliser 300 m, peut être calculée comme suit :

$$N = 1,5(2,7 + 28,11^{0,6})(1 - 0,5) \cdot 10^{-6} \cdot 300 = 0,0271 \text{ coup}/\text{année}.$$

Le temps autorisé entre deux coups de foudre dommageable est :

$$t_s = \frac{25}{0,05} = 500 \text{ ans}.$$

Par conséquent ( $P_{I_o}$ ) du courant de foudre ( $I_o$ ) pour lequel la tension est requise est donnée par :

$$P_{I_o} = \frac{1}{(0,0271 \times 500)} = 0,073.$$

Avec:  $P_{I_o}$ : Probabilité d'obtenir un coup de foudre en dehors de  $N \cdot t_s \cdot X$ .

## Chapitre 4 : Applications

---

Comme la montre la **(figure IV.2)**, à partir des informations disponibles dans (7) et (8), la probabilité  $P_{I_o}$  du courant de foudre excède la même valeur, peut raisonnablement être calculée par l'équation (6) :

$$P_{I_o} = e^{-0,02878I_o} \dots\dots\dots(6)$$

$$P_{I_o} = e^{-0,02878I_o} = 0,073 \Rightarrow I_o = 91 \text{ kA.}$$

La valeur raisonnable supposée pour le front d'onde est de moment :  $t_f = 1,2 \mu\text{s}$ .

Pour  $I_o$  de 91 kA qui frappe la ligne de 300 m à A, d'après l'équation (2),  $S_A$  peut être calculée comme suit :

$$S_A = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{I_o}{Z}\right)\left(\frac{Z}{t_f}\right)} + kX}$$

$$\text{AN: } S_A = \frac{1}{\frac{1}{\frac{91 \times 450}{2 \times 1,2}} + 1,5 \times 10^{-6} \times 300} = 1966 \text{ kV}/\mu\text{s}.$$

Avec une certaine marge de sécurité dans le transformateur, l'équation (3) peut être réorganisé pour obtenir la longueur de séparation entre le parafoudre et le transformateur, et qui sera donnée comme suit :

$$l = \frac{(0,8 \times E_t - E_p)V}{2S_A} \dots\dots\dots(7)$$

Avec la substitution des valeurs, on aura :

$$l = \frac{(0,8 \times 170 - 90) \times 300}{2,1966} = 3,5 \text{ m.}$$

En supposant que la protection contre la foudre est conçus par  $S_A$ , et ce système de protection sera efficace pour n'importe quelle valeur au-dessus de  $I_o$  avant l'origine  $O$ . Si le même coup de foudre  $I_o$  (91 kA) atteint la limite après  $O$ , la protection sera inefficace puisque  $S_A$  sera plus grand que celui qu'a été conçu. Ainsi, même de faibles valeurs des courants de foudre qui frappe entre  $O$  et  $A$  peuvent provoquer une hausse de  $S_A$ , celle pour laquelle la protection est conçue. Par conséquent le taux d'échec sera beaucoup plus grand que  $FR\%$ .

### I.4. Amélioration de méthode de protection

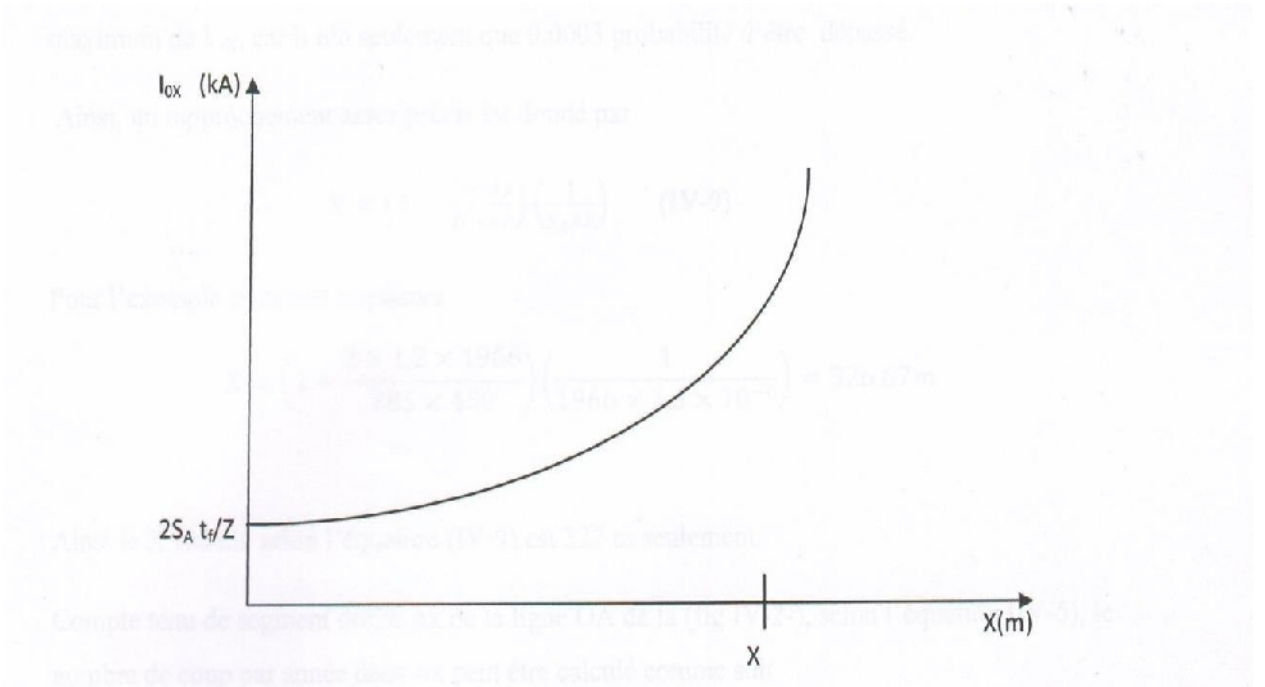
Après avoir examiné les inconvénients du système existant, cette méthode d'amélioration est proposée afin de réduire le taux d'échec de la protection **(figure IV.4)** :

$I_{ox}$  est le courant de foudre qui provoque la pente de l'onde incidente qui est supérieure à  $S_A$ , après avoir atteint la ligne à une distance  $X$  loin de  $A$ .

En substituant (1) dans (2),  $X$  qui sera  $x$ , la valeur de  $I_{ox}$  prévue et qui provoque  $S_A$  à  $A$ , peut être calculé ainsi :

## Chapitre 4 : Applications

$$I_{ox} = \frac{2t_f \times S_A}{(1 - S_A \times k \times X)Z} \dots\dots\dots (8)$$



**Figure IV.4** : Variation de  $I_{ox}$  (kA) en fonction de  $X$  (m) [6].

Par conséquent, tout coup de foudre frappant la ligne à  $X$  excédant la valeur  $I_{ox}$  causera ( $de/dt$ ) pour être supérieure à  $S_A$  à  $A$ . La (**figure IV.4**) montre la variation de  $I_{ox}$  avec la distance  $X$  de  $A$ . Pour une valeur infinie de  $I_{ox}$ , d'après l'équation (8), la valeur  $X$  peut être calculée comme suit :

$$X = \frac{I_{ox}Z - 2t_f S_A}{I_{ox} S_A k Z} = \frac{1}{S_A k} - \frac{2t_f}{k I_{ox} Z} \quad \left( \frac{2t_f}{k I_{ox} Z} = 0 \text{ car } I_{ox} \rightarrow \infty \right)$$

Alors on a :

$$X = \frac{1}{S_A \times k}$$

Pour presque tous les cas pratiques, il convient de choisir 285 kA comme le maximum de  $I_{ox}$ , car il n'a seulement que 0,0003 probabilité d'être dépassé. Ainsi, un rapprochement assez précis est donnée par :

$$X = \left( 1 - \frac{2t_f \times S_A}{285 \times Z} \right) \left( \frac{1}{S_A \times k} \right) \dots\dots\dots (9)$$

Pour l'exemple ci-dessus considéré :

$$X = \left( 1 - \frac{2 \times 1,2 \times 1966}{285 \times 450} \right) \left( \frac{1}{1966 \times 1,5 \times 10^{-6}} \right) = 326,67 \text{ m.}$$

Ainsi le  $X$  calculé selon l'équation (9) est 327 m seulement. Compte tenu de segment droite  $\Delta x$  de la ligne  $OA$  de la (**figure IV.2**), selon l'équation (5), le nombre de coup par année dans  $\Delta x$  peut être calculé comme suit :

## Chapitre 4 : Applications

---

$$N = N_g(b + 28H^{0,6})(1 - S_f)10^{0,6}\Delta x$$

Ensuite le nombre de coups par ans sur  $\Delta x$ , qui provoque une plus grande ( $de/dt$ ) par rapport à  $S_A$  à  $A$  est :

$$N_f = P_{I_o} \times N_g((b + 28^{0,6}/1 - S_f)10^{-6}\Delta x$$

Avec :

$N_f$ : Nombre de coups de foudre qui arrive à  $A$  avec une pente supérieure à  $S_A$  par année.

$\Delta x$  : Segment droite de la ligne  $OA$  ( $m$ ).

( $PI_{ox}$ ) Peut être calculé par l'équation (6), en substituant  $I_o$  avec  $I_{ox}$ .  $I_{ox}$  est donc remplacé par l'équation (8).  $X$  est calculée par l'équation (9) pour les conditions données. En intégrant par rapport à  $X$ , le nombre total de charges reçus à  $A$  par an avec ( $de/dt$ ) excédant la valeur  $S_A$  peut calculée par :

$$N_f = N \int_0^x e^{-I(x)} dx \quad \text{coup/année} \dots \dots \dots (10)$$

$$I(x) = 0,02878 \left( \frac{2t_f}{z} \right) \left( \frac{S_A}{1 - S_A \times k \times x} \right)$$

Donc :

$$N = N_g(b + 28H^{0,6})(1 - S_f)10^{-6}$$

Pour l'exemple considéré plus haut, pour  $S_A$  de  $1966 \text{ kV}/\mu s$ ,  $x = 327 \text{ m}$ , pour en avoir  $N_f$ . Par conséquent, le nombre total de surtensions dans la vie égale a  $N_f - L_f$ . Ainsi le transformateur recevra ( $L_f$ ) surtensions dépassant la valeur  $S_A$  au cours de la  $L_f$ , et par conséquent le transformateur échouera certainement avant la fin de la  $L_f$ .

Le temps moyenne entre deux pics provoquant de fortes pentes par rapport à  $S_A$ , est :

$$t_s = 1/N_f.$$

Le taux d'échec ( $FR$ ) est calculé comme suit :

$$FR = \left( \frac{t_f}{t_s} \right) 100\%$$

Ainsi  $(FR) = L_f \times N_f 100\% \dots \dots \dots (11)$

A partir d'une valeur convenable pour  $S_A$ , par un essai, (9) et (10) peuvent être résolues pour calculer  $S_A$  jusqu'à ce que le nécessaire  $N_f$  est obtenu. Ensuite la longueur de séparation peut être calculée par l'équation (7).

## Chapitre 4 : Applications

Pour l'exemple précédent, de l'équation (11) la valeur acceptable de  $N_f$  a été calculée comme suit :

$$N_f = \frac{0,05}{25} = 0,002.$$

En commençant par  $S_A$  égale à  $1966 \text{ kV}/\mu\text{s}$ , qui a été calculée par la première méthode, par une erreur de premier instant, peut être résolue pour calculer  $S_A$  jusqu'à ce que  $N_f$  sera obtenu. En remplaçant  $S_A$  dans l'équation (7) ; la longueur de séparation sera comme suit :

$$l = \frac{(0,8 \times 170 - 90)300}{2 \times 2640} = 2,6 \text{ m}.$$

Pour une protection adéquate, la longueur de séparation devra être réduite à  $2,6 \text{ m}$  au lieu de  $3,5 \text{ m}$  dans la première méthode. Il est donc évident que la longueur de séparation entre le parafoudre et le transformateur, doit être aussi petite que possible.

## II. Protection d'une ligne de haute tension 220 kV avec câble de garde

### II.1. Caractéristiques de la ligne

Une ligne aérienne est caractérisée par des paramètres électro géométriques pouvant influencer sur la protection assurée par un câble de garde.

Les caractéristiques essentielles de la ligne aérienne haute tension de (220 kV) sont [6]:

- Type de support le plus courant pylône chat
- Masse moyenne de support par kilomètre de ligne 11,5 tonnes
- Volume moyen de fondation par kilomètre de ligne 8 m<sup>3</sup>
- Conducteur le plus courant
  - . En plaine : almélec 570 mm<sup>2</sup> de section
  - . En montagne : almélec-acier 432 mm<sup>2</sup> de section
- Portée courante 500 m
- Chaîne d'isolation (tenue)

Nombre d'éléments	Pas (mm)	Tension au choc (kV)	Surtension de manœuvre (sous pluie) (kV)
13	145	455	700
14	130	445	680

- Distance entre le point d'accrochage  
Du conducteur et celui du câble de garde 10 m
- Hauteur minimale de la ligne au-dessus du sol

(Terrain ordinaire)	<i>7 m</i>
- Hauteur moyenne des conducteurs par rapport au sol	<i>15 m</i>
- Distance entre phase	<i>7 m</i>
- Câble de garde (02 câbles pour un pylône chat)	
. Almélec – acier	<i>116 mm<sup>2</sup> de section</i>
. Impédance longitudinale	<i>0,92 Ω</i>
- Impédance caractéristique de la ligne	<i>357 Ω</i>
- Puissance caractéristique de la ligne ( $P_c$ )	<i>22 MW</i>
- Pertes joules à la puissance caractéristique et Par 100 km de la ligne	<i>2,11 MW/100 km</i>
- Champ électrique	
. Sous l'axe	<i>1,10 kV/m</i>
. Maximale	<i>2,60 kV/m</i>
. A 30 m de l'axe	<i>0,37 kV/m</i>
- Courant de phase	<i>0,40 kA</i>
- Champ magnétique	
. Sous l'axe	<i>1.10<sup>-6</sup> T</i>
. Maximale	<i>4,30.10<sup>-6</sup> T</i>
. A 30 m de l'axe	<i>0,65.10<sup>-6</sup> T</i>

### II.2. Protection par câble de garde

#### II.2.1. Détermination de l'angle de protection

Soit une ligne de 220 kV caractérisé par [2] :

- . Le nombre de conducteurs élémentaires d'un faisceau  $n = 1$ .
- . Le rayon du conducteur  $R = 0,014 m$ .
- . La distance entre le point d'accrochage du conducteur de phase et celui du câble de garde  $D_{cg} = 10m$ .
- . Le rayon critique  $R_c = 0,06 m$ .

Remarque : la valeur de ces paramètres est la même quel que soit le type de pylône utilisé.

#### Cas 1 : pylône 220kV –nappe horizontale-

La protection des conducteurs de phase en nappe horizontale nécessite au moins deux câbles de garde (à cause de son étendue). La position du câble de garde par rapport aux conducteurs à protéger est donnée en fonction des paramètres électro géométrique de la ligne pour chaque type de pylône et suivant la nature du terrain.

Exemple :

- . Pylône de type A [2] (**figure IV.5**).

## Chapitre 4 : Applications

---

- . Nature du terrain (utilisation) : plat.
- . Type d'accrochage : ancrage.
- . Portée moyenne  $a = 550 \text{ m}$  [2].
- . Paramètres du conducteur :  $\rho = 2000 \text{ m}$  [2].

Données :

Les autres paramètres caractérisant la ligne sont donnés en annexe :

$Y_p = 30,8 \text{ m}$	Hauteur du conducteur à son point d'accrochage au pylône.
$H_p = 33,3 \text{ m}$	Hauteur de l'accrochage au pylône du câble de garde.
$d = 3,5 \text{ m}$	Petite portée.
$S_c = 17,18 \text{ m}$ ( $S_c = \alpha^2/8\rho$ )	Flèche du conducteur.
$S_g = 15,8 \text{ m}$	Flèche du câble de garde.

Résultats [2] :

$Y = 1,1(Y_p - 2/3S_c) = 21,28 \text{ m}$	Hauteur pondérée du conducteur de phase par rapport au sol.
$H = 1,1(H_p - 2/3S_g) = 25,04 \text{ m}$	Hauteur pondérée du câble de garde par rapport au sol.
$Z_c = 60\sqrt{\ln(2H/R)\ln(2H/R_c)} = 445,152 \text{ Ohm}$	Impédance d'onde.
$U_f = 530d = 1855 \text{ V}$	Tension d'isolement au choc.
$I_c = 2U_f/Z_c = 8,334 \text{ kA}$	Courant critique.
$D_c = 9,41I_c = 38,097 \text{ m}$	Distance critique.
$\theta_o = \arcsin[1 - (Y/D_c)] - \arcsin[(D_{cg}/2D_c)] = 19^\circ 53'$	Angle de protection.

Pour les autres types de pylônes et pour différentes nature du terrain, la position optimale du câble de garde est donnée aux **tableaux IV.4, IV.5 et IV.6** (pour les lignes en nappe).

### . Terrain vallonné :

Portée moyenne  $a = 500 \text{ m}$ .

Paramètre du conducteur  $\rho = 1900 \text{ m}$ .

Type d'accrochage : suspension.

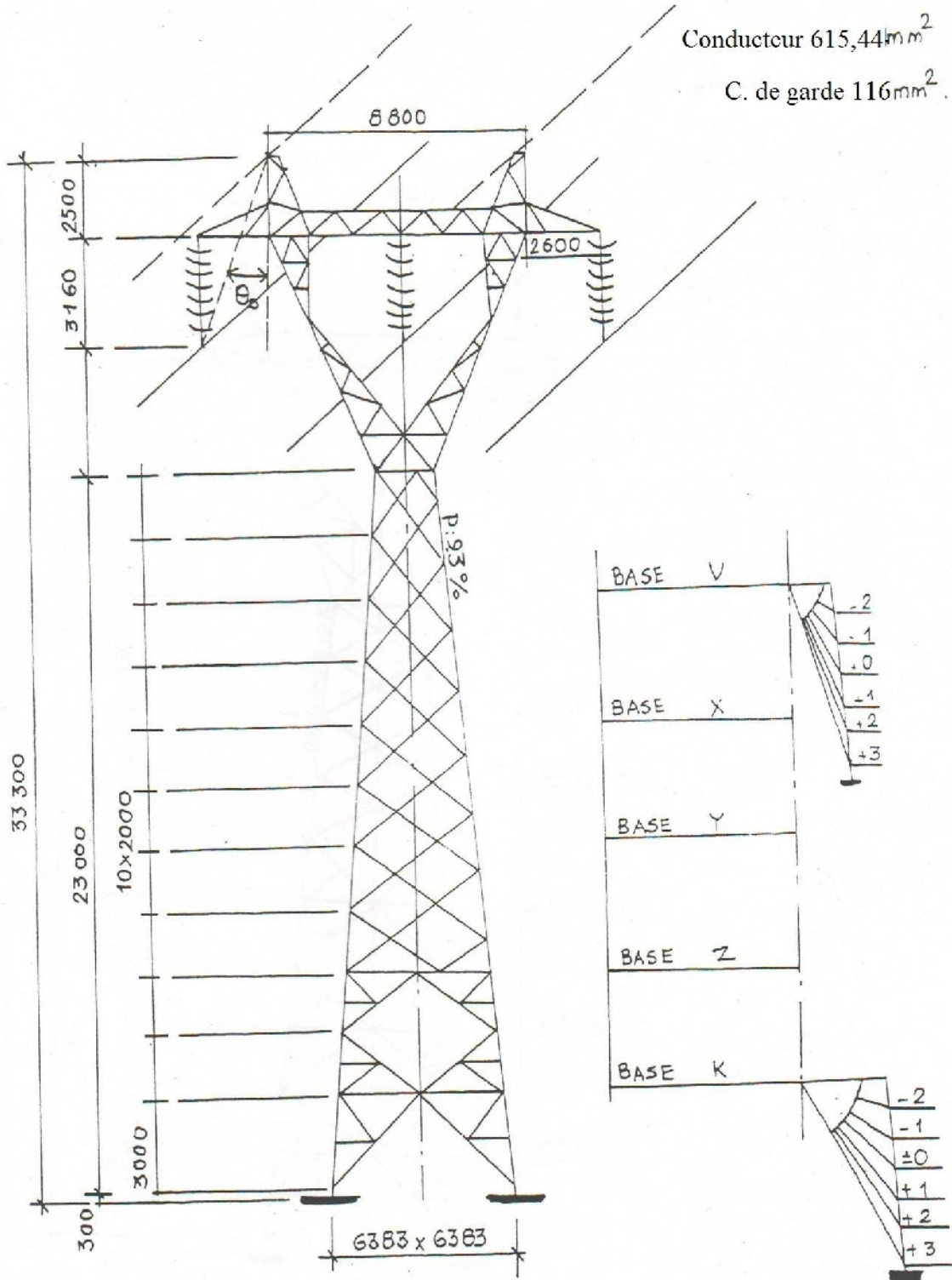
## Chapitre 4 : Applications

Type de pylône Caractéristiques de la ligne		Terrain plat		
		Type A (As8)	Type B (Bs8)	Type C (Cs8)
Données (*)	$Y_p$ (m)	30,8	28,15	28,20
	$H_p$ (m)	33,3	31,85	32,89
	$S_c$ (m)	17,18	17,18	17,18
	$S_g$ (m)	15,8	13,68	15,24
	$D$ (m)	3,5	3,5	3,5
Résultats	$Y$ (m)	21,281	18,366	18,421
	$H$ (m)	25,043	25,003	25,003
	$U_f$ (m)	1855	1855	1855
	$Z_c$ ( $\Omega$ )	445,152	445,055	445,055
	$I_c$ (KA)	8,334	8,336	8,336
	$D_c$ (m)	38,097	38,103	38,103
	$\theta_0$ ( $^{\circ}$ )	19°53	24°43	24°32

**Tableau IV.1 :** Détermination de l'angle électro géométrique dans le cas d'un terrain plat (pylône en nappe horizontale) [2]. (\*) Données : voir annexe.

Type de pylône Caractéristiques de la ligne		Type A (As8)	Type B (Bs8)
		Données (*)	$Y_p$ (m)
$H_p$ (m)	33,30		31,85
$S_c$ (m)	-		-
$S_g$ (m)	-		-
$D$ (m)	3,5		3,5
Résultats	$Y$ (m)	27,640	24,990
	$H$ (m)	33,300	31,850
	$U_f$ (m)	1855	1855
	$Z_c$ ( $\Omega$ )	462,328	459,645
	$I_c$ (KA)	8,024	8,071
	$D_c$ (m)	37,157	37,300
	$\theta_0$ ( $^{\circ}$ )	7°44	12°70

**Tableau IV.2 :** Détermination de l'angle électro géométrique dans la cas d'un terrain vallonné (pylône en nappe) [2]. (\*) Données : voir annexe.



N.B Pour obtenir le niveau d'un pylône, il suffit de prendre la hauteur à la base et lui ajouter les 3 mètres du pied.

Figure IV. 5 : Pylône d'alignement Type A 200 kV [2].

Conducteur  $615,44 \text{ mm}^2$

C. de garde  $116 \text{ mm}^2$

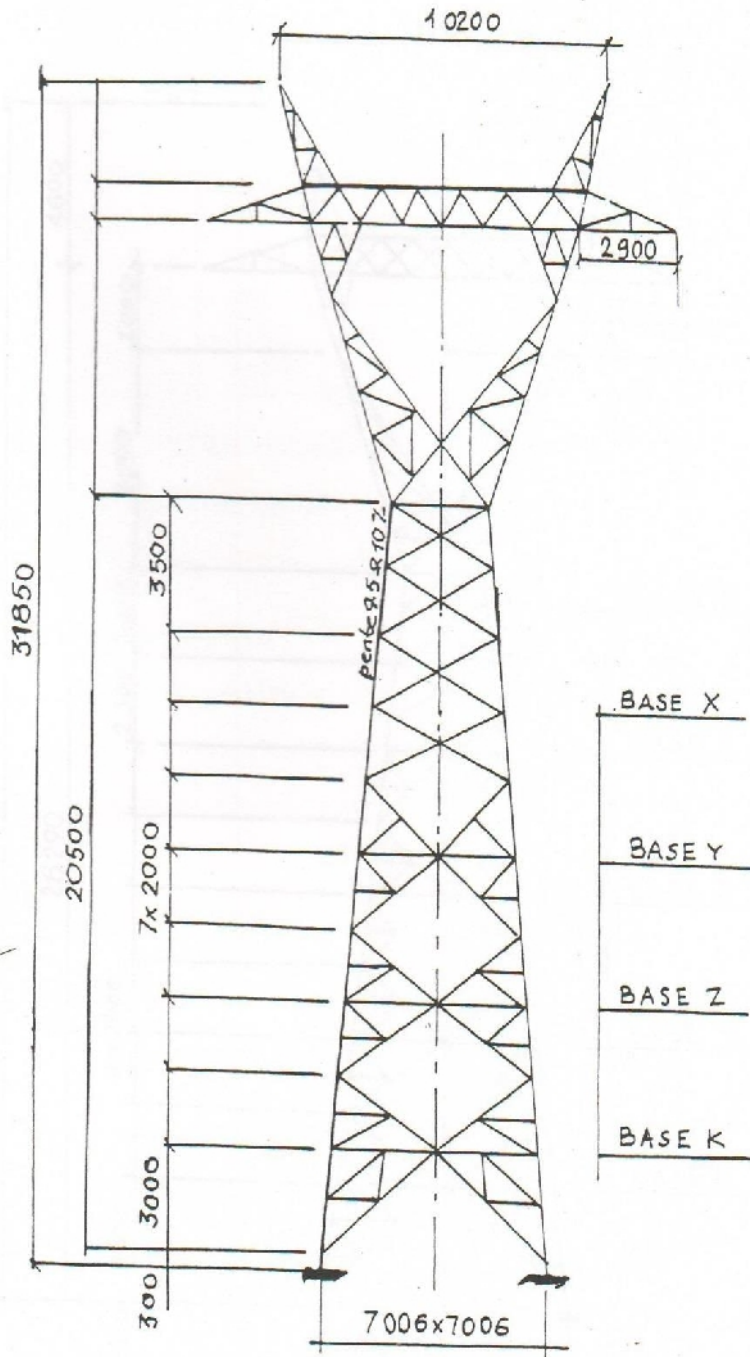


Figure IV.6 : Pylône d'angle Type B 220 kV [2].

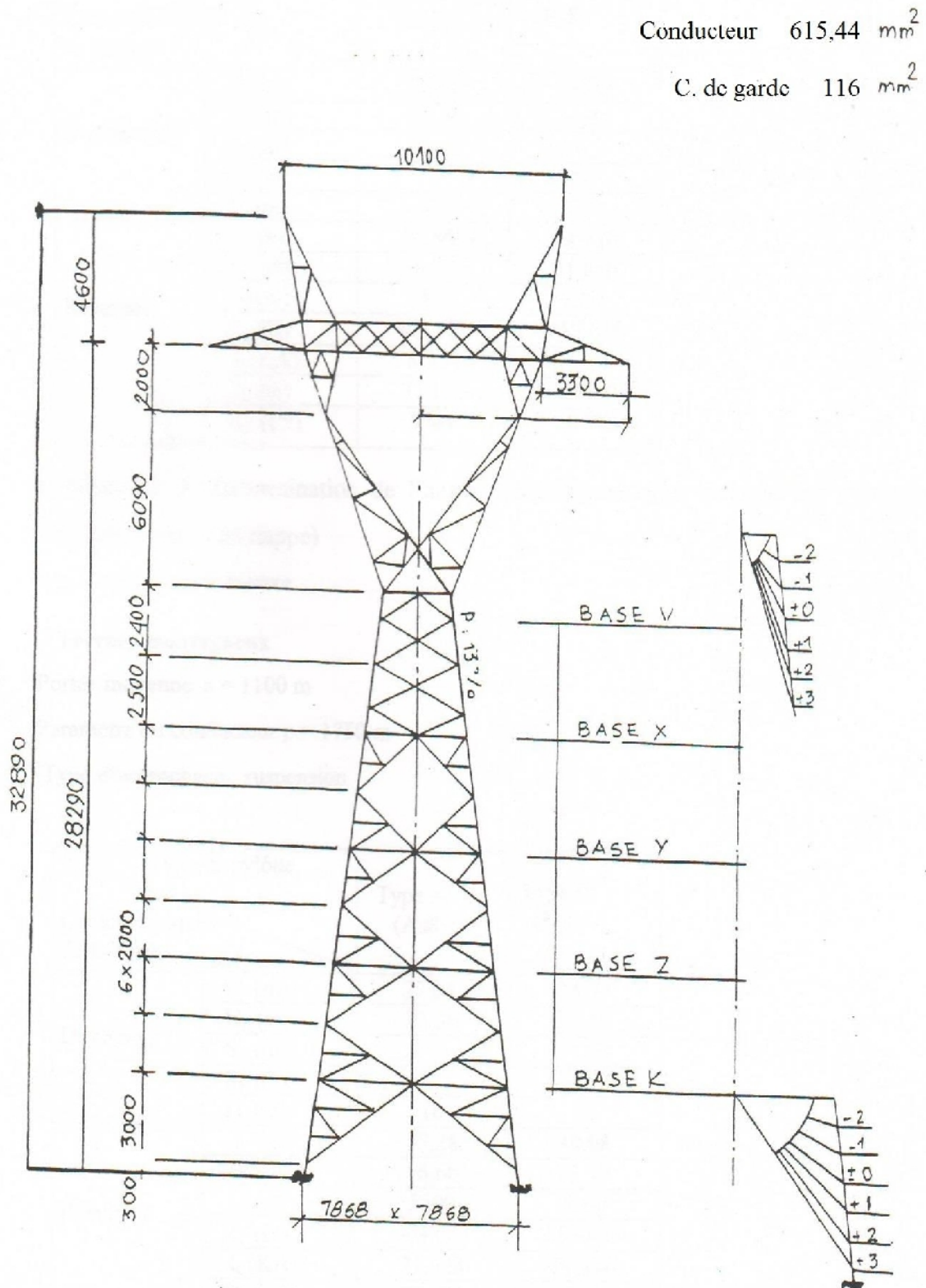


Figure IV.7 : Pylône de Type C 220 kV [2].

• **Terrain montagneux :**

Portée moyenne  $a = 1100 \text{ m}$ .

Paramètre du conducteur  $\rho = 1750 \text{ m}$ .

Type d'accrochage : suspension.

Type de pylône		Type A (As8)	Type B (Bs8)
Caractéristiques de la ligne			
Données (*)	$Y_p$ (m)	27,64	24,99
	$H_p$ (m)	33,30	31,85
	$S_c$ (m)	-	-
	$S_g$ (m)	-	-
	$D$ (m)	10	10
Résultats	$Y$ (m)	55,28	49,98
	$H$ (m)	66,60	63,70
	$U_f$ (m)	5300	5300
	$Z_c$ ( $\Omega$ )	504,087	501,456
	$I_c$ (KA)	21,028	21,140
	$D_c$ (m)	70,173	70,421
	$\theta_0$ (C°)	8°55	13°40

**Tableau IV.3 :** Détermination de l'angle électro géométrique dans le cas d'un terrain montagneux (pylône en nappe) [2]. (\*) Données : voir annexe.

**Cas 2 : pylône 220 kV –triangle-**

L'utilisation d'un seul câble de garde est suffisante pour assurer la protection des conducteurs de phases (annexe).

Toutefois la position du câble de garde doit être optimisée pour avoir une protection satisfaisante. Cette position est donnée par calcul de l'angle de protection en fonction des paramètres de la ligne (**tableau IV.4, IV.5, IV.6**) et la nature du terrain.

• Terrain plat :

Type de pylône		Type A	Type B	Type C
		(As4)	(Bs8)	(Cs8)
Caractéristiques de la ligne				
Données (*)	$Y_p$ (m)	27,3	31,3	28,20
	$H_p$ (m)	38,1	45,7	44,8
	$S_c$ (m)	17,18	17,18	17,18
	$S_g$ (m)	12,15	12,64	11,29
	$D$ (m)	3,5	3,5	3,5
Résultats	$Y$ (m)	17,431	21,831	18,421
	$H$ (m)	33,00	41,000	41,000
	$U_f$ (m)	1855	1855	1855
	$Z_c$ ( $\Omega$ )	461,783	474,864	474,864
	$I_c$ (KA)	8,034	7,812	7,812
	$D_c$ (m)	37,186	36,507	36,507
	$\theta_0$ (C°)	25°51	16,57	22°85

**Tableau IV.4 :** Détermination de l'angle électro géométrique dans le cas d'un terrain plat (pylône triangle) [2]. (\*) Données : voir annexe.

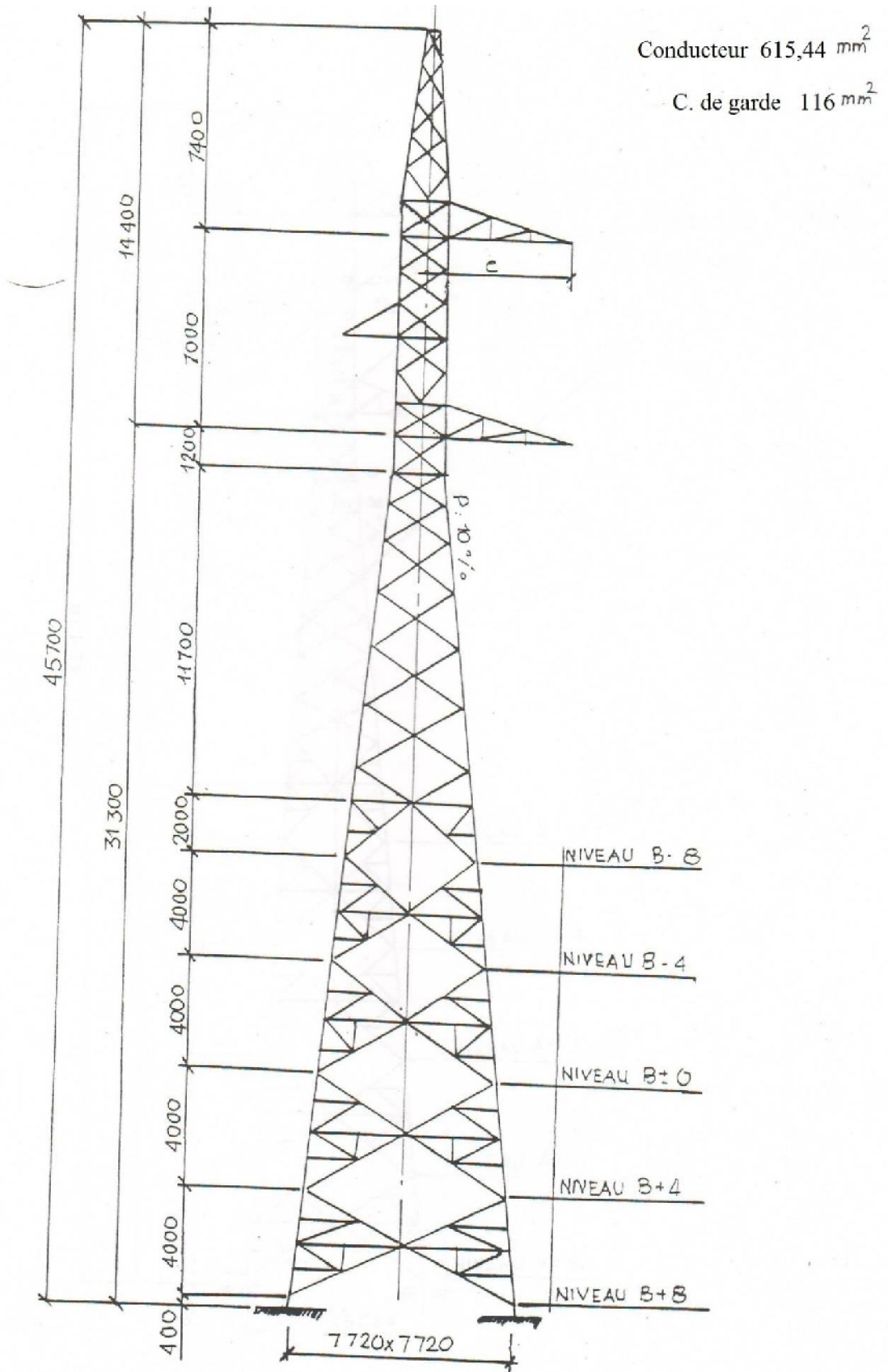


Figure IV.8 : Pylône d'alignement Type A 220 kV [2].

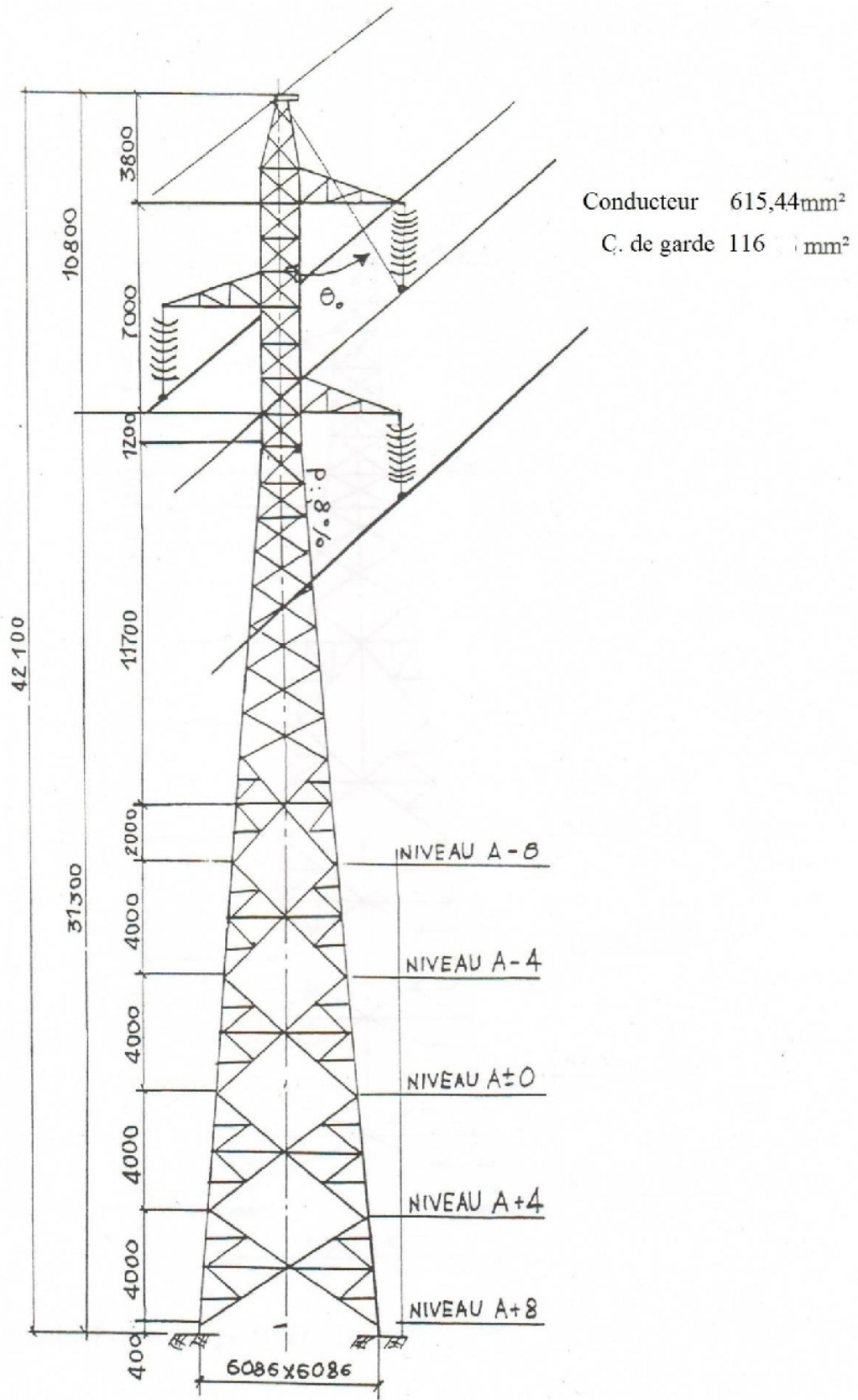


Figure IV.9 : Pylône d'angle Type B 220 kV [2].

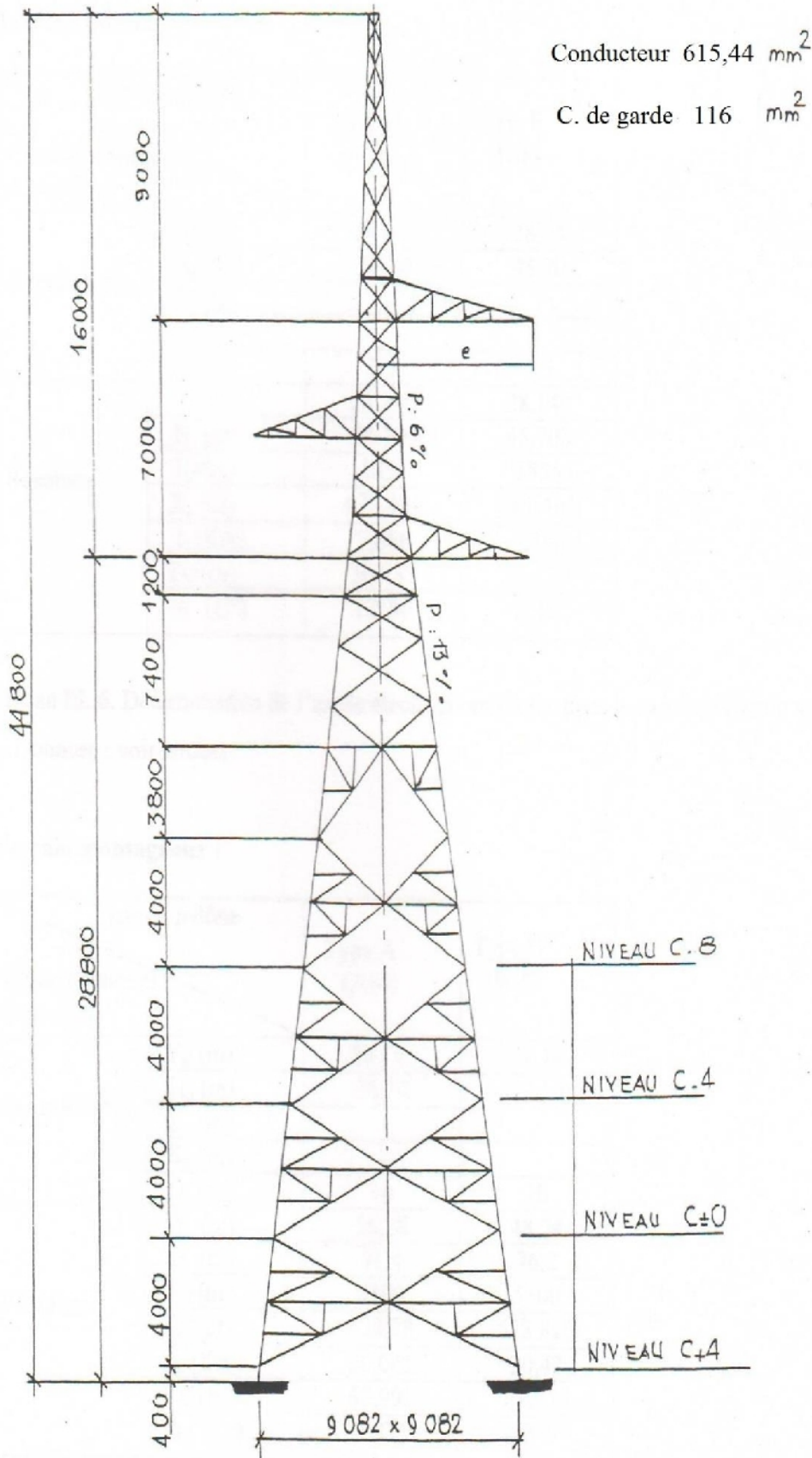


Figure IV.10 : Pylône d'angle Type C 220 kV [2].

• Terrain vallonné :

Type de pylône		Type A (As4)	Type B (Bs8)
Données (*)	$Y_p$ (m)	24,14	28,14
	$H_p$ (m)	38,10	45,70
	$S_c$ (m)	-	-
	$S_g$ (m)	-	-
	$D$ (m)	3,5	3,5
Résultats	$Y$ (m)	24,140	28,140
	$H$ (m)	38,100	45,700
	$U_f$ (m)	1855	1855
	$Z_c$ ( $\Omega$ )	470,443	481,402
	$I_c$ (KA)	7,886	7,706
	$D_c$ (m)	36,733	36,179
	$\theta_0$ ( $^{\circ}$ )	12°80	5°12

**Tableau IV.5 :** Détermination de l'angle électro géométrique dans le cas d'un terrain vallonné [2]. (\*) Données : voir annexe.

• Terrain montagneux :

Type de pylône		Type A (As4)	Type B (Bs8)
Données (*)	$Y_p$ (m)	24,14	28,14
	$H_p$ (m)	38,10	38,10
	$S_c$ (m)	-	-
	$S_g$ (m)	-	-
	$D$ (m)	10	10
Résultats	$Y$ (m)	56,28	48,24
	$H$ (m)	91,4	76,2
	$U_f$ (m)	5300	5300
	$Z_c$ ( $\Omega$ )	528,78	513,825
	$I_c$ (KA)	20,045	20,47
	$D_c$ (m)	67,992	68,939
	$\theta_0$ ( $^{\circ}$ )	5°971	13°9

**Tableau IV.6 :** Détermination de l'angle électro géométrique dans le cas d'un terrain montagneux (pylône en triangle) [2]. (\*) Données : voir annexe.

**ANNEXE**

**Pylône 220 kV (nappe horizontale)**

Niveau	Hauteur totale ( <i>m</i> )	Hauteur sous Console ( <i>m</i> )	Hauteur sous Chaîne ( $I_{ch} = 3.16 m$ )	Ecartements entre phases ( <i>m</i> )
$A_s8$	33.30	30.80	27.64	7.00
$A_s4$	29.30	26.80	23.64	7.00
$A 0$	25.30	22.80	19.64	7.00
$A_r4$	21.03	18.80	15.64	7.00
$A_r8$	17.30	14.80	11.64	7.00

Niveau	Hauteur totale ( <i>m</i> )	Hauteur sous Console ( <i>m</i> )	Hauteur sous Chaîne ( $I_{ch} 3.16 m$ )	Ecartements entre phases ( <i>m</i> )
$B_s8$	31.85	28.15	24.99	7.25
$B_s4$	27.85	24.15	20.99	7.25
$B 0$	23.85	20.15	16.99	7.25
$B_r4$	19.85	16.15	12.99	7.25

Niveau	Hauteur totale ( <i>m</i> )	Hauteur sous Console( <i>m</i> )	Ecartement entre phases ( <i>m</i> )
$C_s8$	32.89	28.20	7.70
$C_s4$	28.89	24.20	7.70
$C 0$	24.89	20.20	7.70
$C_r4$	20.89	16.20	7.70
$C_r8$	16.89	12.20	7.70

**Pylône 220 kV (Triangle)**

Niveau	Hauteur totale (m)	Hauteur sous Console (m)	Hauteur sous Chaine ( $I_{ch} = 3.16 m$ )	Ecartement entre phases (m)
$A_s8$	42.10	31.30	28.14	7.00
$A_s4$	38.10	27.30	24.14	7.00
$A O$	34.10	23.30	20.14	7.00
$A_r4$	30.10	19.30	16.14	7.00
$A_r8$	26.10	15.30	12.14	7.00

Niveau	Hauteur totale (m)	Hauteur sous Console (m)	Hauteur sous Chaine ( $I_{ch} = 3.16 m$ )	Ecartement entre phases (m)
$B_s8$	45.70	31.30	28.14	7.00
$B_s4$	41.70	27.30	24.14	7.00
$B O$	37.70	23.30	20.14	7.00
$B_r4$	33.70	19.30	16.14	7.00
$B_r8$	29.70	15.30	12.14	7.00

Niveau	Hauteur totale (m)	Hauteur sous Console (m)	Ecartement entre Phases (m)
$C_s8$	44.80	28.80	7.00
$C_s4$	40.80	24.80	7.00
$C O$	36.80	20.80	7.00
$C_r4$	32.80	16.80	7.00
$C_r8$	28.80	12.80	7.00



# Conclusion générale

# Conclusion générale

La protection contre les surtensions en général, et la foudre en particulier, est un domaine en très forte croissance depuis plusieurs années. Les solutions de protection sont de plus en plus nombreuses et des normes existent pour définir les règles de protection applicables aux structures communes. Le phénomène de foudre reste encore assez mal connu. Les connaissances que l'on a se résument à des données microscopiques, essentiellement descriptives. Cette situation provient en grande partie de la nature insaisissable de la foudre, qui frappe où elle veut et quand elle veut.

Chaque poste de transformation est muni d'appareils de protection tels que les éclateurs qui doivent être bien étudiée par rapport à leurs mises à la terre ainsi la distance entre ces deux électrodes. Les différents inconvénients des éclateurs nous fait pensé à l'installation d'une autre protection qui soit plus performante pour cela on a étudié l'installation du parafoudre on ce basons sur deux critères qui sont la longueur de séparation entre le parafoudre et le transformateur, le taux d'échec de la protection.

Notre application à montrer que plus la distance séparant le parafoudre et le transformateur est courte, meilleur est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection adéquate, le parafoudre doit être installé près de l'équipement à protéger.

L'application sur la protection d'une ligne de haute tension 220 *kV* avec câble de garde nous a permis de déterminé l'angle de protection pour les différents pylônes et suivant la nature du terrain.

Nous espérons que ce travail apportera un plus à ceux qui le consulteront.

# Bibliographie

# *Bibliographie*

- [1] A. Tilmatine, « Techniques de la haute tension (chapitre 5 : la foudre) », Université Djilali LIABES.
- [2] A. Brahim, H. Lariane, H. Hallalel, « Etude des protections contre les surtensions de foudre », Mémoire de (D.E.U.A) en électrotechnique, UMMTO, 2002.
- [3] R. Belaïcha, « Contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans le cas des terres conductrices », Thèse de Magister, UMMTO, 1996.
- [4] Guide de l'installation électrique, « Chapitre J : la protection contre les surtensions », Schneider electric, 2010.
- [5] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutziter, J. Lalot et C. Dubanton, « Les propriétés diélectriques de l'air et de très hautes tensions », Edition Eyrolles, 1984.
- [6] S. Khemri, L. Bessghir, « Protections des transformateurs *MT/BT* contre les surtensions de foudre ». Mémoire de Master Spécialité Réseaux électrique, UMMTO , 2014.

## Résumé

La protection contre les surtensions en général, et la foudre en particulier, est un domaine en très forte croissance depuis plusieurs années. Les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique sont soumis à des surtensions atmosphériques (foudre) qui sont plus souvent induites par des coups de foudre indirect proche de ligne et les coups de foudre direct qui sont presque destructifs.

Chaque poste de transformation est muni d'appareils de protection tels que les éclateurs qui doivent être bien étudiée par rapport à leurs mises à la terre ainsi la distance entre ces deux électrodes. Les différents inconvénients des éclateurs nous fait pensé à l'installation d'une autre protection qui soit plus performante pour cela on a étudié l'installation du parafoudre on ce basons sur deux critères qui sont la longueur de séparation entre le parafoudre et le transformateur, le taux d'échec de la protection. Notre application à montrer que plus la distance séparant le parafoudre et le transformateur est courte, meilleur est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection adéquate, le parafoudre doit être installé près de l'équipement à protéger.

L'application sur la protection d'une ligne de haute tension 220 *kV* avec câble de garde nous a permis de déterminé l'angle de protection  $\theta_0$  pour les différents pylônes et suivant la nature du terrain.

Mots clés : la foudre, les surtensions , la protection, parafoudre, câbles de garde, paratonnerre,.....etc.