

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



*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département d'Electrotechnique*



## *MEMOIRE DE FIN D'ETUDES*

*En vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique  
Option : Réseaux Electriques*

*Thème  
Etude Des Protections Du Poste Source  
FREHA 60/30kV Contre Les Surtensions  
Atmosphériques*



*Dirigé par :*

*Mr : BIROUCHE. C*

*Mr : CHERIFI. M*

*Réalisé par :*

*AOUDIA Mustapha*

*AZZOUG Ali*

*BELHOCINE Merzouk*

*Promotion 2011*



Created with

 **nitro**PDF professional

download the free trial online at [nitropdf.com/professional](http://nitropdf.com/professional)

## Remerciements

*On remercie DIEU tout puissant qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Nos sincères remerciements à notre promoteur monsieur C.BIROUCHE et Co-promoteur monsieur M.CHERIFI pour nous avoir conseillé et dirigé pendant la réalisation de ce travail.*

*A la même occasion, on remercie monsieur HANDHALA et monsieur MOUFID ZADA de nous avoir bien reçus lorsqu'on les a sollicités.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce PFE, sans oublier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation et l'aide qu'ils nous ont fourni pendant la période de notre cursus.*

*Sans oublier également tous nos amis et camarades de la promotion, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail.*

## Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

*\*A toute ma famille, surtout mes parents et mon frère Tayeb ainsi que sa femme Zaina et leurs deux filles Thafth et Numidia .*

*\*A tout mes amis de A jusqu'à Z.*

*\*A ma copine DjïDji.*

*\*A mes deux camarades avec qui j'ai effectué ce travail.*

*\*A tous ceux qui combattent pour la sauvegarde de l'identité Kabyle.*

**M.AOUDIA**

*Je dédie ce travail :*

*\*A toute la famille, et mes amis.*

**M.BELHOCINE**

*Je dédie de travail :*

*\*A mes parents.*

*\*A mes deux sœurs Bahia et Lydia, ainsi que mon frère Mourad.*

*\*A mes deux camarades avec qui j'ai effectué ce travail.*

**A.AZZOUG**

# *Sommaire*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
-----------------------------------	-----------

## **Chapitre I : Généralités sur la foudre.**

I-1. Introduction.....	02
I-2. L'origine des surtensions de la foudre.....	02
I-3. Surtension résultant du coup de foudre direct.....	02
I-4. Surtension résultant de coup foudre indirect.....	04
I-5. Les phénomènes précurseurs.....	05
I-5-2. Formation des charges.....	06
I-5-3. Répartition des charges.....	06
I-6. Les caractéristiques électriques de la foudre.....	07
I-6-1. Types de coup de foudre.....	07
I-6-1-1. Le coup de foudre descendant.....	08
I-6-1-2. Le coup de foudre ascendant.....	08
I-6-1-3. Le coup de foudre positif.....	08
I-6-1-4. Le coup de foudre négatif.....	08
I-7. Les effets de la foudre.....	10
I-7-1. Les effets thermiques.....	10
I-7-2. L'effet électrique.....	11
I-7-3. L'effet électromagnétique.....	12
I-8. Conclusion.....	12

## **Chapitre II : Sévérité orageuse et éléments de statistiques.**

II-1 Introduction.....	13
II-2 Le niveau kéraunique ( $N_K$ ) et la densité de foudroiemnt ( $N_S$ ).....	13
II-3 Facteurs locaux influençant le foudroiemnt.....	14
II-3-1 Facteurs topologiques.....	14
II-3-2. Facteurs géologiques.....	14
II-3-3. La concentration ionique de l'air.....	14
II-4. Fréquence de foudroiemnt.....	15
II-5. Fréquence de foudroiemnt d'une structure à protéger.....	16
II-5-1. Hypothèse de base de protection.....	16

II-5-2. Cas général d'une structure électrique.....	16
II-6. Analyse du foudroiement d'une ligne.....	17
II-7. Fréquence de foudroiement du poste.....	19
II-8. Forme et amplitude de l'onde de foudre.....	21
II-9. Les caractéristiques d'un coup de foudre.....	24
II-10. Conclusion.....	25

### **Chapitre III : Les dispositifs de protection contre les surtensions de foudre.**

III-1. Introduction.....	26
III-2. La protection primaire.....	26
III-2-1. Le paratonnerre à tige simple.....	26
III-2-2. Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA).....	28
III-2-3. Le paratonnerre à cage maillée (cage de faraday).....	28
III-2-4 Le paratonnerre à fils tendus (câble de garde).....	29
III-3. Le modèle électro-géométrique.....	30
III-4. Méthode graphique de détermination de la zone de protection.....	31
III-4-1. La méthode de la sphère fictive.....	31
III-4-1-1. Principe de la méthode.....	31
III-5. Protection secondaire.....	32
III-5-1. Les éclateurs.....	33
III-5-1-1. Eclateur avec tige anti-oiseaux.....	33
III-5-1-2 Eclateur à tige.....	34
III-5-1-3. Avantage et inconvénients.....	35
III-5-2. Les parafoudres.....	36
III-5-2-1. Parafoudre au carbure de silicium SiC à éclateurs.....	37
III-5-2-1-1. Principe de fonctionnement.....	37
III-5-2-2. Parafoudre à oxyde de zinc.....	39
III-5-2-2-1. Principe de fonctionnement.....	39
III-5-2-2-2 Choix des parafoudres à oxyde de zinc en HT.....	42
III-5-3. Installation des parafoudres HT et MT.....	43
III-5-3-1. Distance de protection.....	43
III-5-4. Causes de défaillance des parafoudres à ZnO.....	44
III-6 Conclusion.....	45

## **Chapitre IV : Etude des systèmes de protection du poste de FREHA**

IV-1. Introduction.....	46
IV-2. Les grandeurs caractéristiques des parafoudres.....	46
IV-3. Distance de protection du parafoudre.....	47
IV-4. Câblage des parafoudres.....	52
VI-5. Application sur le poste de FREHA.....	53
IV-5-1. Description du poste simplifié de FREHA (60/30 kV).....	53
IV-5-2. Calcul de la distance "D" parafoudre-transformateur.....	55
IV-6. Conclusion.....	59
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>60</b>

# *Introduction générale*

## **Introduction générale :**

La foudre est un phénomène naturel connu de tous, spectaculaire et dangereux. La foudre cause chaque année des dégâts matériels et humaines (incendies, coupure d'électricité...). Les réseaux aériens restent les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique.

La protection des matériels reliés au réseau électrique contre les surtensions provoquées par la foudre était auparavant assurée par de simples dispositifs appelés éclateurs à cornes, puis par des systèmes plus complexes associant un éclateur et des céramiques constituées de Carbure de Silicium (SiC). Actuellement, on observe une généralisation de l'utilisation des parafoudres plus simples constitués d'un empilement de céramiques, formées principalement de grains de ZnO. La simplification de l'architecture du parafoudre a conduit à une réduction de prix, une amélioration des performances électriques et la fiabilité des dispositifs de protection. Dans ce contexte, la SONELGAZ nous a proposé ce thème qui a pour but l'étude de l'efficacité des parafoudres à oxyde de zinc installés dans le poste de transformation 60/30kV de FREHA.

Pour atteindre notre objectif, nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre traitera des généralités sur la foudre.

Le deuxième chapitre sera consacré à la définition de la notion de fréquence de foudroiement et statistiques relatives à la foudre.

Le troisième chapitre consistera à la représentation des moyens de protection contre la foudre.

Dans le dernier chapitre, on va étudier la protection du poste de transformation 60/30kV de FREHA.

Nous terminerons par une conclusion générale.

# *Chapitre I :* *Généralités sur la* *foudre*

### I-1. Introduction :

La foudre est une décharge électrique violente d'origine atmosphérique qui se développe entre un nuage et la terre, en un ou plusieurs coups.

L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100kA et plus), Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolation des lignes de transmission et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique.

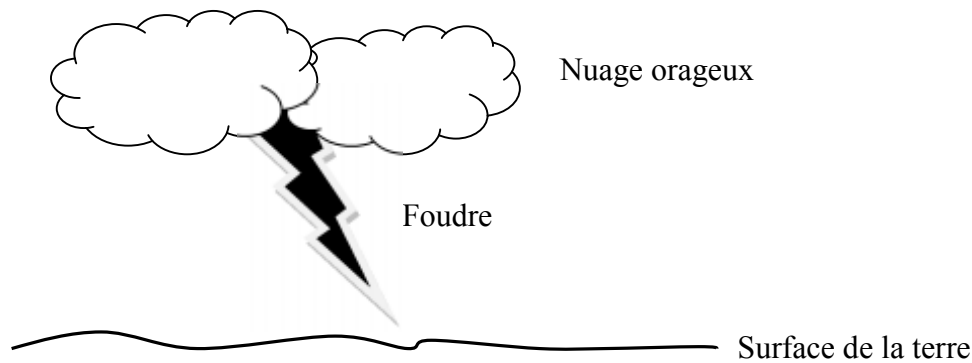


Figure (I-1) : coup de foudre. [1]

### I-2. L'origine des surtensions de la foudre :

#### a- La foudre sur les lignes aériennes :

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

#### b- La foudre sur la terre :

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

#### c- La foudre par rayonnement :

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

### I-3. Surtension résultant du coup de foudre direct :

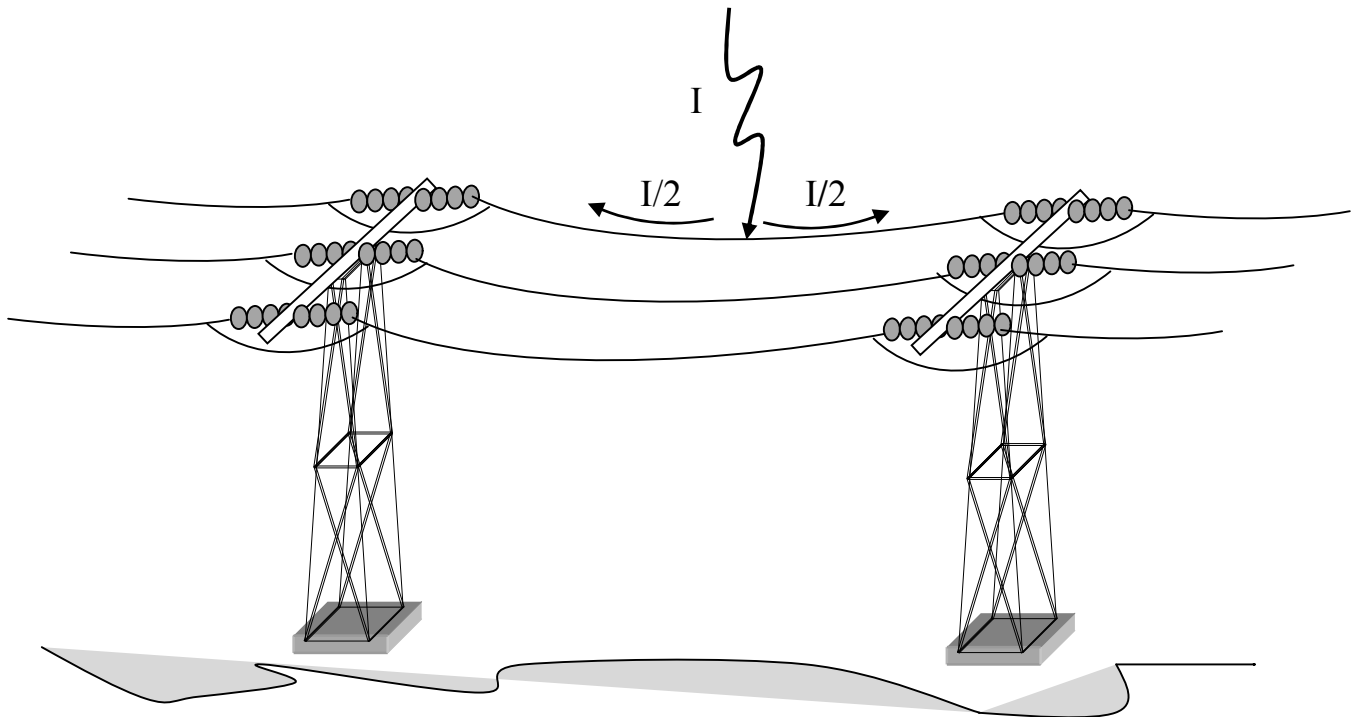
Il se manifeste par l'injection dans la ligne, d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. Cette onde de courant, qui peut faire fondre des conducteurs en se propageant de part et d'autre du point d'impact (figure I-2), provoque une augmentation de la tension U donnée

par la formule :

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

$Z_c$  : Impédance caractéristique de la ligne.

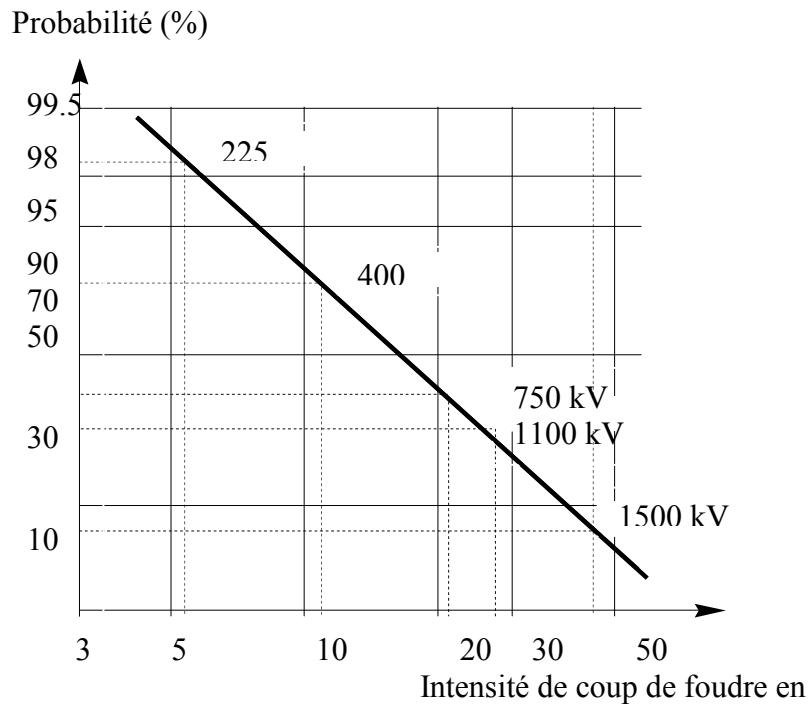
$I(t)$  : Le courant injecté.



**Figure (I-2) :** Coup de foudre direct sur une ligne.

U atteint donc des valeurs de plusieurs millions de Volts, ce qui n'est supportable par aucune ligne.

Pour différentes tensions de réseau, il n'y a pas amorçage au-dessous du courant critique indiqué par la droite de la figure (I-3).



**Figure (I-3) :** Distribution statistique de l'intensité des coups de foudre directs et intensités minimales d'amorçage en fonction du niveau de tension du réseau. [2]

#### I-4. Surtension résultant de coup foudre indirect :

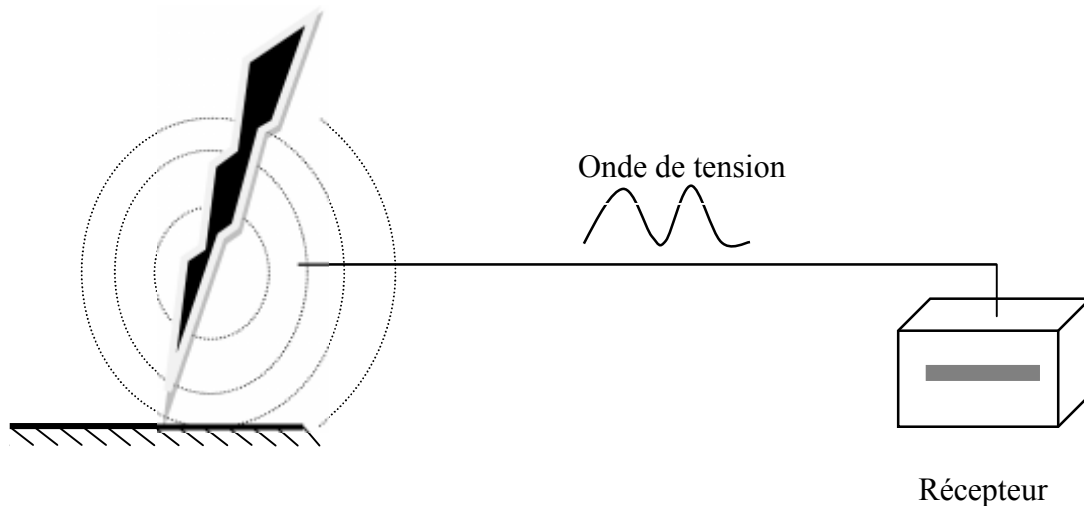
Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. À cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs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

La surtension correspondante peut atteindre des centaines de kV.

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

R : Résistance de la prise de terre.

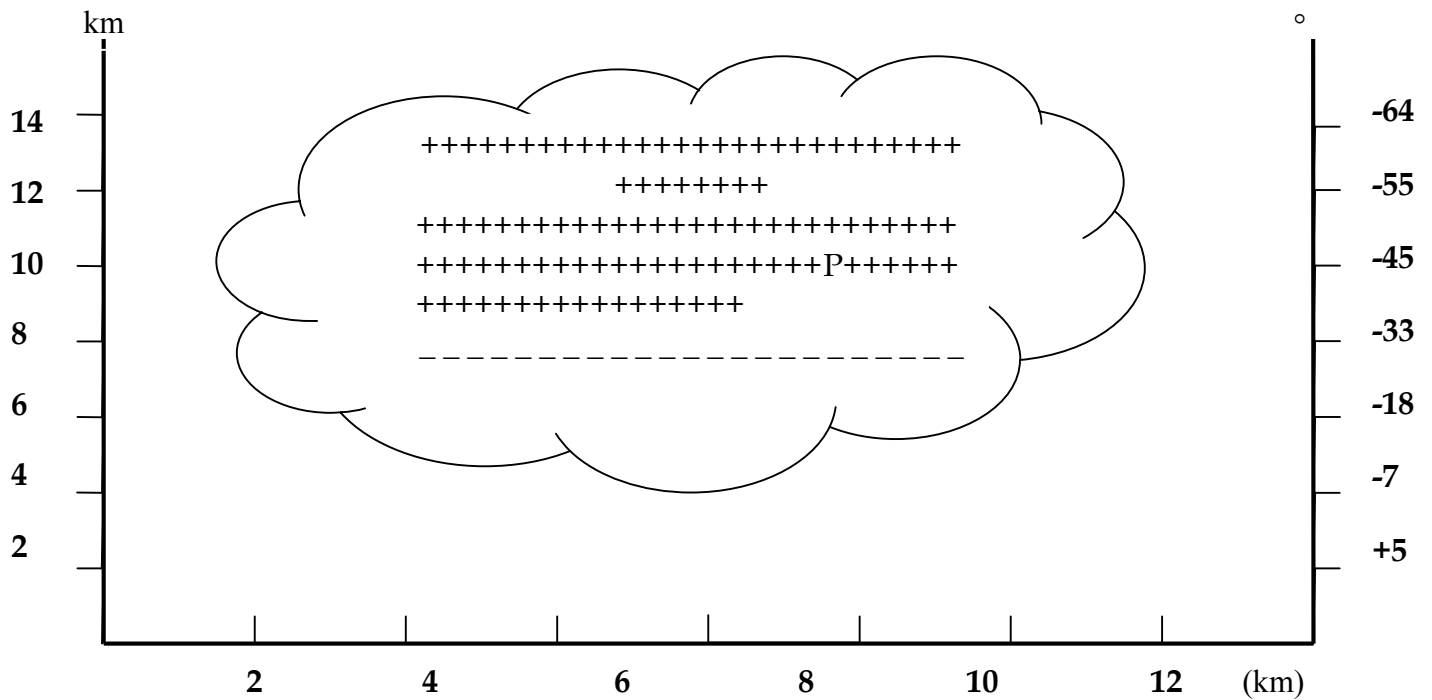
L : Inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre.



**Figure (I-4) :** Coup de foudre indirect.

### **I-5. Les phénomènes précurseurs :**

Le nuage orageux est généralement du type cumulo-nimbus (forme d'enclume, à base de couleur sombre). Il constitue une gigantesque machine thermique dont la base est à 2 km et le sommet à 14 km d'altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol, lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage. La partie supérieure où il fait plus froid est occupée par les particules de glace, tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure; Ces dernières se chargent négativement tandis que les particules de glace prennent une charge positive (figure I-5). [1]



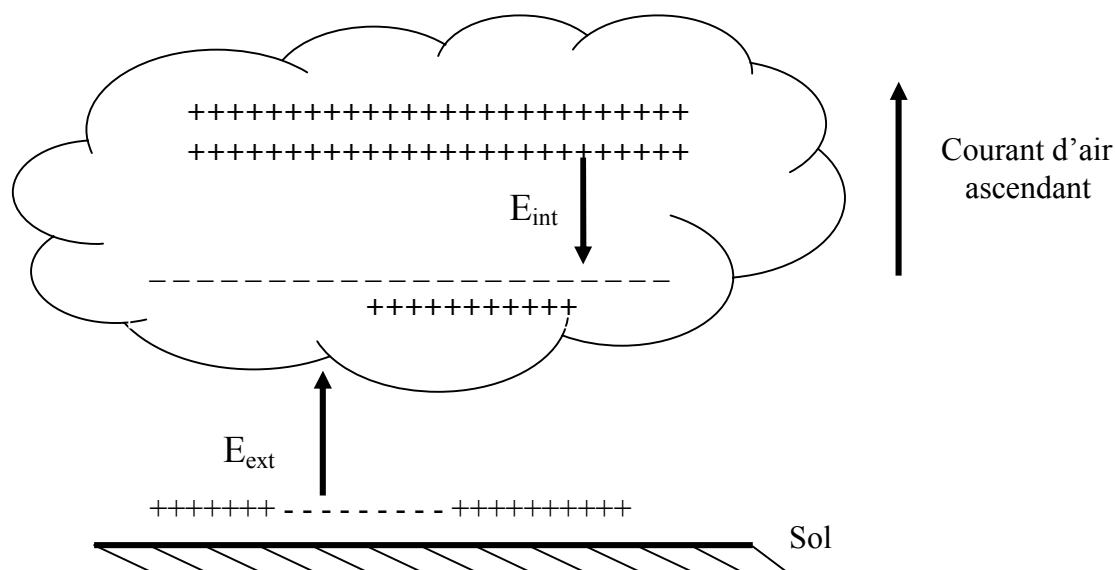
**Figure (I-5) :** Constitution du nuage.

### **I-5-2. Formation des charges :**

Les violents courants d'air ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les microparticules de glace, ce qui provoque la création des charges électriques par frottement. [1]

### **I-5-3. Répartition des charges :**

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



**Figure (I-6) :** Formation et répartition des charges. [1]

Le nuage fait apparaître sur la terre, par influence électrique, une charge de signe opposé est créée ainsi deux véritables dipôles électriques.

Un dipôle interne, généré entre les pôles positif et négatif du nuage : si le champ interne  $E_{int}$  devient suffisamment grand, il provoque un claquage interne dans le nuage (Eclair).

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

## **I-6. Les caractéristiques électriques de la foudre :**

### **I-6-1. Types de coup de foudre :**

La première phase d'un coup de foudre est toujours une pré-décharge peu lumineuse, ou un traceur ; qui progresse à travers l'air avec une vitesse relativement faible. Cette pré-décharge à son origine peut être, soit dans le nuage et elle progresse alors en direction du sol, ou bien au niveau du sol et progresse vers le nuage.

On classe en premier lieu, les coups de foudres selon le sens de développement du traceur (ou leader).

### **I-6-1-1. Le coup de foudre descendant :**

Le développement du traceur se fait à partir du nuage, caractérisé par son arborescence ouverte vers le bas, il comporte une phase initiale ou pré-décharge qui se propage par bonds successifs du nuage vers le sol (traceur). A l'extrémité de ce traceur, le champ électrique est extrêmement élevé, ce qui augmente localement le champ au sol.

Dès que la pointe du traceur approche du sol, des pré-décharges ascendantes vont se développer à partir de ce dernier. Lorsque ces deux canaux se rejoignent, un pont conducteur entre nuage et sol s'établit et permet ainsi le passage d'un courant de forte intensité. Et ce genre de coup de foudre est le plus fréquent. [3]

### **I-6-1-2 Le coup de foudre ascendant :**

Le développement du traceur se fait à partir du sol, il est caractérisé par une arborescence ouverte vers le haut. Dans le cas des pylônes de grande hauteur ou de tours, l'effet couronne peut créer une décharge à partir du sol qui va se développer suffisamment loin pour atteindre les nuages. Dès qu'un canal conducteur est créé, les charges accumulées dans les nuages vont bien s'écouler au sol. Le coup de foudre ascendant est très fréquent dans les zones montagneuses. [3]

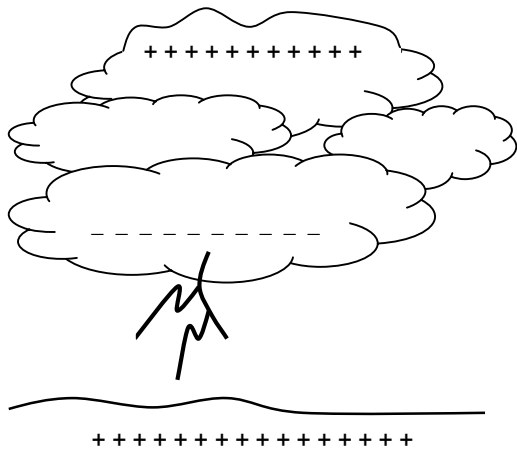
En second lieu, on classe les coups de foudres selon le sens d'écoulement du courant principal.

### **I-6-1-3. Le coup de foudre positif :**

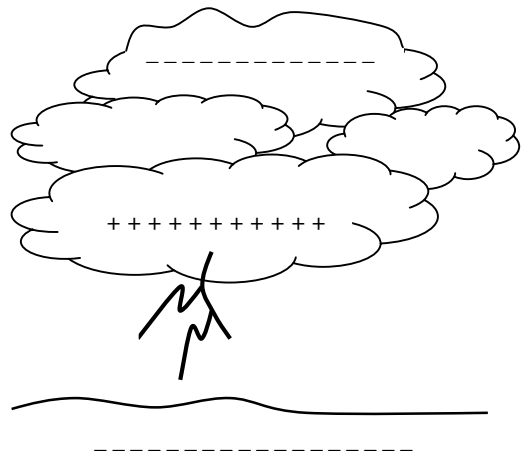
Le bas de nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant une durée de 0.1 à 0.2 s. La durée d'attaque varie entre 20 $\mu$ s à 50 $\mu$ s et l'amplitude du courant des coups positifs est généralement supérieure à celle des coups de foudres négatifs. [3]

### **I-6-1-4. Le coup de foudre négatif :**

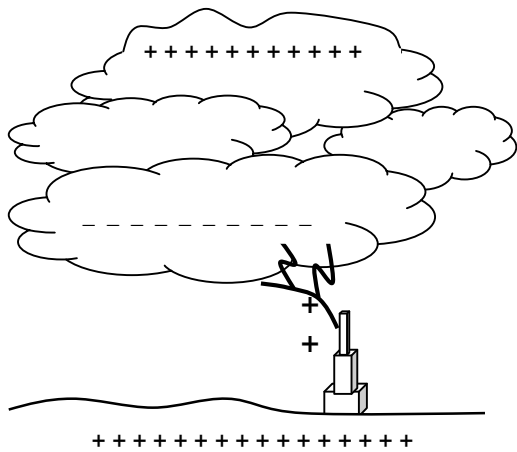
Le bas de nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées. Une première décharge partielle de durée de front de 10 $\mu$ s à 15 $\mu$ s, succède des décharges d'attaque plus raides et de descente plus douce.



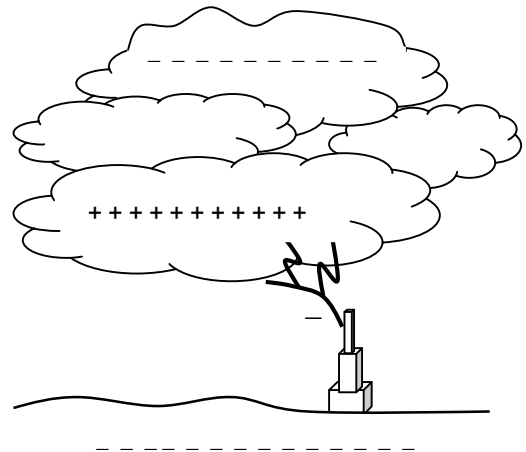
Traceur négatif descendant



Traceur positif descendant



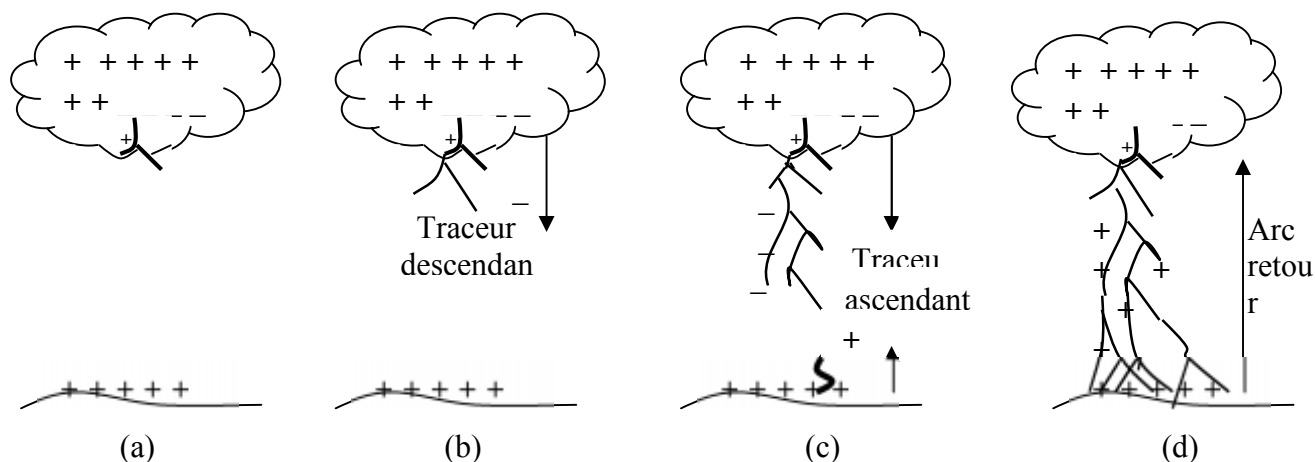
Traceur positif ascendant  
issue d'une structure élevée



Traceur négatif ascendant  
issue d'une structure élevée

**Figure (I-7) :** Les différents types de coupes de foudre

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



**Figure (I-8) :** Représentation schématique d'un coup de foudre négatif descendant

Le bas du cumulo-nimbus est chargé négativement, le sol positivement (a). Le coup de foudre est donc de type négatif. Un traceur chargé négativement se propage par bonds successifs du nuage vers le sol, déterminant le caractère descendant du coup de foudre (b). Lorsque ce traceur négatif approche du sol, le champ électrique est amplifié (les particules de charges opposées s'attirent) et un traceur positif apparaît, ce canal se crée entre le sol et le nuage, dont la différence de charge électrique est importante. Ce canal permet le passage d'un courant électrique de forte intensité : c'est l'arc retour ou coup de foudre (d).

Après le premier éclair ainsi généré, d'autres coups de foudres peuvent se produire utilisant le même canal conducteur jusqu'à la décharge complète du nuage. Signalons qu'une phase de courant persistant fait suite au premier arc de retour. Ce courant est souvent à l'origine des effets thermiques les plus importants.

## **I-7. Les effets de la foudre :**

### **I-7-1. Les effets thermiques :**

Les effets thermiques associés aux phénomènes de foudre peuvent être de plusieurs sortes :

- De la manière générale, le courant électrique s'écoulant dans un corps conducteur entraîne son échauffement. Ce phénomène, qualifié d'être joule, peut être à l'origine, dans le cas de la foudre, de la fusion des conducteurs dont le volume n'est pas suffisant pour évacuer la quantité de chaleur générée par les courants de foudre.

- Lors de coup de foudre, un contact de mauvaise qualité entre deux conducteurs peut être le siège d'un échauffement important conduisant à la fusion des pièces en contact. Cette

fusion pouvant s'accompagner également de la formation d'un arc de retour et de projection de métal porté à haute température, peut constituer un facteur incendiaire important.

- Dans les cas particuliers où les courants de foudre s'écoulent dans un mauvais conducteur (bois, béton), l'échauffement généré est susceptible d'entraîner une vaporisation de l'eau contenue dans le matériau et en conséquence, l'éclatement de ce dernier.

- Aux points de jonctions entre un conducteur (surface métallique) et arc de retour, une grande quantité de charges électrique doit être écoulee dans un temps très bref.

Ce phénomène entraîne un échauffement local important du métal qui, s'il s'avère généralement sans conséquence graves, peut conduire à la perforation de la tôle d'acier de 2 à 3 mm d'épaisseur.

- Enfin, lorsque l'arc de retour traverse des substances inflammables, il est capable de déclencher un incendie directement par conduction de la chaleur ou par rayonnement thermique.

### **I-7-2. L'effet électrique :**

On distingue deux types de surtensions.

- Surtensions conduites : elles sont dues à la chute de la foudre sur ou près d'une ligne aérienne.

Les impulsions de courant vont se propager jusqu'aux habitations à plusieurs kilomètres de point d'impact.

Elles vont être amortie par la longueur de la ligne, mais une partie de l'onde parviendra jusqu'aux récepteurs électriques.

- Surtensions induites : Le coup de foudre qui tombe sur le sol est l'équivalent à une antenne de grande longueur qui rayonne un champ électromagnétique.

Ce champ engendre des surtensions qui se font sentir à plusieurs centaines de mètres, voir plusieurs kilomètres. [4]

### **I-7-3. L'effet électromagnétique :**

- le canal de foudre ainsi que les éléments écoulant le courant de foudre à la terre génèrent un champ électromagnétique. Des courants et tensions induits vont alors apparaître dans les conducteurs proches. A titre d'illustration, signalons qu'à 100m du point d'impact,

un éclair peut induire une tension de 80 V dans une boucle d'un mètre carré formée par un conducteur.

- Les différences de potentiels en résultant peuvent à leur tour entraîner des claquages dans les éléments électriques ou électroniques reliés à ces conducteurs, ces claquages peuvent être également de forte intensité et créer un risque d'inflammation ou de destruction du même type que celui par le coup direct.

Par ailleurs certains équipements sensibles aux perturbations électromagnétique peuvent être perturbés ou détruits par le champ créé par un éclair proche.

### **I-8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a fait une courte synthèse sur le phénomène de la foudre.

La foudre est un phénomène naturel susceptible de détruire une grande diversité de matériels, la quantité d'électricité transportée lors de chaque décharge est extrêmement importante et même dans le cas de petite décharges, provoque des tensions qui excèdent largement les tensions maximum admissibles des matériels électrique, alors la protection contre le danger de la foudre est important.

# *Chapitre II :*

## *Sévérité orageuse et*

### *éléments de*

#### *statistiques.*

## II-1. Introduction :

La sévérité orageuse exprime la fréquence d'occurrence des orages et de la foudre, elle peut être appréciée de façon grossière par le niveau kéraunique et plus précisément mesurée par la densité de foudroisement.

## II-2. Le niveau kéraunique ( $N_K$ ) et la densité de foudroisement ( $N_S$ ) :

Le niveau kéraunique exprime la sévérité orageuse par le nombre de jours par an où le tonner est entendu en un lieu donné.

En France, le niveau kéraunique moyen est d'environ 20. Il dépend fortement de la morphologie du terrain : il dépasse 30 au niveau des régions montagneuses et est inférieure à 10 au niveau des régions côtières. Il peut dépasser les 200 en Ouganda, en Indonésie, ou dans la forêt amazonienne et est très faible dans les zones de hautes pressions.

La densité de foudroisement s'exprime en nombre d'impacts par kilomètre carré et par an. Cette densité est déterminée à partir des capteurs répartis sur un territoire donné.

Des relations empiriques plus ou moins complexes ont été établies entre la densité de foudroisement au sol  $N_S$  et le niveau kéraunique  $N_K$  suivant les caractéristiques météorologique locales. [12]

$$N_S = a N_K^b \quad (1)$$

Avec :

$a$  et  $b$  sont des facteurs variant d'un auteur à un autre.

$N_S$  : La densité de coup de foudre au sol par an par [ $km^2$ ].

$N_K$  : Le niveau kéraunique.

Pour la France il est admet que :

$$N_S = 0.04 N_K^{1.25} \quad (2)$$

Pour un niveau kéraunique moyen de 20, on obtiendrait avec cette formule une densité de foudroisement d'environ 1.7 coup de foudre par an et par kilomètre carré. Cette densité de foudroisement est de l'ordre de 0.2 à 4 pour l'Europe et peut atteindre des valeurs de 10 pour

les Etats –Unis, l’Afrique de sud ou le Mexique. Cette valeur de la densité peut varier d’une région à l’autre, influencé par des facteurs locaux topologiques ou géologiques. [12]

### **II-3. Facteurs locaux influençant le foudroiement :**

La densité de coup de foudre au sol n’est qu’une indication moyenne concernant une région caractérisée par sévérité orageuse donnée.

Il existe probablement des zones localisées particulièrement foudroyées ; on les appelle communément de "nids à orages". [7]

Parmi les facteurs influençant le foudroiement, on peut citer :

- Facteurs topologiques.
- Facteurs géologiques.
- Concentration ionique de l’air (conductivité de l’air).

#### **II-3-1. Facteurs topologiques :**

Canalisé par des vallées ou des fleuves, les mouvement d’aires entraînent les nuages orageux, favorisent l’existence de couloirs orageux. En montagnes, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets. [7]

#### **II-3-2. Facteurs géologiques :**

Le point d’impact préférentiel d’un coup de foudre n’est déterminé que dans la partie basse de la trajectoire du traceur. La présence de structures élevées et de nappes d’eau sont des facteurs bien connus sur la décision d’impact d’un coup de foudre.

Cependant, plusieurs observations concernant le foudroiement des lignes hautes tension, ainsi que les résultats de recherches de laboratoires sur la physique de la décharge, ont montré que la conductivité des sols était aussi un facteur important ayant un pouvoir attractif sur la foudre.

Ainsi, les failles humides, les nappes d’eau et les terrains marécageux ont une attirance préférentielle pour la foudre ; néanmoins, leur zone d’action ne saurait excéder la centaine de mètres au delà de leur contour. [13]

#### **II-3-3. La concentration ionique de l’air.**

Elle est souvent été invoquée pour expliquer un nid d’orages, mais il n’existe pratiquement pas de données expérimentales à partir d’observations sur le terrain.

Les études de laboratoire sur le mécanisme de décharges dans l'air, n'ont pas non plus mis en évidence, jusqu'à présent, un effet de cette conductivité sur le sujet de la décharge. [13]

#### II-4. Fréquence de foudroiement :

La fréquence de foudroiement d'un objet de surface "S" situé dans une région de densité de coup de foudre " $N_S$ " est donnée par la relation : [14]

$$n = N_S \cdot S \quad (3)$$

Avec :

$n$  : Nombre annuel de coups de foudre frappant l'objet en question.

$N_S$  : Densité de coup de foudre.

$S$  : Surface de l'objet au sol.

Pour un objet dont les dimensions horizontales sont très petites devant sa hauteur ( $h_0$ ), la fréquence de foudroiement est donnée par la formule d'Irikson : [14]

$$n = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot N_S \cdot h_0^{2.05} \quad (4)$$

Cette formule est valable pour les objets dont la hauteur n'excède pas 100m.

Avec :  $n$  [ $an^{-1}$ ] ;  $N_S$  [ $Km^{-2} \cdot an^{-1}$ ] ;  $h_0$  [m].

Pour les structures vastes dont les dimensions horizontales sont grandes devant la hauteur, la fréquence de foudroiement est donnée par la formule de Drechsler : [14]

$$n = 10^{-6} \cdot N_S(l+7h_0) (L+3.5h_0) \quad (5)$$

Avec :

$h_0$  : Hauteur du point culminant de la structure en (m).

$L$  : Longueur de la structure en (m).

$l$  : Largeur de la structure en (m).

$N_S$  : Densité de coup de foudre.

Pour une structure élevée ou située en montagne, il faut tenir compte de l'influence de l'objet sur les coups de foudre ascendant.

## II-5. Fréquence de foudroiement d'une structure à protéger :

### II-5-1. Hypothèse de base de protection :

La protection primaire des réseaux électriques (lignes et postes) se base sur l'hypothèse, qu'à chaque échelon de tension nominal du réseau ( $U_n$ ), correspond un courant critique de foudre " $I_{cr}$ " qui entraîne l'amorçage des conducteurs de phase contre la terre ou contournement des distances d'isolement de la structure.

Les tableaux ci-dessous représentent des courants critiques correspondants aux tensions nominales.

Valeur données par Drechsler. [7]

$U_n$ (kV)	$I_{cr}$ (kA)
<b>110</b>	<b>7</b>
<b>220</b>	<b>10</b>
<b>380</b>	<b>15</b>

Tableau (II-1).

Valeurs selon la norme française. [7]

$U_n$ (kV)	$I_{cr}$ (kA)
<b>225</b>	<b>5.40</b>
<b>400</b>	<b>8.50</b>
<b>750</b>	<b>19</b>

Tableau (II-2).

### II-5-2. Cas général d'une structure électrique :

La fréquence de contournement d'isolation due au coup de foudre d'une structure à protéger est donnée par : [14]

$$N_e = N_S \cdot S \cdot P \quad (6)$$

Avec :

$N_e$  : Nombre annuel de contournements dus aux coups de foudres.

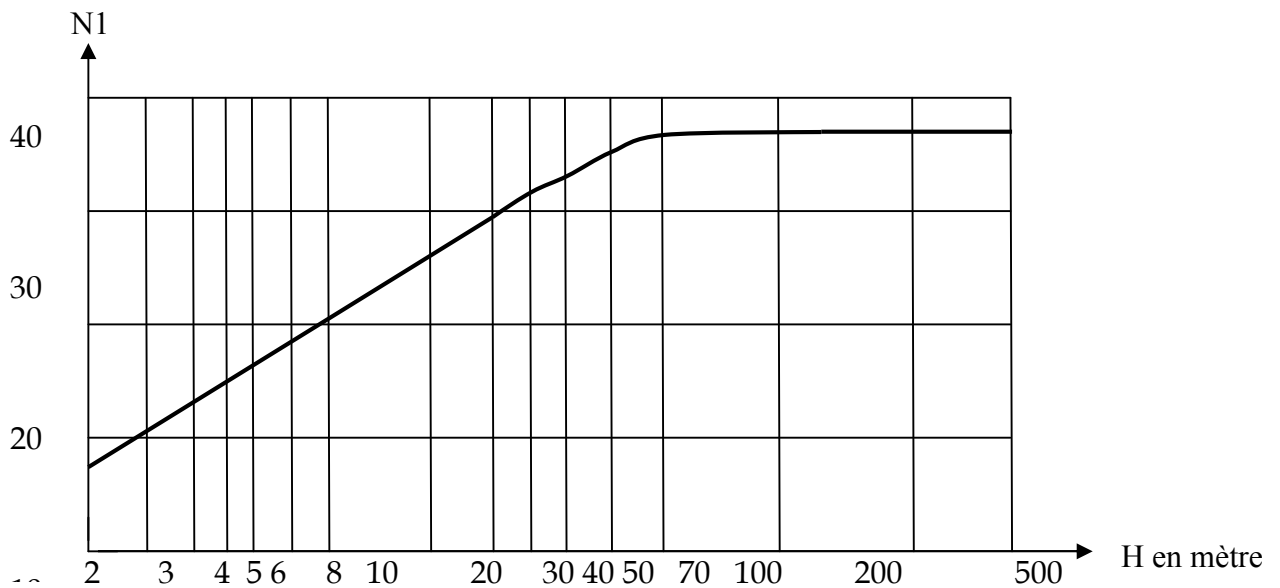
$N_s$  : Densité annuel de coup de foudre [ $km^{-2} \cdot an^{-1}$ ].

$S$  : surface d'attraction [ $km^2$ ].

$P$  : Probabilité qu'un coup de foudre entraîne un contournement d'isolation.

## II-6. Analyse du foudroiement d'une ligne :

A l'aide d'une construction géométrique, le modèle d'impact permet de prévoir la fréquence de foudroiement  $Nl$  d'un conducteur horizontal placé à une hauteur  $H$  au-dessus du sol, en fonction du niveau kéraunique local. Le résultat de cette construction, qui prend également en compte la distribution des intensités des coups de foudre, est représenté sur la figure (II-1). Pour des niveaux kéraunique différents, on appliquera une simple règle de proportionnalité. [6]



**Figure (II-1) :** Nombre de coup de foudre  $Nl$  touchant annuellement un conducteur horizontal de 100 km situé à une hauteur  $H$  au-dessus du sol. [6]

Pour calculer la fréquence de foudroiement d'une ligne, on prend comme hauteur  $H$  (pour les fils de garde) ou  $Y$  (pour les conducteurs, lorsque la ligne ne possède pas de fils de garde), les valeurs sont portés dans le tableau ci-dessous. [6]

Nature de la ligne Nature du terrain	Avec câbles de garde	Sans câbles de garde
plat	$H = 1.1 \cdot (H_p - \frac{2}{3} S_g)$	$H = 1.1 \cdot (Y_p - \frac{2}{3} S_c)$
Vallonné	$H = H_p$	$H = Y_p$
Montagneux	$H = 2H_p$	$H = 2Y_p$

**Tableau (II-3) :** Hauteur des conducteurs d'une ligne à prendre en compte pour le calcul de leur foudroiement. [6]

Avec :

$S_g$  et  $S_c$  : flèche des câbles de garde ou des conducteurs respectivement.

$H_p$  et  $Y_p$  : hauteur au droit du pylône.

Il faut en outre prendre en compte la largeur de la ligne, c'est-à-dire, en pratique, la distance horizontale "  $l$  " entre les phases extrêmes, pour déterminer la surface au sol occupée par la ligne. [6]

La fréquence de foudroiement "  $n$  " sera donnée par :

$$n = N_k \cdot L \left( \frac{N_1}{25} + \frac{l}{70} \right) \quad (7)$$

Où:

$L$ : La longueur de la ligne (km).

$l$  : Largeur de la ligne en mètres.

$N_1$  : La valeur lue sur la figure (III-1) en fonction de  $H$ .

$N_k$ : Le niveau kéraunique local.

Il existe d'autre part la relation empirique suivante, souvent utilisée :

$$n = \frac{Ni}{4} \cdot H^{0.53} \cdot L \quad (8)$$

## II-7. Fréquence de foudroiement du poste :

La fiabilité d'un système de protection primaire contre la foudre, d'une structure électrique, est caractérisée par la grandeur. [14]

$$\tau_c = \frac{1}{n_c} \quad (9)$$

$\tau_c$  : Définie comme étant l'intervalle de temps qui sépare deux contournements successifs des distances d'isolement.

La fiabilité totale d'un système de protection est déterminée par la sommation des composantes suivantes :

$$n_c = n_{CDP} + n_{CDT} + n_{CEM} + n_{CES} \quad (10)$$

Où :

$n_{CDP}$  : Nombre de contournements d'isolation dus aux coups de foudre directs sur les parties actives.

$n_{CDT}$  : Nombre de contournements d'isolation dus aux coups de foudre sur les parties mises à la terre.

$n_{CEM}$  : Nombre de contournements causés par les coups de foudres engendrant des ondes électromagnétiques.

$n_{CES}$  : Nombre de contournements causés par les coups de foudres électrostatiques.

Pour les structures à très hautes tension, la fiabilité d'un système de protection est caractérisée essentiellement par la composante  $n_{CDP}$ , les autres sont négligeables d'où. [14]

$$\tau = \frac{1}{n_{CDP}}$$

Avec:

$$n_{CDP} = N_s \cdot S \cdot P(i)$$

On distingue deux cas possible:

- $i > I_{cr}$  : Tous les coups de foudre dont l'intensité du courant est supérieure aux courants critiques, sont captés par le système de protection.
- $i < I_{cr}$  : Les coups de foudre dont l'intensité du courant est inférieure au courant critique n'entraînent aucun contournement d'isolation de la structure.

Dans le cas où les hauteurs des paratonnerres verticaux obtenus ne répondent pas à certaines conditions de limitation des possibilités de fixation des tiges sur poteaux de la structure, on réduit les valeurs des hauteurs trouvés et on détermine la nouvelle intensité de courant ( $i'_{cr}$ ) de foudre. [14]

L'expression de ce courant est selon Drechsler : [14]

$$i'_{cr} = 1.24 \cdot 10^{-3} \left( \frac{h_e}{2} + \frac{d^2}{8h_e} \right)^2$$

Avec:

$$h_e = h_{ep} + f_{20} = r - 0.5(4r^2 - d^2)^{1/2} \quad (11)$$

Où:

$h_e$  : Hauteur efficace du paratonnerre vertical.

$r$  : Distance d'amorçage (rayon de la sphère fictive).

$d$  : Diamètre du cercle de la sphère reposant sur les quatre tiges.

$h_{ep}$  : Hauteur efficace du paratonnerre sans la flèche.

$f_{20}$  = Flèche maximale du câble à la température de 20°C.

$$r' = 28 \cdot i'_{cr}{}^{1/2} \quad (12)$$

L'expression donnant le nombre de contournement devient :

$$n_c = N_S \cdot S \cdot P(i'_{cr}) \quad (13)$$

Selon le dimensionnement de paratonnerres, trois cas peuvent se présenter:

- 1)  $i_f > i'_{cr}$  : ( $i_f$  = courant de foudre) tous coups de foudre d'intensité  $i_f$  seront captés par le système de protection.

- 2)  $i_f < i_{cr}$  : tous les coups de foudres ne sont pas captés mais n'entraîneront aucun défaut sauf pour ceux dont la durée de front  $t < 1\mu s$ .

On aura:

$$P(i'_{cr}) = P_2(I'_{cr}) = P_1(I < i_{cr}) \cdot P_t(t_f < 1\mu s)$$

- 3)  $i_{cr} \leq i_f \leq i'$ : tous les coups de foudre dont  $i_f$  est compris entre  $i_{cr}$  et  $i'_{cr}$  entraînent des défauts isolation de structure.

$$P(i'_{cr}) = P_1(i_{cr} < i < i'_{cr})$$

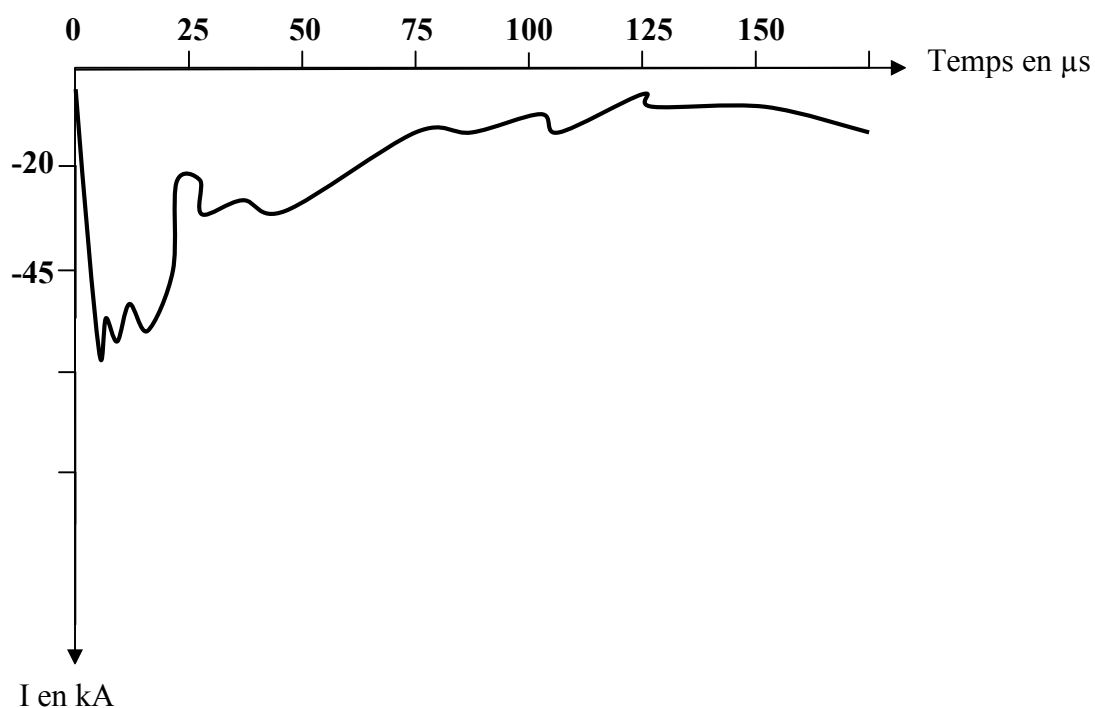
D'où:

La probabilité qu'un coup de foudre entraîne un défaut d'isolation pour une structure de courant critique  $i_{cr}$  est protégée contre les coups de foudre dont l'intensité de courant  $i_f$  est supérieure à  $i$  sera :

$$P(i) = P_1(i < i_{cr}) \cdot P_t(t_f < 1\mu s) + P(i < i'_{cr})$$

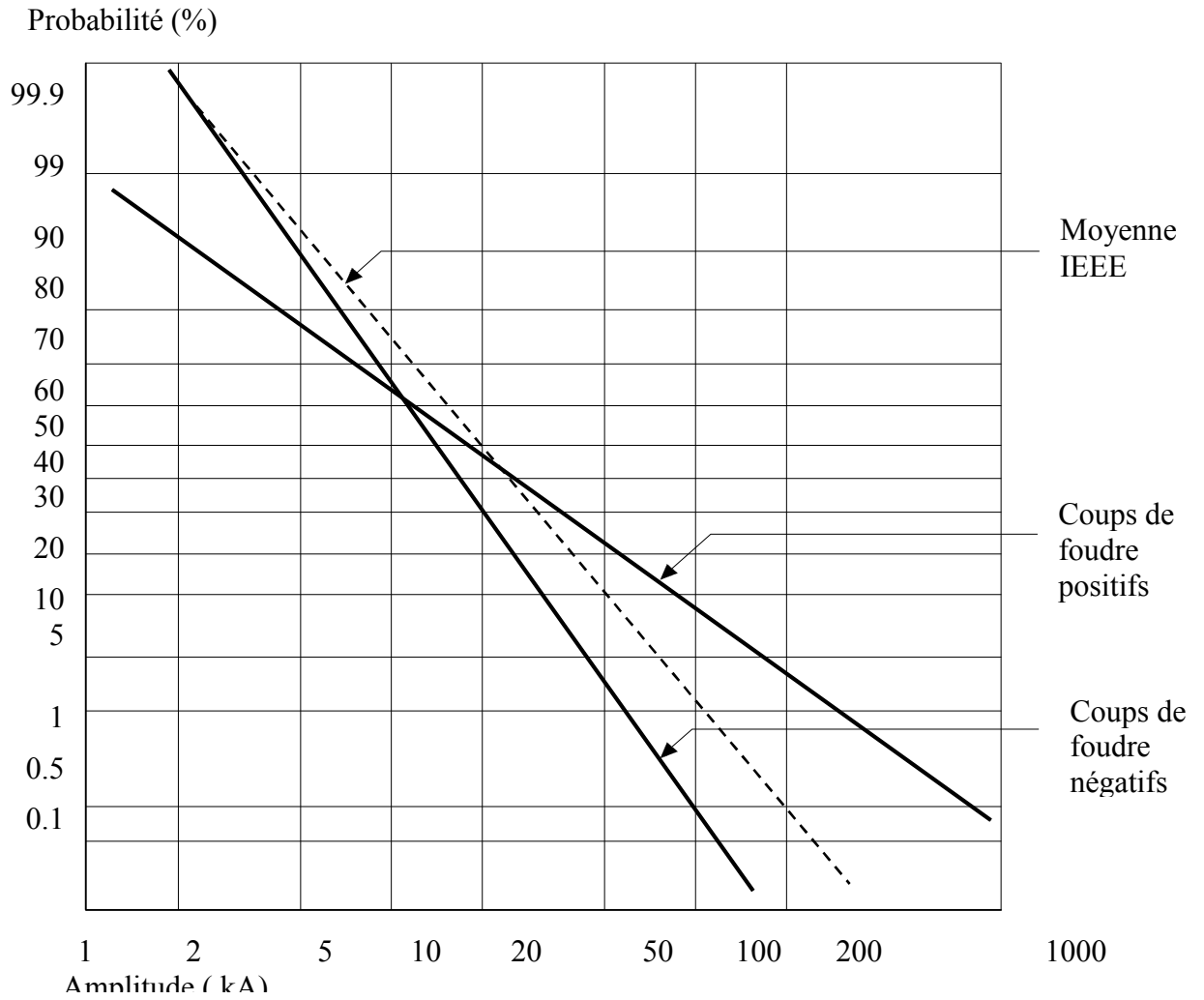
## II-8. Forme et amplitude de l'onde de foudre:

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharge d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps. La forme d'onde réelle est très variable : elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale de quelques microsecondes à  $20\mu s$  suivi d'une queue de décroissement de quelques dizaines de  $\mu s$ . [4]

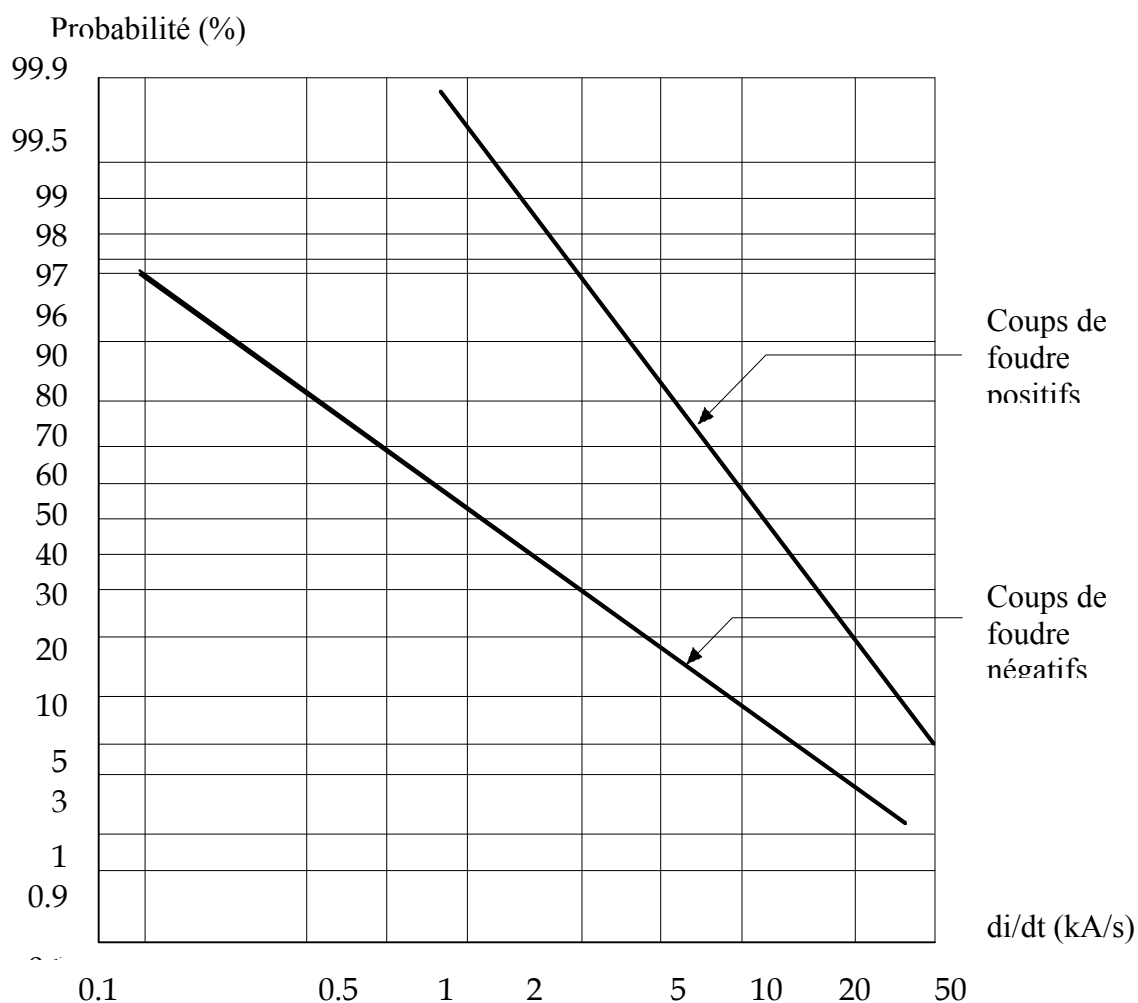


**Figure (II-2) :** Oscillogramme d'un courant de foudre. [4]

L'amplitude de courant de foudre est le paramètre à prendre en compte lors d'un foudroiement direct. Elle permet notamment de calculer les déférences de potentiel induites par la circulation du courant de foudre. L'amplitude des courants de foudre varie suivant une loi de distribution log-normal. On détermine alors la probabilité de dépassement d'une amplitude donnée. On remarque par exemple, que pour la courbe moyenne la probabilité de dépasser une amplitude de 100kA est de 5%. Ce qui signifie que 95% des coups de foudre ont une amplitude inférieure à 100kA. [4]



**Figure (II-3) :** Distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs. [15]



**Figure (II-4) :** Distribution statistique expérimentale, en raideur de front, des courants de foudre, positifs et négatifs, [15]

### II-9. Les caractéristiques d'un coup de foudre :

Les caractéristiques d'un coup de foudre sont données dans le tableau suivant :

Probabilité de dépassement (%)	Valeur crête du courant (kA)	Pente (kA/ $\mu$ s)	Durée totale (s)	Nombre de décharge
<b>50</b>	<b>26</b>	<b>48</b>	<b>0.09</b>	<b>2</b>
<b>10</b>	<b>73</b>	<b>74</b>	<b>0.56</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>180</b>	<b>97</b>	<b>2.7</b>	<b>12</b>

**Tableau (II-4) :** Principales caractéristique d'un coup de foudre. [7]

## **II-10. Conclusion :**

L'activité orageuse en un lieu donné, peut être quantifiée par un niveau kéraunique qui permet d'obtenir une indication plus précise sur la densité de coups de foudre.

***Chapitre III :***  
***Dispositifs de***  
***protection contre les***  
***surtensions de foudre.***

### **III-1. Introduction :**

Les systèmes d'énergie électrique peuvent être assujettis à des surtensions de toute nature. Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants sur les constituants du système d'énergie électrique ; par suite la nécessité de se protéger contre ces surtensions est indispensable. Pour cela, il faut utiliser des moyens de protections très performants et fiables. Dans le transport d'énergie électrique les chercheurs ont été toujours confrontés à la foudre qui est un phénomène perturbateur important sur la gamme de puissance et tous les niveaux de tensions.

Les coups de foudre peuvent être direct s'ils tombent directement sur une structure, les moyens de protection dans ce cas sont les paratonnerres (protection primaire), est indirect s'ils frappent le sol au voisinage d'une structure, les moyens de protection dans ce cas sont les éclateurs et les parafoudres (protection secondaire).

### **III-2. La protection primaire :**

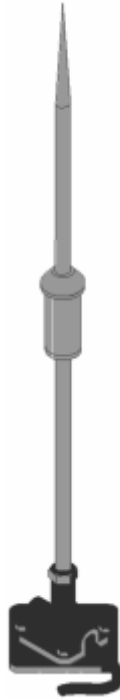
Pour protéger une structure contre les coups de foudre, il convient de privilégier un point d'impact possible afin d'épargner le reste de la structure et de faciliter l'écoulement de courant électrique vers le sol en minimisant l'impédance de parcours utilisée par la foudre. [8] Le dispositif de protection qui répond à cette préoccupation est le paratonnerre.

Le paratonnerre est un dispositif inventé en 1752 par Benjamin Franklin. Il était conçu à l'origine afin d'écouler à la terre le fluide électrique contenu dans le nuage et ainsi empêcher la foudre de tomber. [2]

#### **III-2-1. Le paratonnerre à tige simple :**

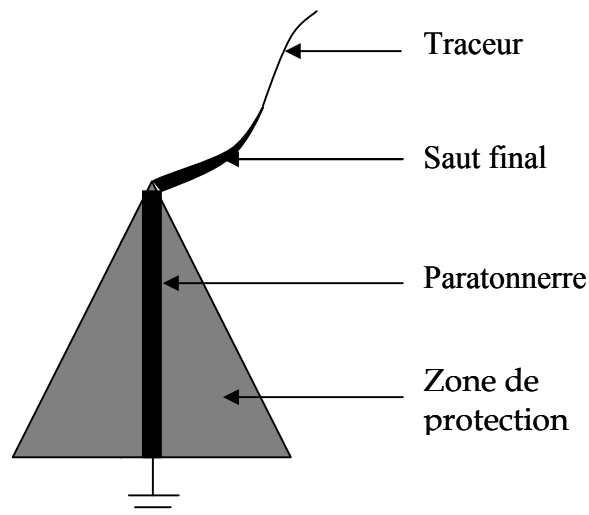
Le paratonnerre est un conducteur relié à la terre qui présente au sommet une forme pointue. Il est placé sur ou près de l'installation à protéger.

Grâce au pouvoir de pointe, une décharge créée au sommet du paratonnerre progresse à la rencontre et la capture de traceur de la foudre pour dévier le courant vers la terre.



**Figure (III-1) :** Paratonnerre à tige simple [5].

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



**Figure (III-2) :** Zone de protection d'un paratonnerre à tige simple. [1]

### III-2-2. Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA) :

C'est un paratonnerre à tige simple, équipé d'un système électrique ou électronique générant une avance à l'amorçage (avance au démarrage de la pré-décharge ascendante), il est mis à l'évidence lorsqu'il est comparé dans les mêmes conditions à un paratonnerre à tige simple.

Ce dispositif d'amorçage permet de réduire le temps de propagation et de formation de la décharge ascendante.

Il assure une plus grande efficacité pour la capture de la foudre qu'un paratonnerre passif à tige. [5]

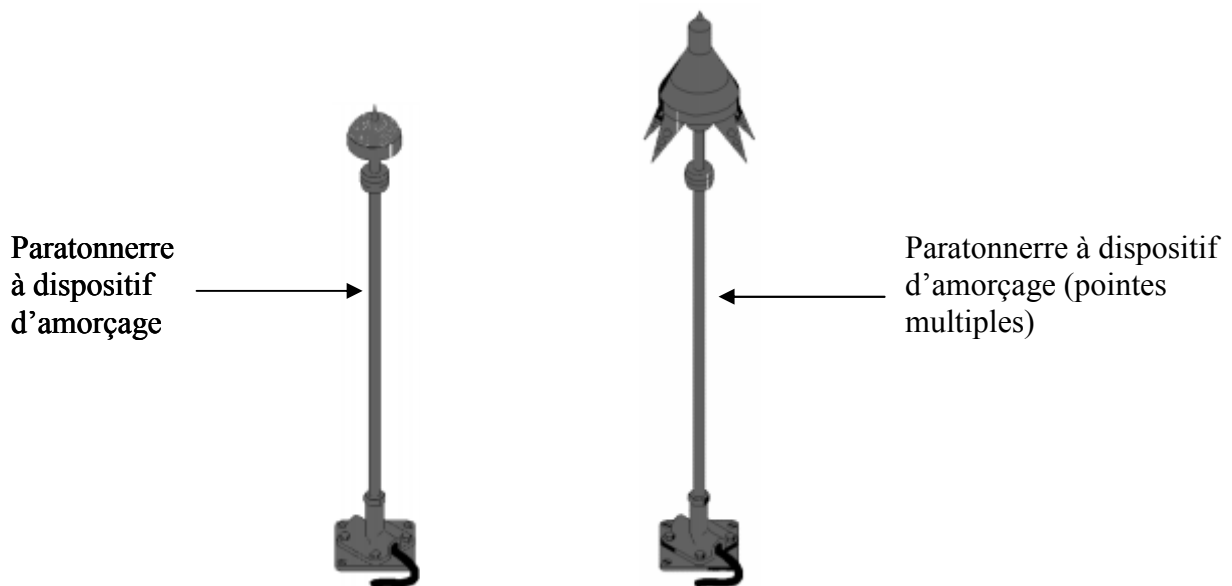


Figure (III-7) : Paratonnerre à dispositif d'amorçage. [5]

### III-2-3. Le paratonnerre à cage maillée : (cage de Faraday)

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

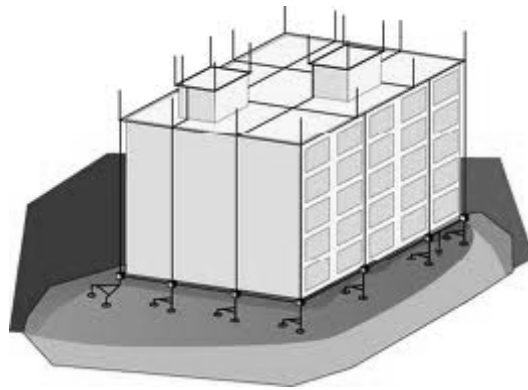


Figure (III-8) : Paratonnerre à cage maillée

### III-2-4. Le paratonnerre à fils tendus (câbles de garde) :

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

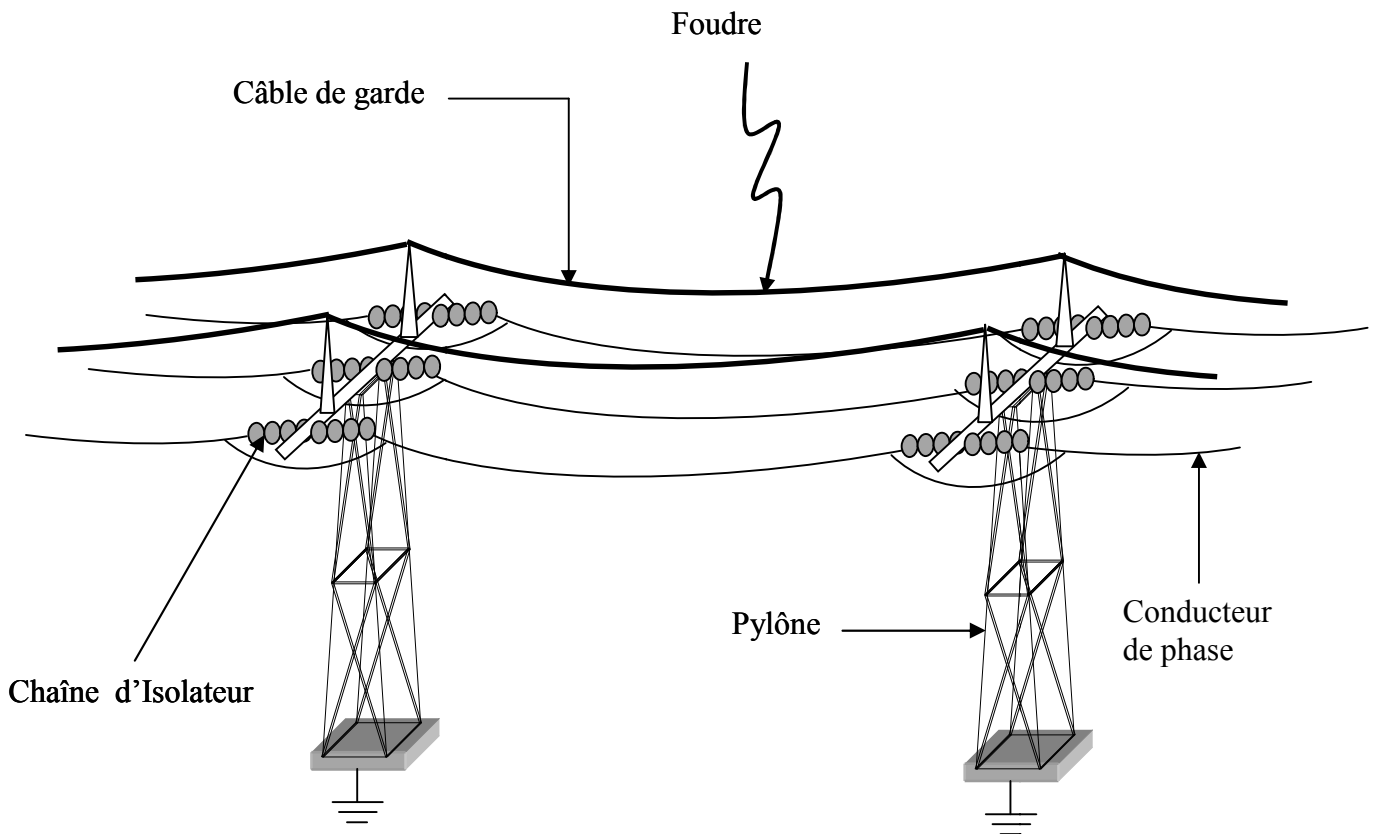


Figure (III-8) : Schéma de câbles de garde.

- **Remarques :**

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

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

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

- Pour les lignes de tensions inférieures à 90kV, les fils de garde ne constituent qu'une protection illusoire. [6]

### **III-3. Le modèle électro-géométrique :**

Ce modèle élaboré principalement par Armstrong Golde, Draveniza et Whitehead a été vérifié au cours d'une importante campagne d'investigations sur des lignes de transport d'énergie électriques à haut tension. Il est donc particulièrement bien adapté à l'étude de la protection des lignes. [7]

Son but est de déterminer les points d'impact les plus probables de la foudre, afin de pouvoir apprécier l'ampleur de dégâts éventuels, et de prévoir, si nécessaire, des dispositifs de protection appropriés : paratonnerre, cages de Faraday, fils tendus.

Il faut savoir que sous sa forme actuelle, le modèle électro-géométrique n'est valable que pour les coups descendants négatifs.

Le modèle électro-géométrique définit essentiellement une distance  $d$ , appelée distance d'amorçage en fonction de la valeur de crête du courant de foudre et qui s'exprime par :

$$d = f(I_{cr})$$

$d$  : Distance entre traceur et objet au sol (en mètre).

$I_{cr}$  : Valeur de crête du courant de foudre qui va suivre (en kilo-ampères).

La relation liant la distance d'amorçage à l'intensité crête de courant de foudre peut être décrite par plusieurs formules selon leurs auteurs correspondants, elles sont présentées dans le tableau ci-dessous : [3]

Auteur	Formule
Whitehead	$d = 2I_{cr} + 30[1 - \exp(-\frac{I_{cr}}{6.8})]$ , $d = 7,1(I_{cr})^{0,75}$
Golde	$d = 9,4(I_{cr})^{2/3}$
Ruhiling	$d = 28(I_{cr})^{0,5}$

### III-4. Méthode graphique de détermination de la zone de protection :

#### III-4-1. La méthode de la sphère fictive :

##### III-4-1-1. Principe de la méthode :

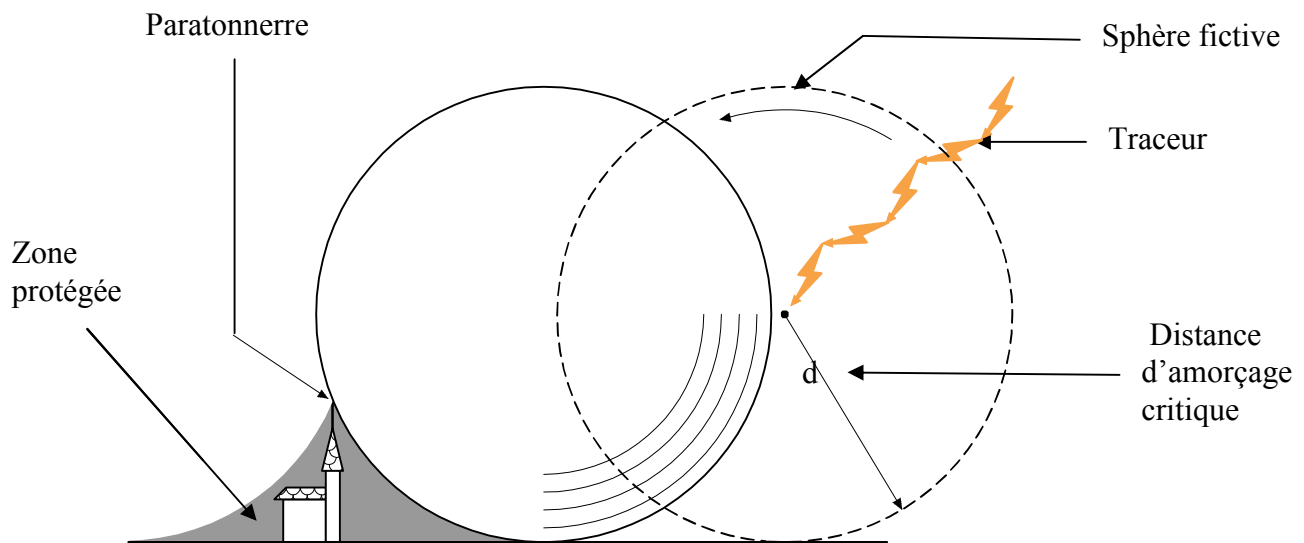
Selon le modèle électro-géométrique, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera, le premier, à la distance d'amorçage "  $d$  " du traceur descendant, même si cet objet est le sol plat lui-même.

Tout se passe donc comme si la pointe de traceur était entourée d'une sphère fictive, de rayon "  $d$  ", centrée sur elle, et comme si cette sphère accompagnait rigidement la pointe au cours de la trajectoire aléatoire de traceur. A l'approche de sol, le premier objet que touchera la sphère déterminera le point d'impact du coup de foudre.

D'où le procédé : on imagine que la sphère fictive de rayon "  $d$  " est roulée au sol, dans toute les directions, sans jamais perdre le contact, soit avec le sol, soit avec un objet proéminent.

Si au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection sans jamais pouvoir toucher l'un des objets à protéger, alors la protection de ceux-ci est assurée.

Si au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec l'un des objets à protéger, le dispositif de protection devra être remanié jusqu'à ce qu'aucun de ces contacts ne puissent plus se produire. [7]



**Figure (III-11) :** Application de la méthode de la sphère fictive. [3]

Le rayon de la sphère augmente lorsque le courant de foudre augmente. Lorsqu'un système de protection est mis en place pour protéger une structure contre les coups de foudre de forte intensité, le système ne protégera qu'en partie de la structure contre les coups de foudre de faible intensité. [3]

❖ **Les différentes zones de protection :**

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

**III-5. Protection secondaire :**

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

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

### III-5-1. Les éclateurs :

Les éclateurs constituent un moyen de protection contre les surtensions, utilisés depuis longtemps en raison de leurs simplicités.

On distingue deux types d'éclateurs :

#### III-5-1-1. Eclateur avec tige anti-oiseaux :

Il est constitué de deux électrodes, la première est reliée au conducteur à protéger, la deuxième est reliée à la terre. [4]

Ces deux électrodes sont montées sur une chaîne d'isolateurs. Les électrodes constituant les éclateurs, utilisés dans les réseaux de distribution moyenne tension, sont en fer de section moins de  $80 \text{ mm}^2$  ; la liaison à la terre est établie par un conducteur en cuivre de  $29 \text{ mm}^2$  de section. [9]

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

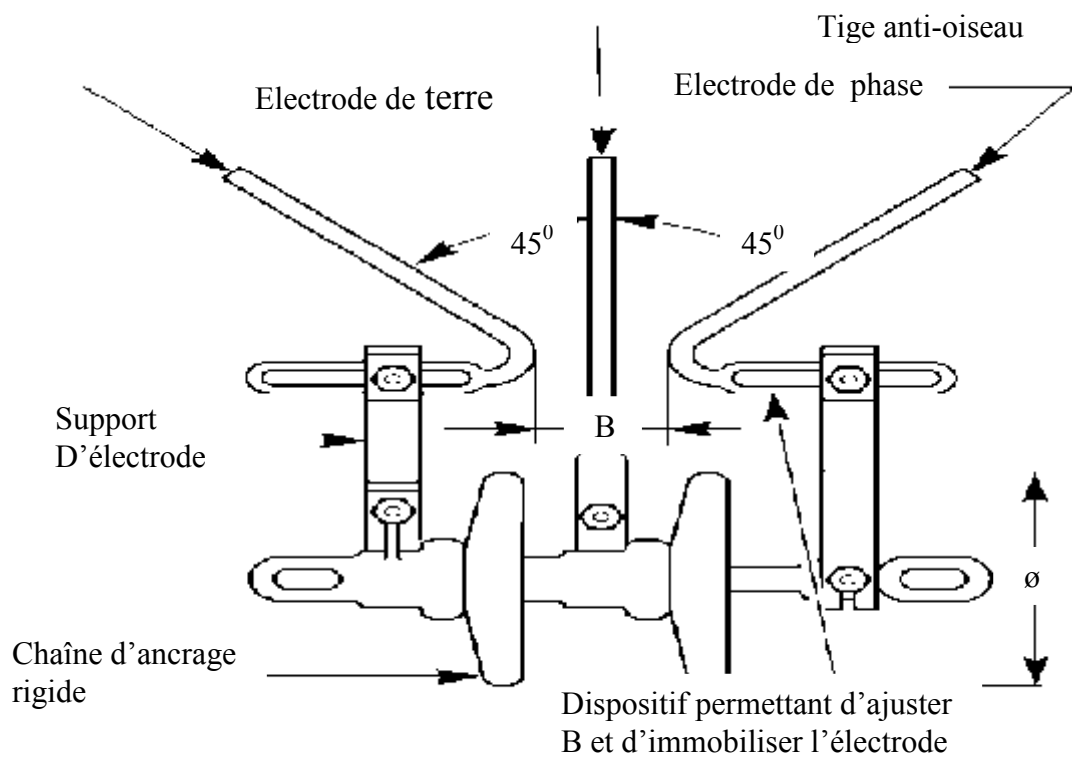


Figure (III-1) : Eclateur avec tige anti-oiseaux. [4]

### III-5-1-2 Eclateur à tige :

Les éclateurs à tiges sont utilisés à l'intérieur du poste, sur les réseaux à neutre mis à la terre ou le courant de défaut franc à la terre peut atteindre 300 A. [9]

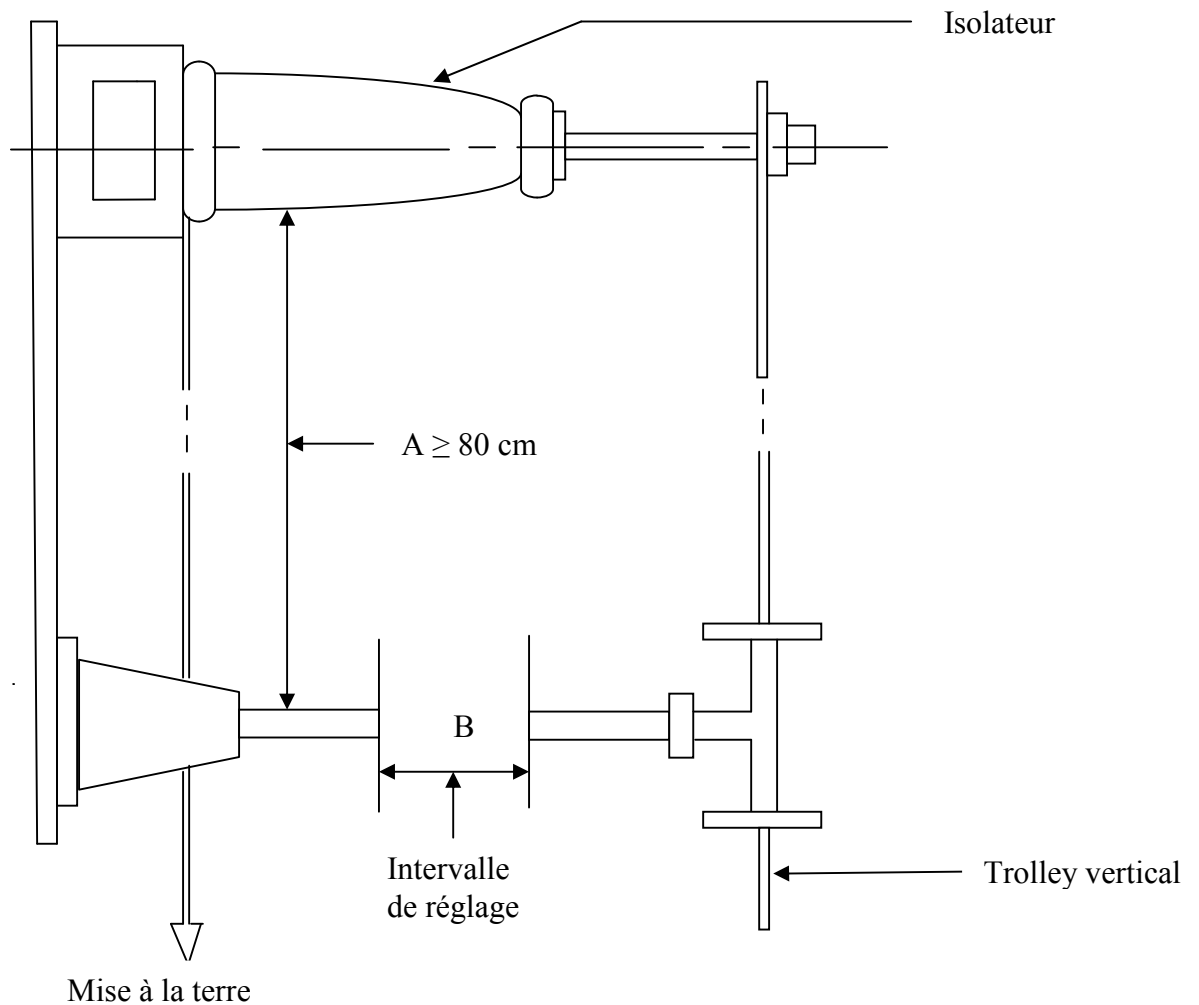
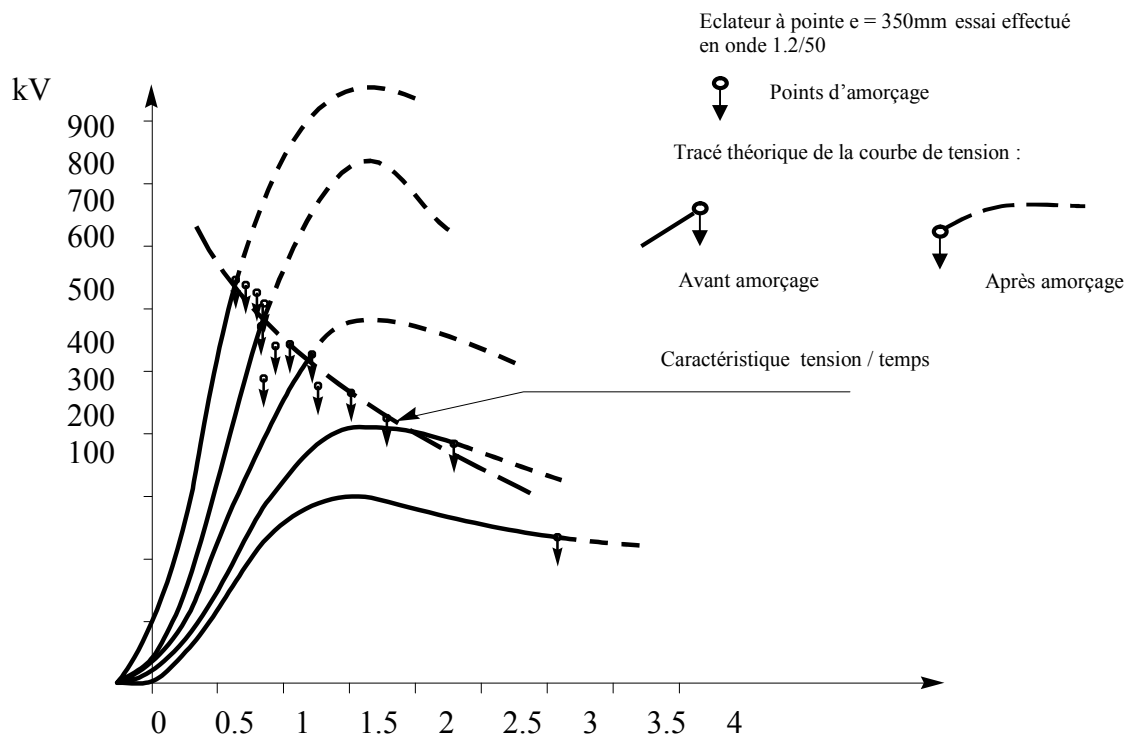


Figure (III-2) : Eclateur à tige. [9]



**Figure (III-3) :** Comportement d'un éclateur à pointes, en choc de foudre normalisé, en fonction de la valeur de crête. [2]

### III-5-1-3. Avantages et inconvénients :

Les principaux avantages des éclateurs sont :

- leurs faible prix.
- leurs simplicités.
- la possibilité de réglage de la tension d'amorçage.

Les principaux inconvénients sont :

- Une fois amorcé entre les deux électrodes, l'arc ne se désamorce pas spontanément.

Le défaut artificiel ainsi créé doit être éliminé par l'action des protections et des disjoncteurs associés. De ce fait, l'éclateur ne doit pas fonctionner lors de surtensions de manœuvre. Il est par ailleurs, à l'origine de coupures brèves très gênantes pour la qualité de service, spécialement en **HT**.

-Le fonctionnement de l'éclateur conduit à une onde de tension coupée à front raide susceptible de provoquer des avaries au matériel bobiné situé à proximité.

-Le niveau d'amorçage est très fluctuant. Il dépend de nombreux paramètres tels que les conditions atmosphériques, l'état d'ionisations de l'air, mais surtout de la vitesse de montée

de la surtension appliquée. En particulier, lors de surtensions à front raide, la tension réellement atteinte sur l'appareil à protéger peut dépasser le niveau de protection de l'éclateur.

-Les éclateurs sont sensibles aux agressions extérieures (neige, paille, etc...)

Malgré ses défauts et, surtout à cause de son faible prix, l'éclateur, sur les réseaux de distribution et de transport d'électricité (jusqu'à 225kV), reste le dispositif de protection privilégié. En tout état de cause, l'éclateur reste un excellent moyen de protection des isolations dans l'air, les niveaux d'isolement du matériel à protéger subissant les mêmes fluctuations des éclateurs. En revanche, il moins bien adapté à la protection des autres matériels tels que les transformateurs, les câbles, les postes électriques sous enveloppe métallique, etc... [4]

❖ **Définition des surtensions de manœuvre** : tout changement brusque de configuration d'un réseau (fonctionnement de disjoncteur, apparition d'un défaut, etc...) engendre également une surtension transitoire rapide, dite surtension de manœuvre, qui se propage sur un réseau et dont la durée peut s'échelonner de quelques dizaines microsecondes à quelque dizaines millisecondes. Ces surtensions sont plus fortes lors de l'ouverture des disjoncteurs sur charge réactive (coupure de ligne à vide, de transformateur à vide...), et dans le cas de la fermeture ou de la refermeture d'une ligne. [10]

### III-5-2. Les parafoudres :

Pour palier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et une bonne continuité de service.

Le nom parafoudre vient de fait que, historiquement, le foudroiement était la première cause de surtension contre la quelle on désirait se protéger.

Le parafoudre est un dispositif destiné à limiter les surtensions transitoires et à dériver les ondes de courant vers la terre, afin de limiter l'amplitude de cette surtension à une valeur non dangereuse pour l'installation électrique et l'appareillage électrique.

En cas de surtension supérieure au seuil  $U_c$ , le parafoudre devient conducteur et évacue rapidement l'énergie à la terre.

Les parafoudres à résistances variables avec un ou plusieurs éclateurs sont les plus répandus dans les installations **HT** et **MT** en exploitation depuis quelques années. La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleurs. [4]

### III-5-2-1. Parafoudre au carbure de silicium SiC à éclateurs :

Un parafoudre à SiC est constitué par des résistances non linéaires au carbure de silicium en série avec des éclateurs. Lorsque la tension dépasse le niveau d'amorçage les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement de courant de décharge à travers les résistances. Lorsque la tension augmente, les valeurs de résistances diminuent rapidement ainsi la surtension. Une fois la tension revenue à la valeur normal du réseau, le courant est limité à une faible intensité est peut être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro. [11]

#### III-5-2-1-1. Principe de fonctionnement :

Dans ce type de parafoudre, on associe à un éclateur une résistance variable (varistance) qui limite le courant après passage de l'onde de choc.

Après écoulement de l'onde de choc à la terre, le parafoudre n'est soumis qu'à la tension du réseau, et le courant de suite se trouve limité par la varistance.

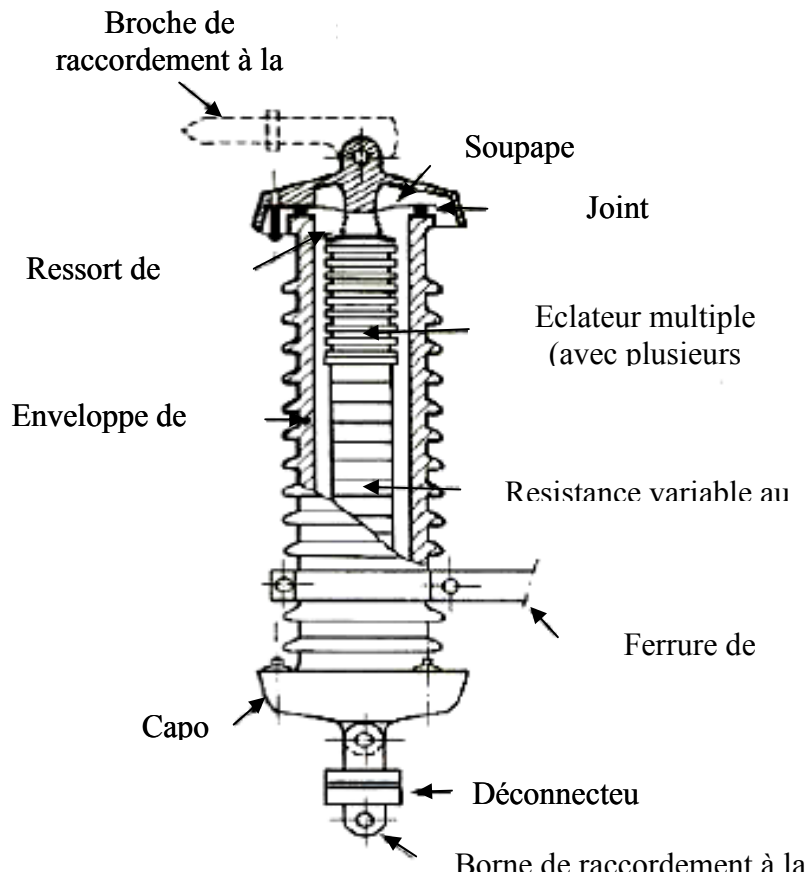
La tension résiduelle est maintenue proche du niveau d'amorçage grâce à la variation de la résistance. En effet, cette résistance diminue avec l'augmentation de courant.

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à varistances et éclateurs. La plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC). [4]

Les performances d'un parafoudre à SiC peuvent se traduire par le rapport :

$$\frac{\text{Valeur crête (tension 100\% d'amorçage à la foudre)}}{\text{Valeur efficace (tension d'extinction spontanée)}}$$

Ce rapport est de l'ordre de : 3,2 pour les parafoudres MT, et de 2,3 pour les parafoudres HT.[6]



**Figure (III-4) :** Parafoudre à résistance variable avec éclateur. [4]

**Les avantages de parafoudre SiC :**

- Elimination de défaut sans l'intervention des protections.
- La présence des résistances en série avec les éclateurs empêche l'apparition d'un front raide (onde coupée) lors de l'amorçage des éclateurs.
- Les contraintes atmosphériques sont éliminées car l'ensemble est placé dans une enveloppe de porcelaine étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).
- Moins de dispersion de la tension de l'amorçage, surtout pour les surtensions à front raide.
- De part sa construction, un parafoudre à SiC peut limiter les surtensions de manœuvre (particulièrement en THT), ce qui se traduit par une diminution de niveau de protection par rapport a celui obtenu avec des éclateurs. [11]

### **Les inconvénients de parafoudre SiC :**

- Les céramiques à SiC supportent très mal un écoulement prolongé de courant. De ce fait, un parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une tension temporaire; l'énergie qu'il aurait à dissiper provoquerait sa destruction.
- Pour le fonctionnement correct des parafoudres, il faut que la tension appliquée soit uniformément répartie entre les éclateurs. On fait face à ce problème par des systèmes de répartition de tension résistifs ou capacitifs, ce qui fait augmenter le prix de l'appareil et le rend plus complexe et moins fiables. [11]

❖ **Définition des surtensions temporaires :** les surtensions temporaires sont des surtensions à fréquence industrielle qui résulte des changements brusques de la configuration du réseau, qu'ils soient provoqués ou fortuits (par exemple, déclenchement de charge active ou réactive, apparition d'un défaut à la terre, etc...) et dont la durée dépend de la rapidité des réponses des systèmes de protections et régulateurs de vitesses des alternateurs, celle-ci varie de quelques dixièmes à quelques secondes. [10]

### **III-5-2-2. Parafoudre à oxyde de zinc :**

La technologie des parafoudres à éclateurs dépend fortement du niveau de tension considéré, ces nouveaux composants sont, de la moyenne tension aux plus hautes tensions, constitués simplement d'un empilage de résistances non linéaires à oxyde de zinc. Parfois, mais uniquement pour les très hautes tensions, ils comportent quelques capacités additionnelles placées en parallèle sur les varistances à la partie supérieure des parafoudres et destinées à améliorer la répartition de tension le long de la colonne de varistance. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante généralement en porcelaine ou en matériau synthétique. [4]

#### **III-5-2-2-1. Principe de fonctionnement :**

Le parafoudre à oxyde de zinc est constitué uniquement d'une résistance variable fortement non linéaire.

La résistance passe de  $1,5 \text{ M}\Omega$  à la tension de service (ce qui correspond à un courant de fuite inférieur à  $10 \text{ mA}$ ) à  $15 \Omega$  pendant la décharge.

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

La forte non linéarité de parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension. [4]

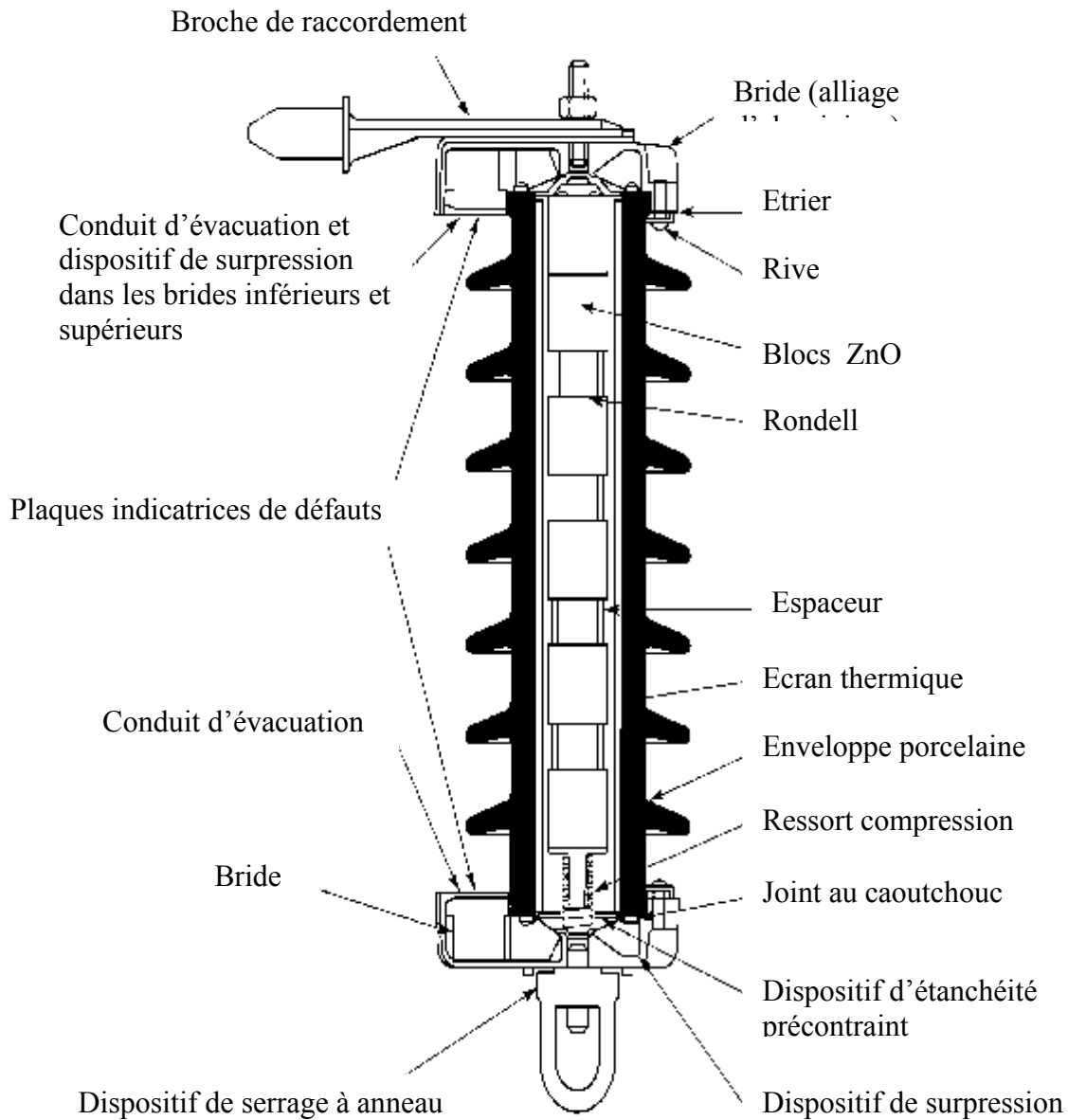
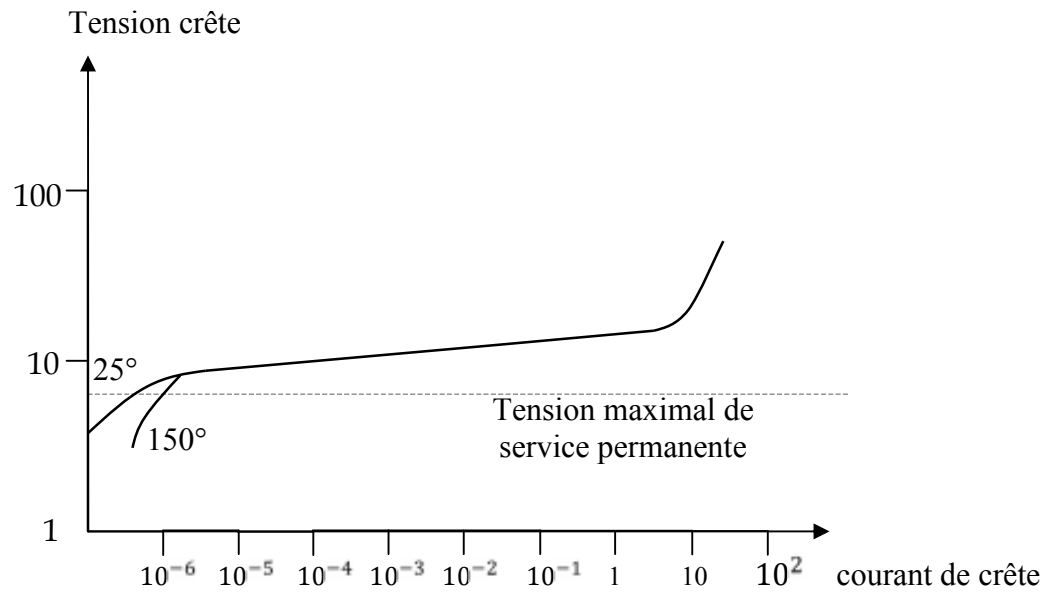


Figure (III-5) : Parafoudre à oxyde de zinc. [4]

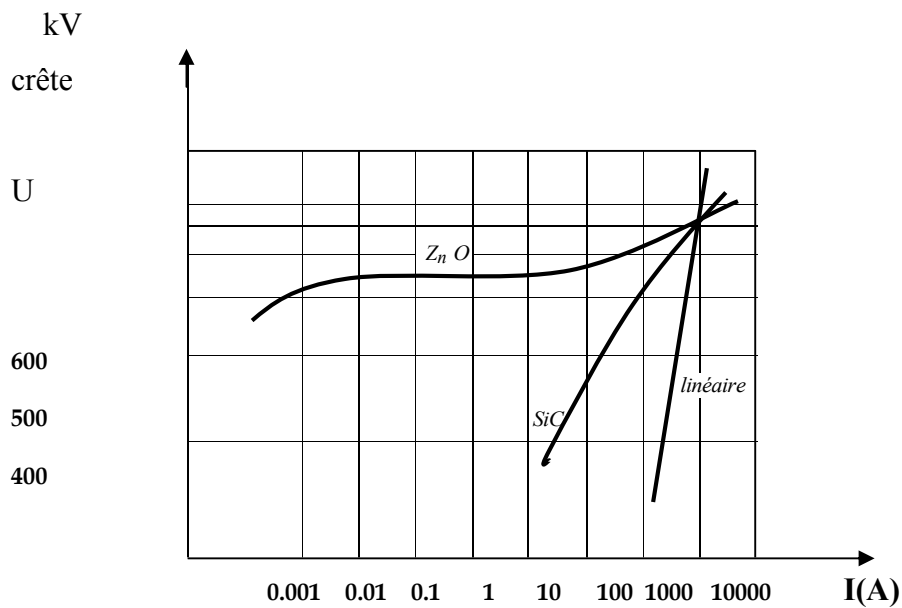


**Figure (III-6) :** Caractéristique typique courant-tension d’une varistance à oxyde de zinc.[11]

**Les avantages des parafoudres à oxyde de zinc :**

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

- Ils sont capables d’absorber des courants de forte intensité toute en maintenant une tension à leurs bornes beaucoup plus faible que celles des parafoudres à SiC. Comme le montre la figure (II-7).



**Figure (III-7) :** Caractéristique de deux parafoudres ayant le même niveau de protection. [4]

- Grâce à leur architecture, il est possible de les utiliser dans des différents milieux.
- En général, la surface des varistances est d'environ la moitié de celle des SiC pour fournir la même protection.
- Etant donné les meilleures caractéristiques de varistances, et de par leur plus simple construction, les parafoudres à ZnO sont plus compacts que les parafoudres conventionnels.
- Les parafoudres à ZnO ne sont pas soumis aux limitations introduites par les éclateurs, par exemple la probabilité de décharges inattendues dues à la contamination des éclateurs est existante.
- Meilleure stabilité des caractéristiques électriques de céramique de ZnO après absorption des chocs énergétiques de très fort courant (quelques dizaines de nanosecondes).
- Excellente réponse aux ondes de front raide, obtenue par l'élimination des éclateurs et le faible temps de réponse des céramiques de ZnO.
- L'écèlement des surtensions à des valeurs plus faibles par les parafoudres à ZnO se traduit par une meilleure protection du matériel. [11]

#### **Les inconvénients des parafoudres à oxyde de zinc :**

- L'ensemble de ces avantages se traduit par un coût élevé par rapport aux éclateurs. Comparés aux parafoudres conventionnels, ils sont plus économiques en THT qu'en MT.

#### **III-5-2-2-2. Choix des parafoudres à oxyde de zinc en HT :**

La méthode générale de choix d'un parafoudre à oxyde de zinc en haute tension consiste à déterminer ses paramètres caractéristiques à partir des données du réseau, à l'endroit où il sera installé.

Les paramètres caractérisant le parafoudre sont :

$U_c$  : Tension de régime permanent.

$U_r$  : Tension assignée.

$I_{nd}$  : Courant nominal de décharge.

Classe de décharge et capacité énergétique.

Caractéristiques mécaniques.

Les données relatives au réseau sont :

$U_m$  : Tension la plus élevée pour le matériel.

- **Détermination d' $U_c$  et  $U_r$  :**

Les tensions  $U_c$  et  $U_r$  peuvent être déterminées directement à partir de la tension la plus élevée pour le matériel  $U_m$  :

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$
$$U_r = 1,25 \cdot U_c$$

Avec :

$U_c$  : tension de régime permanent

$U_r$  : la tension assignée (qui est la valeur spécifiée maximale de la tension efficace à fréquence industriel admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement. Cette tension peut être appliquée de façon continue au parafoudre sans que cela modifie ses caractéristiques de fonctionnement).

- **Détermination de courant nominal de décharge  $I_{nd}$  :**

En pratique, pour la gamme de tension  $1kV \leq U_m \leq 52kV$ , deux valeurs de  $I_{nd}$  sont disponible :  $5 kA$  et  $10 kA$ . [4]

### III-5-3. Installation des parafoudres HT et MT

Dans les réseaux électriques HT et MT, les parafoudres sont installés à l'entrée du poste pour assurer la protection du transformateur et des équipements du poste. Cette protection n'est efficace que si la distance de protection et les règles d'installation sont respectées.

#### III-5-3-1. Distance de protection :

Le phénomène de propagation des ondes montre qu'au point de réflexion (Transformateur MT/BT par exemple), la surtension atteint le double de l'onde incidente. Le parafoudre écrêté à une tension d'amorçage  $U_{rsd}$  (égale à la tension résiduelle pour les parafoudres  $ZnO$ ). S'il est situé à une distance élevée, la tension maximale au niveau du matériel à protéger sera donc  $2U_{rsd}$ . Or, la tenue au choc du matériel est généralement inférieure à  $2U_{rsd}$ .

Pour palier cet inconvénient, on installe le parafoudre à une distance inférieure à la distance de "protection"  $D$ . Le parafoudre subit alors la somme de l'onde incidente et de l'onde réfléchi. Il amorce donc pour une onde incidente inférieure à  $U_{rsd}$ .

Pour une tension de tenue au choc de foudre  $U_{cdf}$ , il faut donc que le parafoudre soit situé à  $D$  telle que : [5]

$$U_{rsd} + 2r \frac{D}{v} \leq U_{cdf}$$

D'ou:

$$D \leq \frac{U_{cdf} - U_{rsd}}{2r} \cdot v$$

#### III-5-4. Causes de défaillance des parafoudres à ZnO :

La cause principale de défaillance d'un parafoudre à ZnO est l'emballement thermique, l'apparition de ce phénomène peut se manifester de plusieurs façons :

- Destruction immédiate du parafoudre par perforation ou par contournement des pastilles lors de surtension très importantes.
- Augmentation de la puissance consommée sous sa tension de service permanent, provoquée par l'absorption de courants très élevés.
- Le vieillissement des céramiques provoque aussi une élévation de la puissance consommée en régime permanent.
- La pollution.
- La dégradation d'une ou plusieurs céramiques qui constituent le parafoudre peut conduire à un emballement thermique. [11]

#### ❖ Définition de l'emballement thermique :

Quant une tension alternative ou continue est appliquée continuellement au parafoudre, le courant de fuite qui traverse les céramiques provoque un échauffement, augmentant la température des céramiques. Si la tension appliquée est en dessous d'un certain seuil la température des pastilles atteint un point d'équilibre : la chaleur générée par les pertes est en équilibre avec la chaleur dissipée par le parafoudre vers l'air ambiant. Cependant, si la tension

appliquée dépasse ce seuil, le courant et la température n'ont pas de point d'équilibre, et ils augmenteront continuellement jusqu'à la destruction de l'appareil. Ce phénomène est appelé " emballement thermique ". [11]

### **III-6. Conclusion :**

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

- les paratonnerres protègent contre les coups de foudre direct par conséquent leur utilité est limitée seulement dans des zones bien déterminées.
- les éclateurs sont réglés pour s'amorcer lors de l'apparition d'une surtension de foudre. Ils ne protègent pas contre les surtensions de manœuvre, ni contre les surtensions temporaires.
- les parafoudres SiC sont capables de protéger le matériel contre les surtensions de foudre et de manœuvre, ils ne doivent jamais fonctionner des surtensions temporaires.
- les parafoudres ZnO, de leur architecture, sont capables de supporter des surtensions temporaires (sans protéger le matériel). Ils offrent une protection efficace contre les surtensions de foudre et de manœuvre.

***Chapitre IV :***  
***Etude des systèmes de***  
***protections du poste***  
***de FREHA.***

#### **IV-1. Introduction :**

De nos jours, la plus grande disponibilité de l'énergie électrique est demandée pour différentes raisons, soit purement économiques (recherche de productivité maximale), soit pour des impératifs de sécurité, ou simplement de confort dans les utilisations domestiques. Il est donc bien évident que dans ce contexte savoir supprimer, ou moins réduire très fortement, les risques et donc les conséquences des surtensions, devient une référence professionnelle.

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

#### **IV-2. Les grandeurs caractéristiques des parafoudres : [6]**

- **Les tensions d'amorçages :**

On considère généralement. La tension 0% d'amorçage et la tension 100% d'amorçage en choc de foudre ou en choc de manœuvre, ainsi que la tension d'amorçage à fréquence industrielle.

- **La tension d'extinction :**

C'est la tension alternative maximale, pour laquelle le parafoudre est capable de couper spontanément le courant à fréquence industrielle, après l'amortissement de la surtension. Ce courant est dit "courant de suite".

La tension d'extinction sert à la définition de la tension nominale du parafoudre.

- **La tension résiduelle :**

Est la tension maximale qui apparaît aux bornes du parafoudre lorsque celui-ci écoule le courant nominal de décharge.

- **Le courant nominal de décharge :**

Est le courant de choc, de forme  $8/20\mu s$ , que l'on utilise pour vérifier les performances d'un parafoudre. Ce courant d'amplitude 2.5kA, 5kA ou 10kA sert aussi à définir la tension résiduelle du parafoudre.

On utilise aussi quelque fois les ondes de courant de forme 4/10 $\mu$ s, et de valeur de crête 100kA, 65kA ou 25kA.

Enfin pour vérifier la capacité d'un parafoudre à supporter la décharge d'une ligne longue, on utilise l'onde de longue durée. C'est une onde rectangulaire de courant dont l'amplitude peut varier entre 50 et 150A, et la durée entre 500 et 2000 $\mu$ s (norme UTE 65-100)

- **Le niveau de protection d'un parafoudre :**

Est par définition, le plus élevé des quatre niveaux de tension suivants :

- Tension 100% d'amorçage au choc de foudre normal (onde 1.2/50 $\mu$ s).
- Tension d'amorçage au choc sur front d'onde, divisée par 1.2 ;
- Tension résiduelle au courant nominal de décharge.
- Valeur de crête la plus élevée de la tension d'amorçage à fréquence industrielle, par fois divisée sur 0.9 ;

#### **IV-3. Distance de protection du parafoudre :**

Du fait du phénomène de propagation et de réflexion des ondes, les parafoudres limitent les surtensions, au niveau de leurs bornes. L'onde écrêtée conserve le dv/dt de son front de montée est susceptible, par réflexion, de développer, au point d'ouverture, une tension double de la tension de limitation. La tension de tenue de l'appareillage étant généralement inférieure au double de la tension résiduelle du parafoudre, il en résulte une distance maximale à ne pas dépasser entre le parafoudre et l'appareillage du poste.

##### **Exemple1** : [2]

- Onde de foudre : 300 kV/s.
- D'où un gradient de tension sur la ligne au passage du front de montée de 1 kV/m.
- Poste MT : tenue à 125 kV choc.
- Parafoudre : tension résiduelle 75 kV.

La contrainte maximale au point ouvert sera générée par la réflexion de la crête de l'onde limitée par le parafoudre. Cette contrainte sera égale à deux fois cette crête.

Pour respecter la limite de 125 kV du matériel, le parafoudre doit donc intervenir au plus tard quand l'onde incidente à son emplacement vaut :

$$\frac{125}{2} = 62.5 \text{ kV} \quad (\text{Instant } T_0 \text{ de la figure IV-2}).$$

Son niveau de mise en conduction (si on l'approxime au niveau de protection) étant de 75 kV,

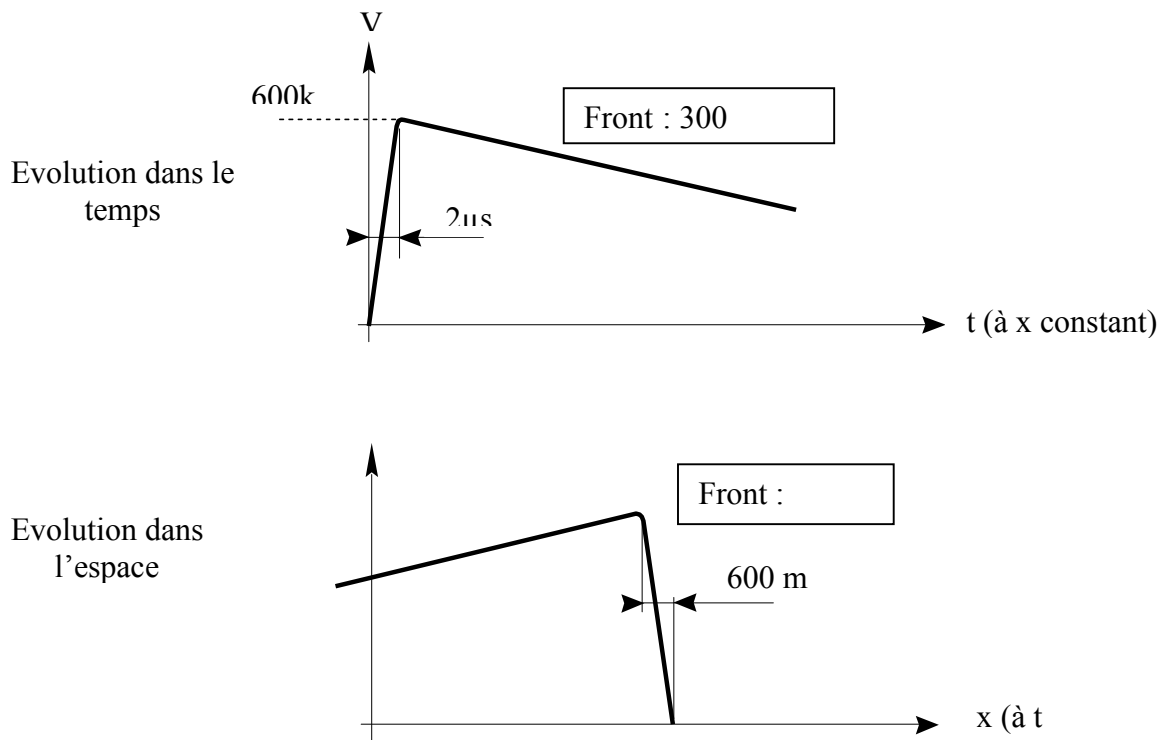
l'intervention ne peut être obtenue que par la superposition à l'onde incidente de l'onde réfléchie. L'onde réfléchie doit avoir atteint une valeur de

$$75 - 62.5 = 12.5 \text{ kV.}$$

La différence entre la valeur incidente (62.5 kV) et la valeur réfléchie (12.5 kV), soit 50 kV, correspond au front d'onde réparti sur le trajet aller-retour entre le parafoudre et le point ouvert. La distance aller-retour est donc au plus égale à 50 m, soit une distance de protection maximale de 25 m.

**Note :**

Le coefficient 2 ne signifie pas doublement de la tension crête mais superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie (figure IV-2).



**Figure (IV-1):** Représentation dans le temps et dans l'espace d'une onde de foudre. [2]

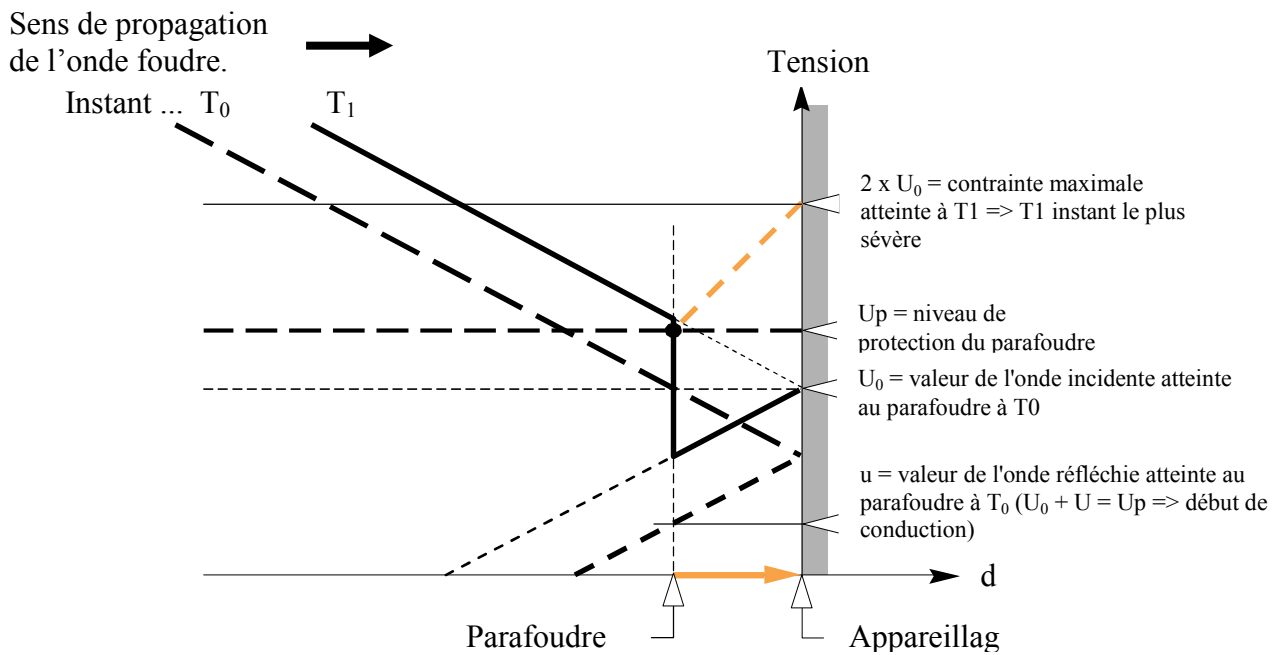
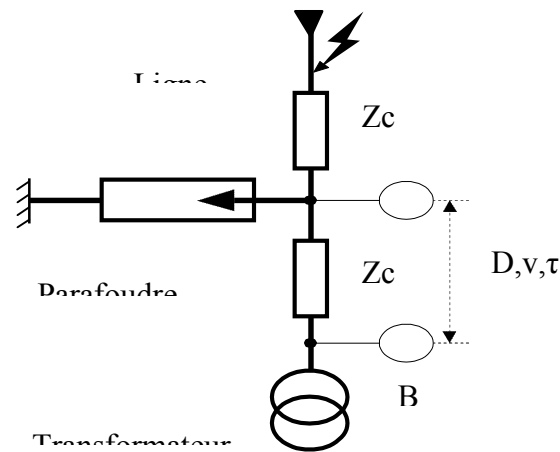


Figure (IV-2): Propagation et réflexion en présence d'un parafoudre.[2]

**Exemple2 :** [2]

Une onde de surs tension se propage sur une ligne et arrive au niveau d'un poste constitué d'un transformateur protégé par un parafoudre (figure IV-3). Les différents éléments sont définis ainsi :



A et B : points de mesure

Figure (IV-3) : schéma d'un circuit (ligne et poste de transformation) pour l'étude de la propagation d'une onde de surs tension de foudre.

- Impédance caractéristique  $Z_c$ .
- Vitesse de propagation d'onde  $v$ .
- Distance parafoudre-transformateur  $D$ .
- Temps de propagation entre A et B :  $\tau = \frac{D}{v}$

■ Parafoudre à caractéristique parfaite :

Pour toute tension appliquée supérieure à  $V_p$ , sa conduction est instantanée et sa limitation rigoureuse à  $V_p$ .

■ La prise de terre a une impédance nulle.

■ Transformateur :

Aux fréquences considérées, son impédance d'entrée est très supérieure à  $Z_c$ , ainsi une onde en tension arrivant sur le transformateur est à peu près totalement réfléchi (doublement de la tension au point de réflexion),

■ Onde de surtension incidente :

Elle a un front de raideur constante  $r = \frac{dv}{dt}$  et une tension constante sur la queue avec

$T = \frac{V_p}{r}$  temps de montée du front de l'onde jusqu'à  $V_p$  (figure IV-3). Trois cas peuvent se présenter, ils sont résumés dans le tableau de la figure (IV-4).

- ❖ Si la tension de choc maximale admissible par le transformateur est fixée à  $1,3 \cdot V_p$ , alors

$$1.3 V_p \geq V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$$

D'où la distance parafoudre- transformateur à ne pas dépasser :

$$D \leq 0.15 \frac{V_p \cdot v}{r} = 0.15 \cdot T \cdot v$$

Application numérique, avec :

$$V_p = 1\,200 \text{ kV},$$

$$v = 300 \text{ m} / \mu\text{s},$$

$$r = 2\,000 \text{ kV} / \mu\text{s},$$

$$\Rightarrow D \leq 27 \text{ m}.$$

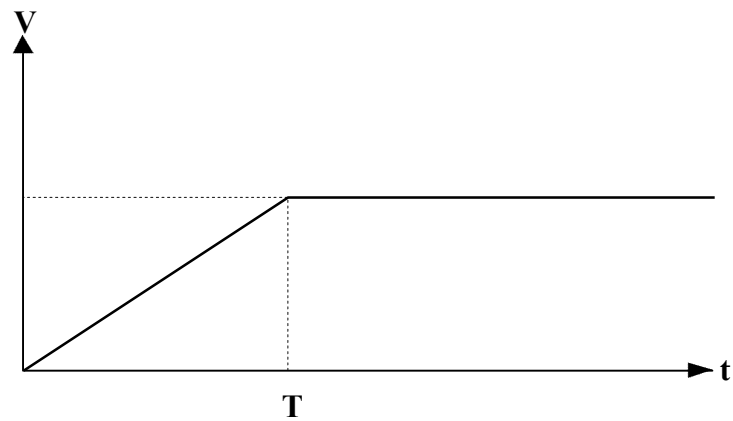


Figure (IV-3) : Représentation d'une onde de surtension

Cas	Critère	Surtension maximale sur le transformateur	Commentaires
1	$D > \frac{v \cdot V_p}{2r}$ Soit : $T < 2\tau$	$2V_p$	front r raide, distance D importante. Pas d'effet de distance du parafoudre sur la tension maximale du transformateur, le parafoudre limite cette tension à $2 V_p$ .
2	$D < \frac{v \cdot V_p}{2r}$ Soit : $T > 2\tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$ $\text{dépassement} = 2 \frac{r \cdot D}{v}$ $= V_p \frac{2\tau}{T}$ $\Rightarrow V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$ $= V_p \left( 1 + \frac{2\tau}{T} \right)$	front r lent, distance D courte. La présence du parafoudre limite, par effet de distance, la tension maximale du transformateur : le dépassement du seuil $V_p$ est proportionnel à D et à r, d'où la notion de «distance de protection».
3	$D = \frac{v \cdot V_p}{2r}$ Soit : $T = 2\tau$	$V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v} = V_p + V_p$ $= 2V_p$	Le cas limite entre 1 et 2

Tableau IV-1 : Surtensions maximales sur le transformateur. [2]

#### IV-4. Câblage des parafoudres: [2]

Lors de l'intervention de limitation du parafoudre, une onde de courant va s'écouler à la terre ; elle résulte de l'application de l'onde de tension à l'impédance caractéristique de la ligne :

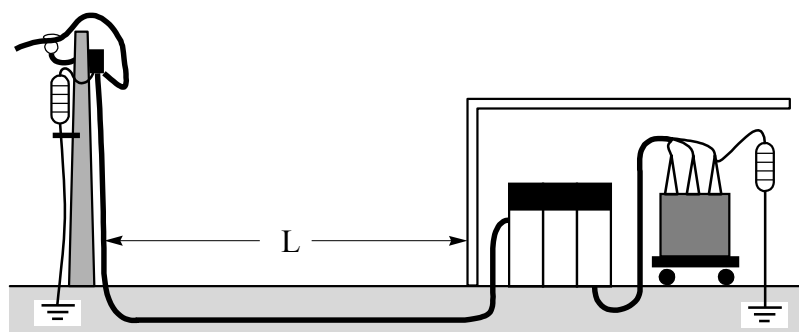
$$I = \frac{U}{Z_c}$$

Le circuit de mise à la terre est alors le siège d'une chute de tension essentiellement inductive et qui peut atteindre des valeurs importantes.

##### Exemple :

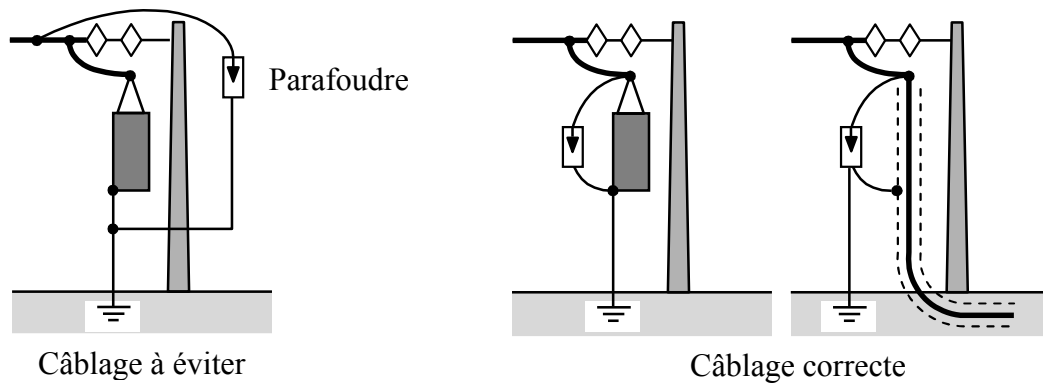
- Onde de courant : 1 kA/  $\mu$  s,
- Inductance du câble de la descente de terre : 1  $\mu$  H/m,
- D'où  $U_L = 1$  kV/m.

Si l'on ne veut pas que cette tension vienne s'additionner à la tension résiduelle, il faut que vis-à-vis du «phénomène foudre» le matériel proposé soit en dérivation aux bornes du parafoudre. Pratiquement, cela consiste à effectuer le branchement comme indiqué par la figure (IV-4). Si la liaison HT/matériel n'est pas faite sur le parafoudre, la longueur des conducteurs doit être la plus faible possible (figure IV-5).



Si  $L < 25$  m : un limiteur de surtension placé sur le poteau est suffisant  
Si  $L \geq 25$  m : un deuxième limiteur aux bornes du transformateur est nécessaire

**Figure (IV-4) :** Emplacement des limiteurs de surtension sur un poste alimenté par un réseau aéro-souterrain



**Figure (IV-5) :** Principe de câblage des parafoudres

#### IV-5. Application sur le poste de FREHA :

##### IV-5-1. Description du poste simplifié de FREHA (60/30 kV) :

Il est alimenté par le poste d'interconnexion et de transformation THT OUED-AISSI (220/60/30 kV) par deux lignes 60 kV. Pour une longueur (distance) de 16 km en conducteurs Almélec de section  $S=288,34 \text{ mm}^2$  ; de réactance  $X=0,42 \Omega$ . Il contient deux transformateurs de couplage étoile-étoile misent à la terre à travers une bobine de point neutre (BPN) pour limitation du courant défaut à 300 A.

Les transformateurs sont protégés par des parafoudres à oxyde de zinc, situés à une distance de 1.40m. [1]

Transformateur 1	Transformateur 2
S= 30MVA	S= 30MVA
$U_{cc} = 10\%$	$U_{cc} = 10\%$
I= 460A	I= 370A
$S_{max} = 23.87\text{MVA}$	$S_{max} = 19.20\text{MVA}$

**Tableau (IV-2) :** Caractéristiques des deux transformateurs.

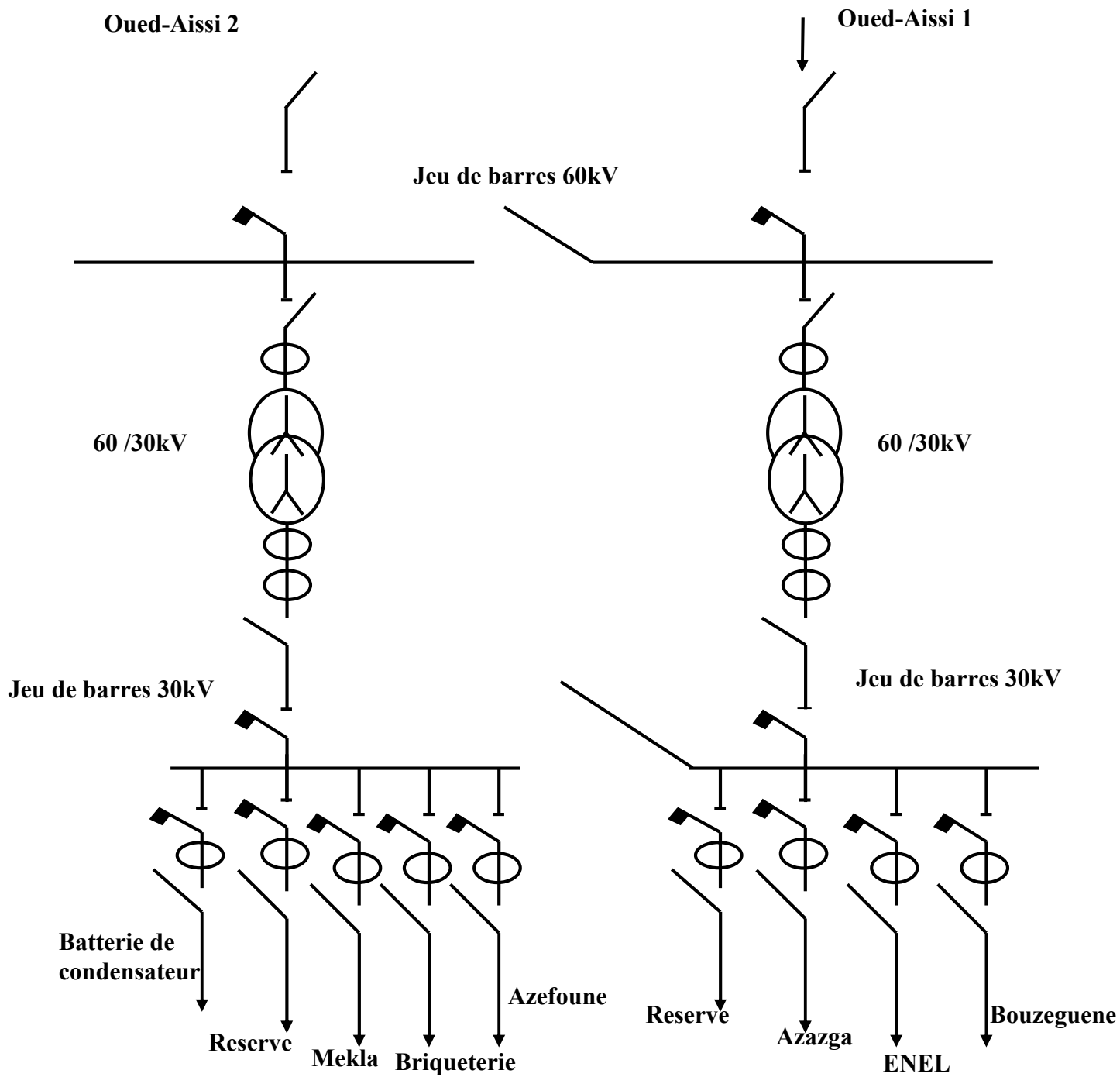


Figure (IV-6) : Schéma du poste de FREHA 60/30kV

## IV-5-2. Calcul de la distance "D" parafoudre-transformateur :

### 1<sup>ère</sup> Méthode :

On a :

$$D \leq \frac{U_{cdf} - U_{rsd}}{2r} \cdot v \quad (1)$$

Avec :

D : Distance entre parafoudre et transformateur.

$U_{cdf}$  : Tension de tenue au choc de foudre.

$U_{rsd}$  : Tension résiduelle.

$r$  : front raideur.

$v$  : vitesse de propagation de l'onde de surtension sur une ligne.

Calcul de  $r$  :

On a :

$$r = \frac{V_p}{T}$$

Avec :

$V_p = 60\text{kV}$  (Tension du poste à protéger).

$T = 1.2\mu\text{s}$  (Temps de montée de l'onde de foudre).

$$\Rightarrow r = \frac{60}{1.2}$$

$$\Rightarrow r = 50\text{kV}/\mu\text{s}$$

Calcul de la vitesse  $v$  :

On a :

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\omega \sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad [7]$$

Calcul de l'impédance  $Z_c$  : [7]

L'impédance  $Z_c$  d'un conducteur de rayon  $r$ , placé à une hauteur  $H$  au dessus de sol est donnée par l'expression classique :

$$Z_c = 60 \ln(2 \times H / r) \quad [\Omega]$$

Cependant, aux surtensions engendrées par les courants de foudre, il apparaît un intense effet de couronne autour des conducteurs qui a pour effet de modifier cette impédance. Alors on suppose que l'effet couronne entoure le conducteur d'une gaine conductrice cylindrique. Le conducteur aura donc un rayon apparent  $r_c$  plus grand que son rayon géométrique.

L'expression de l'impédance devient :

$$Z_c = 60 [\ln(2H/r) \cdot \ln(2H/r_c)]^{1/2} \quad [\Omega]$$

- Pour les conducteurs de phase unique de tension égale ou inférieure à 225 kV on posera  $r_c = 0,06\text{m}$  quel que soit  $r < r_c$ .

$$r = R \cdot (n \cdot \rho / R)^{1/n}$$

avec :

$r$  : Rayon équivalent

$\rho$  : Rayon d'un sous conducteur

$R$  : Rayon géométrique du faisceau

$n$  : Nombre de sous conducteurs

Pour le poste de FREHA, les conducteurs de phases sont en faisceaux de section :

$$S = 288,34 \text{ mm}^2$$

D'où le rayon géométrique correspondant :

$$R = [288,34/\pi]^{1/2} = 9,582 \text{ mm.}$$

Nous avons pour le poste de FREHA :

- Nombre de sous conducteurs :

$$n = 37$$

D'où nous avons le rayon équivalent :

$$r = 10,25 \text{ mm}$$

Vu que nous avons des conducteurs en faisceaux, nous calculerons  $Z_c$  par la formule classique avec :

$$H = 9,5 \text{ m}$$

$$Z_c = 451,49 \Omega$$

$$\Rightarrow L_0 = \frac{X}{l}$$

$$\Rightarrow L_0 = \frac{0,42}{16} \quad \Rightarrow L_0 = 0,02625 \text{ H/km}$$

Avec :

$X$  : L'inductance de la ligne en  $\Omega$ .

$l$  : longueur de la ligne en km.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

$$\Rightarrow C_0 = \frac{L_0}{Z_c^2}$$

$$\Rightarrow C_0 = 0,128 \mu\text{F/km}$$

$$\Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{0,02625 \cdot 0,128 \cdot 10^{-6}}}$$

$$\Rightarrow v = 17,25 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Calcul de la tension de tenue au choc de foudre  $U_{tcf}$ : [6]

On a la tension de tenue au choc de manœuvre :

$$U_{tcm} = 1,35 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{efficace}$$

En ce qui concerne la tenue aux chocs de foudre (choc 1.2 /50 $\mu$ s), on a un facteur d'équivalence :

$$\Rightarrow \frac{U_{tcm}}{U_{tcf}} = 0.83$$

$$\Rightarrow \frac{U_{tcm}}{0.83} = U_{tcf}$$

$$\Rightarrow U_{tcf} = \frac{1.35 \cdot 60}{0.83}$$

$$\Rightarrow U_{tcf} = 97.60 \text{ kV}$$

$$\Rightarrow U_{tcf} \approx 98 \text{ kV}$$

On remplace  $U_{tcf}$ ,  $r$  et  $v$  dans (1) et on obtient :

$$D \leq \frac{U_{cdf} - U_{rsd}}{2r} \cdot v$$

$$\Rightarrow D \leq \frac{98 - 75}{2 \cdot 50} \cdot 17.25$$

$$\Rightarrow D \leq 2.2425 \text{ m}$$

### 2<sup>ème</sup> Méthode :

On a:

$$2 \cdot V_p \geq V_p + 2 \frac{r \cdot D}{v}$$

D'où la distance parafoudre-transformateur à ne pas dépasser :

$$\Rightarrow D \leq 0.5 \frac{v \cdot V_p}{r} = 0.5 \cdot T \cdot v$$

$$\Rightarrow D \leq 0.5 \frac{17.25 \cdot 60}{50} = 0.5 \cdot 1.2 \cdot 17.25$$

$$\Rightarrow D \leq 10.35 \text{ m}$$

### 3<sup>ème</sup> Méthode :

- Front de l'onde de foudre : 500 kV/μs.
- D'où un gradient de tension sur la ligne au passage du front de montée de 28.985 kV/m.
- Poste source : tenue à 120 kV choc.
- Parafoudre : tension résiduelle 75 kV.

$$\frac{120}{2} = 60 \text{ kV}$$

$$75 - 60 = 15\text{kV}$$

$$60 - 15 = 45 \text{ kV}$$

$$\Rightarrow D = \frac{45}{28.985}$$

$$\Rightarrow D = 1.5525 \text{ m}$$

#### **IV-6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a calculé la distance de protection entre parafoudre et transformateur par différentes méthodes, les valeurs obtenues sont compatibles avec celle mesurée au poste source de FREHA, ce qui nous permet de déduire que les parafoudres installés dans ce poste assurent une bonne protection, et que ce poste ne nécessite pas une amélioration au niveau de ses protections.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale :**

La distribution de l'électricité est la dernière phase qu'accomplissent des réseaux électrique, afin d'atteindre le but pour lequel ils sont réalisés. Donc, la satisfaction des clients reste l'ultime finalité de la SONELGAZ en utilisant différents moyens d'assurance de la continuité et la qualité du service, tout en prenant en compte le facteur économique de l'entreprise.

L'étude présentée concerne la détermination de la distance maximale de protection entre parafoudre et transformateur du poste source de FREHA, et de la comparer à celle mesurée sur les lieux. Les valeurs obtenues par les trois différentes méthodes, nous permet de conclure que la position des parafoudres par rapport aux transformateurs est vérifiée, en effet ces parafoudres assurent une bonne protection, et le poste source de FREHA ne nécessite pas une amélioration.

La foudre demeure une perturbation qui est difficile à gérer, et cela est dû aux grandes intensités de ses courants, ainsi qu'aux difficultés de repérer son point d'impact sur le réseau qui est basé sur des probabilités. Nous pouvons dire que les moyens de protection utilisés, ne font que limiter les risques de perturbation, d'ailleurs des recherches dans ce domaine sont toujours en cours, afin de minimiser au maximum les risques.

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

# *Bibliographie*

## **Bibliographie :**

- [1] : Documentation SONALGAZ.
- [2] : Cahier technique Merlin Gerin N° 151 et 168.
- [3] : INERIS « le risque foudre et les installations classées pour la protection de l'environnement », direction des risques accidentels septembre 2001.
- [4] : Schneider Electric : « Guide de conception des réseaux électriques industriels ».
- [5] : Schneider Electric : « La protection des récepteurs contre les surtensions d'origine atmosphérique ».
- [6] : Claude GARY : « la technique des hautes tensions, choix et coordination des isolements ».
- [7] : George le Roy, Claude GARY, Bernard Hutzler, Jacque Lalot, Christain Dubanton : « les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », éditions Eyrolles 1984.
- [8] : Documentation HELITA, novembre 2006.
- [9] : J Favraud : « fonctionnement et protection des réseaux de distribution » EDF 1996.
- [10] : Documentation EDF « La protection contre les surtensions des installations à haute et très haute tension » septembre 1980.
- [11] : Manuel SERRANO : « Etude du comportement électrique et thermique de parafoudres à Oxyde de Zinc » thèse de doctorat 1988.
- [12] : Frédéric LAGO : « modélisation de l'interaction entre un arc électrique et une surface : application au foudroiement d'un aéronef », thèse de doctorat, université Paul Sabatier 2004.
- [13] : R .Belaicha : « contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans le cas des terres mauvaises conductrices » thèse magister, UMMTO 1994.
- [14] : C.GARY, A.Baillet, H.Gigot : « Lignes et postes choix de coordination d'isolement » technique de l'ingénieur D4 II, 670.
- [15] : C.GARY « foudre et protection des bâtiments technique de l'ingénieur D3 II.