

*Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche  
Scientifique*

*Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou*

*Faculté de Génie Electrique et d'Informatique*

*Département Electrotechnique*



## *Projet*

*De fin d'études*

*En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état En  
Electrotechnique*

*Option : Réseaux électriques*

## *THEME*

*Etude de la protection d'un poste  
d'interconnexion de FREHA contre les  
surtensions atmosphériques*

*Proposé par :*

*SONELGAZ*

*Dirigé par:*

*Mr C. BIROUCHE*

*Mr M. CHERIFI*

*présenté par :*

*M<sup>elle</sup> BENABDERHIM SAMIRA*

*M<sup>elle</sup> ZAMOUM HAYAT*

*Promotion 2008-2009*

# *Remerciements*

Nous tenons à remercier notre promoteur, Monsieur C. BIROUCHE enseignant à UMMTO d'avoir bien voulu nous encadrer et pour son aide, qu'il trouve ici notre profonde gratitude et toute notre reconnaissance.

Nous tenons à remercier également notre co-promoteur, Monsieur M. CHERIFI, ingénieur d'état en électrotechnique à la SONELGAZ ; pour son aide.

Nous somme aussi reconnaissantes à tous les enseignants M<sup>r</sup> SAHLI et M<sup>r</sup> BOUDISSA qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont encouragés pour aller au bout de notre travail, en particulier nos familles qui nous ont soutenus.

Nos derniers remerciements vont aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ A mes très chers parents ;
- ❖ A mes chers frères : SOFIANE, MOHAMMED et MOUNIR ;
- ❖ A mes chères sœurs : LYNDA et SYLIA ;
- ❖ A mon beau frère : MOHAND ;
- ❖ A mon neveu : ZINE EDDINE ADAM ;
- ❖ A toute la famille ;
- ❖ A mon binôme : HAYAT et toute sa famille ;
- ❖ A tous mes ami(e)s ;
- ❖ A tous ceux qui me sont cher(e)s ;
- ❖ A toute la promotion 2008/2009.

**B.SAMIRA**

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ A mes très chers parents ;
- ❖ A mes adorables frères : SAMIR, SOFIANE, SAID et YANIS ;
- ❖ A mes chères sœurs : NACIRA et OUARDIA ;
- ❖ A ma défunte grand-mère;
- ❖ A tous mes ami(e)s qui me sont très cher(e)s;
- ❖ A mon binôme : SAMIRA et toute sa famille ;
- ❖ A toute la promotion 2008/2009.

**Z.HAYAT**

# SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
I -LA Foudre.....	3
I -1 INTRODUCTION .....	3
I -2 LES PHENOMENES PRECURSEURS .....	3
I -3 CLASSIFICATION ET FREQUENCE DES COUPS DE Foudre .....	4
I -4 COUP DE Foudre NEGATIF DESCENDANT.....	5
II - PROTECTION DES POSTE CONTRE LA Foudre.....	7
II -1 INTRODUCTION.....	7
II -2 PROTECTION SECONDAIRE.....	7
II -2-1 Coups de foudre tombants à proximité des lignes .....	8
II -2-1-1 Coups de foudre électrostatiques .....	8
II -2-1-2 Coups de foudre électromagnétiques .....	8
II -2-2 Appareils de protection secondaire.....	8
II -2-2-1 Les parafoudres.....	9
II -2-2-2 Les éclateurs .....	9
II -3 PROTECTION PRIMAIRE.....	10
II -3-1 Généralités .....	10
II -4 MODELE ELECTRO-GEOMETRIQUE.....	10
II -4-1Hypothese du modèle .....	10

II -4-2 Application du modèle .....	13
II -4-2-1 Principe de fonctionnement d' un paratonnerre .....	13
II -5 METHODE GRAPHIQUE DE DETERMINATION DE LA ZONE DE PROTECTION : la méthode de la sphère fictive .....	15
II -5-1 Principe de la méthode .....	15
II -6 QUELQUES APPLICATIONS SIMPLES .....	16
II -6-1 Zone de protection d' un paratonnerre vertical .....	16
II -6-2 Application pour 4 tiges verticales identiques .....	17
II -6-3 Application pour 4 tiges verticales de hauteurs différentes.....	18
II -6-4 Application pour un fil tendu horizontalement .....	20
II -6-5 Application pour deux fils horizontaux .....	20
II -7 CRITIQUE DU MODELE ELECTRO-GEOMETRIQUE .....	21
II -7-1 Existence de la décharge ascendante.....	21
II -7-2 Estimation de la distance d' amorçage.....	21
II -7-3 Influence de l' impédance de l' aspérité sur le développement de la décharge ascendante .....	21
II -7-4 Foudroiement des structures élevés .....	21
III-SEVERITE ORAGEUSE ET ELEMENTS DE STATISTIQUES .....	22
III-1 INTRODUCTION .....	22
III-2 SEVERITE ORAGEUSE .....	22
III-2-1 Niveau céramique .....	22
III-2-2 Densité de coups de foudre .....	22
III-2-2-1 Détermination de la densité de coups de foudre .....	23
III-3 FACTEURS LOCAUX INFLUENCANT LE FOUROIEMENT .....	23
III-3-1 Facteurs géologiques .....	24
III-3-2 Facteurs topologiques .....	24

III-3-3 Concentrations ioniques de l'air (conductivité de l'air) .....	24
III-4 FREQUENCE DE FOUROIEMENT .....	24
III-5 FREQUENCE DE FOUROIEMENT D'UNE STRUCTURE A PROTEGER .....	25
III-5-1 Hypothèse de base de protection .....	25
III-5-2 Cas générale d'une structure électrique.....	26
III-5-3 Fréquence de foudroiement du poste .....	27
III-6 DISTRIBUTION DES AMPLITUDES DES COURANTS DE FOUORE .....	29
IV- PROTECTION DU POSTE CONTRE LA FOUORE .....	31
IV-1 Introduction .....	31
IV-2 Description du poste simplifié de Fréha (60 /30kV) .....	31
IV-2-1 Alimentation .....	31
IV-2-2 Schéma du poste de Fréha (60 /30kV) .....	32
IV-3 détermination du courant critique .....	33
IV-3-1 Tension d'isolant au choc .....	33
IV-3-2 Impédance d'onde Z .....	34
IV-4 APPLICATION DU MODELE ELECTO-GEOMETRIQUE.....	36
IV-4-1 Tiges verticales .....	36
IV-4-1-1 Première variante .....	36
IV-4-1-1-1 Calcul des hauteurs des tiges .....	36
IV-4-1-1-2 Calcul du risque de contournement d'isolation .....	38
IV-4-1-2 Tableau (1 <sup>ere</sup> variante) .....	40
IV-4-1-2 Tableau (2 <sup>eme</sup> variante) .....	41
IV-5 Dimensionnement du dispositif de protection .....	42
IV-5-1 Calcul des sections des paratonnerres .....	42
CONCLUSION GENERALE	

## **INTRODUCTION :**

Depuis les premiers âges de l'humanité, l'homme subit les effets néfastes de la foudre.

En effet, cette dernière entraîne des destructions au niveau des installations, notamment des incendies ainsi que de nombreuses victimes chaque année.

Les structures électriques (les lignes de transport d'énergie, les postes) sont particulièrement foudroyées, un impact de foudre près ou sur un conducteur de ligne entraîne presque certainement un court circuit et une mise hors service momentanée.

Deux modes de protection sont à l'usage actuellement, la protection secondaire qui est réalisée à l'aide d'appareils (parafoudre éclateurs) empêchant l'onde de foudre d'atteindre les installations sensibles du poste. Malheureusement cette protection est insuffisante contre les coups de foudre directs d'où la nécessité d'une protection primaire qui permet par l'installation des paratonnerres (câbles de gardes, tiges verticales), le captage et l'écoulement du courant de foudre vers la terre et ainsi d'éviter le foudroiement direct des parties actives du poste.

En Algérie, la protection des structures électriques contre la foudre, en particulier leurs protection contre les coups de foudre directs n'obéit pas à une étude spécifiquement destinée au réseau nationale.

Notre étude consiste à dimensionner une protection contre les coups de foudre d'un poste de transformation sis à FREHA.

Dans notre travail, nous allons procéder de la façon suivante :

Dans le premier chapitre nous décrirons le phénomène de foudre, ainsi nous déterminerons le coup de foudre le plus fréquent et le plus dangereux.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons les deux modes de protections utilisées à l'heure actuelle. Nous nous baserons en particulier sur la protection primaire associée au modèle de protection (modèle électro-géométrique).

Dans le troisième chapitre, nous présenterons et nous définirons, la notion de fréquence de foudroiement et autres statistiques relatives à la foudre qui seront nécessaires au calcul du risque de foudroiement d'une structure à protéger.

Finalement, nous procéderons à une application sur un cas réel, notamment le poste de FREHA.

## **LA Foudre :**

### **I-1 INTRODUCTION :**

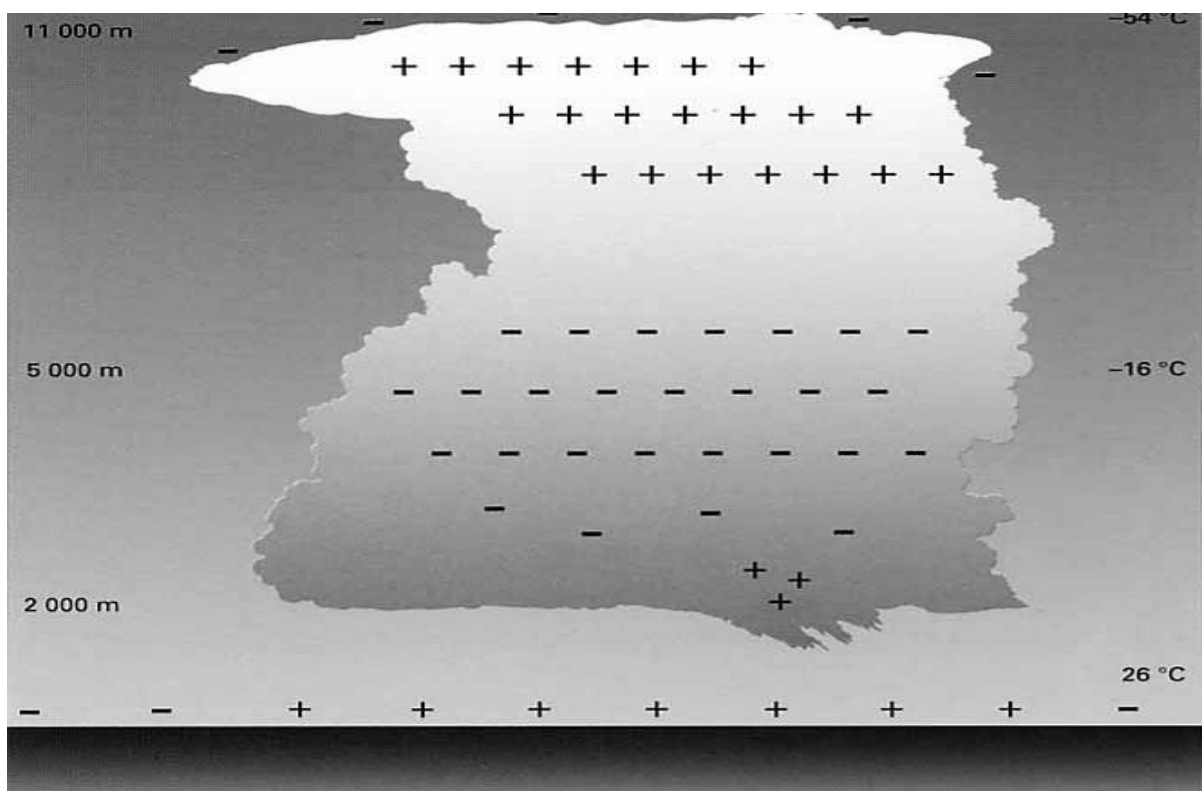
C'est un phénomène naturel, universel et inévitable sous forme d'une décharge d'électricité entre un nuage et la terre, elle est plus souvent induite par les coups de foudre indirects et les coups de foudre directs qui sont presque toujours destructifs. Il en existe autour du globe terrestre entre 2000 et 5000 orages à chaque instant.

### **I-2 LES PHENOMENES PRECURSEURS :**

Un nuage orageux est généralement du type (cumulonimbus) créé par les conditions météorologiques, il est formé sous l'effet combiné de l'humidité et du réchauffement local du sol. Un tel nuage peut s'étendre sur plusieurs kilomètres carrés, sa base se trouve à environ 2 à 3km au-dessus du sol (figure 1), il se développe en hauteur jusqu'à une altitude de 10 à 15km.

Sa partie supérieure est constituée de cristaux de glaces chargés positivement, et sa partie inférieure est constituée de gouttelettes d'eau chargées négativement, alors souvent un îlot de charge positive s'est enfoncé dans cette masse négative (zone de pluie intenses)

Le nuage constitue donc un véritable dipôle. Cette séparation des phénomènes mécaniques de mouvement d'air, crée des contraintes électriques entre les différentes couches intérieures, lorsque le gradient limite de claquages dans l'air est atteint, il y a décharge électrique.



**Figure1** : Répartition des charges électriques au sein d'un cumulonimbus.

### I-3 CLASSIFICATION ET FREQUENCE DES COUPS DE Foudre :

On distingue quatre espèces principales de coups de foudre selon la direction de propagation du traceur et la polarité du nuage (sens d'écoulement du courant principal) [1].

### 1-Coups de foudre descendants :

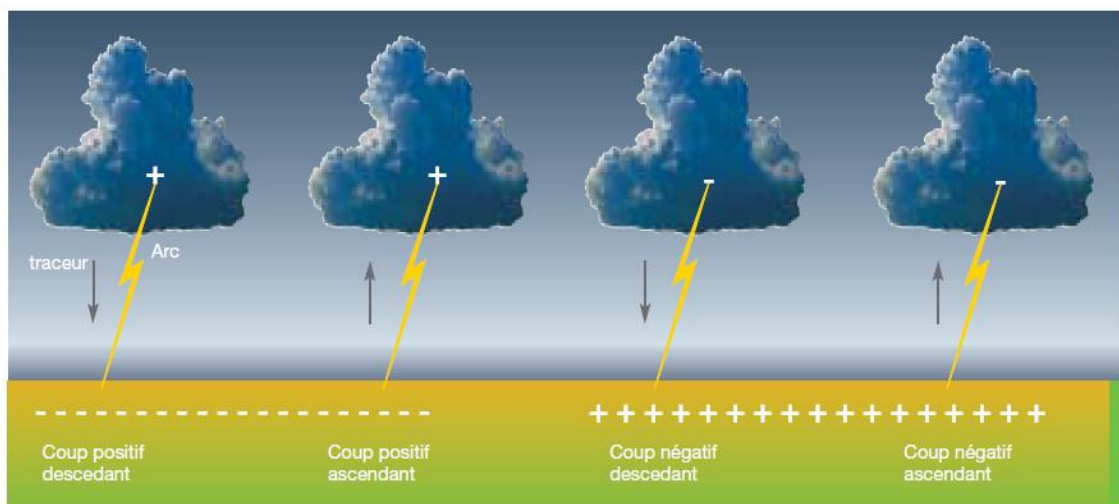
a) Négatif (fig.2-c)

b) Positif (fig.2-a)

### 2-Coups de foudre ascendants :

a) Négatif (fig.2-d)

b) Positif (fig.2-b)



**Figure2:** Les différents types de traceurs

Lorsque l'intensité du champ électrostatique ainsi généré est suffisante, une prédécharge peu lumineuse, le "traceur", progresse dans l'air. Le traceur part du nuage et progresse par bonds successifs, formant des arborescences ouvertes vers le sol (coup de foudre descendant) ou au contraire provenir du sol en direction du nuage (coup de foudre ascendant).

Un coup de foudre est dit négatif, si la partie négative du nuage se décharge, il est dit positif, si la partie positive se décharge.

Les coups de foudre négatifs sont les plus fréquents d'ordre de 90% dans les régions tempérées. La proportion de coups de foudre positifs est nettement plus élevée en mer.

Le coup de foudre négatif descendant apparaît en régions plates, tandis que le coup de foudre négatif ascendant apparaît dans les régions montagneuses.

Nous pouvons conclure que le coup de foudre négatif descendant est le plus fréquent et le plus dangereux en terrains plats.

#### **I-4 COUP DE FOUORE NEGATIF DESCENDANT :**

On peut décrire un coup de foudre négatif descendant par quatre phases : [4]

1-Naissance du précurseur

2-Développement du leader

3-Ecoulement du courant de foudre

4-Formation des décharges secondaire

La première phase d'un coup de foudre est toujours la formation d'une prédécharge peu lumineuse, ou traceuse, qui est issu du nuage, portant des charges négatives, et qui progresse par bonds vers la terre.

La deuxième phase c'est quand le traceur descendant s'est suffisamment approché du sol, des prédécharges ascendantes naissent en différents point du sol, préférentiellement à partir d'objet pointus, et se développent en direction du traceur.

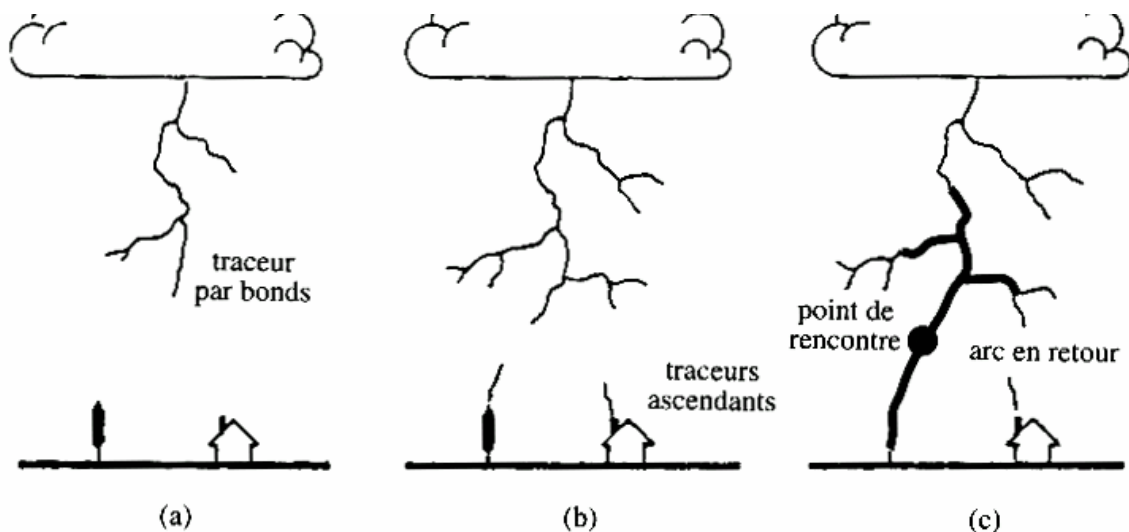
L'une de ces prédécharges rencontre le traceur descendant, c'est pourquoi cette prédécharge est appelée "décharge de capture"; c'est elle qui détermine le point d'impact de la foudre au sol.

La troisième phase c'est la rencontre entre le traceur descendant et la décharge de capture qui établit un pont conducteur entre le nuage et le sol, par lequel va pouvoir s'écouler un intense courant électrique, se propageant du nuage vers la terre, et neutralisant celui-ci.

Ce courant est la cause de la violente illumination du canal de foudre; il est responsable du tonnerre, mais surtout des dégâts produits par un foudroiement un éclair négatif descendant peut comporter plusieurs arcs en retour successifs. L'un des arcs en retour lors d'un éclair à la terre, qui peut être respectivement le "premier coup" ou l'un des "coups subséquents". Ce qui représente la quatrième phase.

Un coup de foudre comporte en moyenne 4 décharges partielles, ces dernières écoulent des courants d'amplitudes inférieures à celle de la 1<sup>ère</sup> impulsion [3].

La (fig. 3) résume les différentes étapes du coup de foudre négatif descendant.



**Figure 3** : les différentes étapes du coup de foudre négatif descendant [16].

# PROTECTION DES POSTES CONTRE LA Foudre :

## II -1 INTRODUCTION:

Bien que la durée d'un coup de foudre soit courte ; son énergie est suffisante pour provoquer des dégâts, donc, c'est un danger contre lequel on doit se protéger constamment.

La foudre frappe de deux manières différentes les structures au sol, de façon directe ou indirecte [5].

On parle de coups de foudre directs lorsque les structures au sol sont touchées directement. Pour protéger une structure contre les coups de foudre directes, 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 et les moyens de protection dans ce cas sont les paratonnerres (tiges verticales, fils de garde) et les maillages type cage de FARADAY : c'est la protection primaire.

Et on parle d'effets indirects lorsque le coup de foudre frappe le sol au voisinage d'une structure, d'un bâtiment, ou d'une ligne aérienne, mais pouvant néanmoins causer des dommages et les moyens de protection sont les éclateurs ou les parafoudres : c'est la protection secondaire.

## II -2 PROTECTION SECONDAIRE:

Elle prend en charge les effets indirects de la foudre et des surtensions de manœuvre et elle sert à limiter les surtensions transitoires et à dériver les ondes de courant. Lorsque l'onde d'amplitude  $U_c$  atteint un poste, elle donne naissance à une surtension donnée par :

$$U_p = \frac{2U_c}{N} \quad (1)$$

N : nombre de ligne arrivant au poste.

Si  $N = 1$  (poste en antenne), on aura :

$$U_p = 2U_c$$

D'où un doublement de la tension incidente qui peut provoquer des dégâts dans le poste.

Si  $N=2$  on aura :  $U_p \leq U_C$

Donc l'amplitude de surtension qu'il subit ne dépasse pas l'onde incidente

## **II -2-1 Coups de foudres tombants à proximités des lignes:**

Il existe d'autres surtensions arrivants aux postes causées par les coups de foudre tombants à proximités des lignes.

### **II -2-1-1 Coups de foudre électrostatiques:**

L'intensité du champ électrique créé par le traceur au voisinage du futur impact augmente avec la progression du canal de foudre vers la terre. Ce champ appelle dans les conducteurs de ligne des charges électrostatiques de compensation. Au moment du coup de foudre le champ au sol s'annule très rapidement et les charges électrostatiques qui n'ont pas eu le temps de s'écouler, portent le conducteur à un potentiel de l'ordre de 150 à 500 kV, n'entraînant aucune conséquence pour les lignes hautes tension, mais peut être la cause de dégâts importants en basse tension [5].

### **II -2-1-2 Coups de foudre électromagnétiques:**

La deuxième cause de surtension est le couplage électromagnétique entre les lignes et le canal de foudre. Il se produit lors de la formation de l'arc en retour, les surtensions induites par ce phénomène peuvent atteindre la centaine de [kV] [5].

## **II -2-2 Appareils de protection secondaire: [6]**

Les appareils utilisés en protection secondaire sont les parafoudres et les éclateurs.

### **II -2-2-1 Les parafoudres:**

Les parafoudres sont destinés à limiter le niveau de surtension transmises par les câbles à niveau compatible avec la tension de tenue aux chocs des matériels de l'installation et des matériels alimentés par cet installation, les parafoudres sont généralement placés entre un conducteur et la terre et parfois entre conducteur actifs.

Sous une tension normale, les parafoudres se comportent pratiquement comme une résistance infinie et le courant qui les traverse est nul ou négligeable. Leur efficacité est essentiellement due à leur rapidité de fonctionnement et à leur pouvoir de décharge, ils sont principalement constitués d'une résistance variable composée d'oxyde de zinc, qui peut supporter des niveaux d'énergie élevés.

### **II -2-2-2 Les éclateurs:**

Ce sont des dispositifs constitués de deux électrodes placés face à face, avec un écartement convenable, et entre lesquelles se produit un amorçage, dès qu'une surtension atteint une certaine valeur. La tension d'amorçage dépend de l'écartement entre les électrodes. Au-delà d'une certaine tension entre les électrodes, un amorçage se produit et le courant passe en formant un arc électrique.

### **II -3 PROTECTION PRIMAIRE:**

Cette protection permet de capter et d'écouler le courant de foudre vers la terre à l'aide d'un paratonnerre.

#### **II -3-1 Généralités:**

Le premier paratonnerre fut la tige de B.FRANKLIN, elle fut inventée en 1753, celui-ci pensait que ce paratonnerre allait faciliter le chemin du canal foudre par effet de pointe à condition d'être en présence d'un coup de foudre descendant. Il est ensuite très important d'assurer une continuité électrique de grande capacité jusqu'à la terre. Il est connu depuis plusieurs siècles que la foudre frappe de préférence les endroits les plus hauts. En particulier, des lieux d'impacts privilégiés sont les proéminences plus ou moins pointus. On a longtemps admis que le volume protégé par un paratonnerre à tige était défini par un cône de base circulaire, dont le sommet coïncide avec la pointe de la tige, mais il existait une grande divergence quant à la valeur du demi-angle de ce cône, qui variait entre 30° et 60° selon les auteurs. On a représenté le contour de la zone protégée par une surface de révolution dont la génératrice était un arc de cercle, tangent à la fois à la tige en son sommet et la surface du sol.

Malheureusement, ces modèles de protection ont été plusieurs fois infirmés par l'expérience; on a vu plusieurs cas où la foudre est tombée au pied même d'une tour

élevée ou frappée cette tour à mi-hauteur. Et c'est pourquoi plusieurs études ont été faites afin de trouver une nouvelle méthode de protection. Cette méthode est basée sur une nouvelle connaissance du mécanisme d'impact de la foudre, elle est mise en œuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé : modèle électro-géométrique.

## II -4 MODELE ELECTRO-GEOMETRIQUE :

Il a été imaginé à partir de l'observation du cheminement des traceurs des coups de foudre descendants. Il permet de déterminer le volume protégé par une installation extérieure de protection, de positionner les paratonnerres à tige et de fixer la largeur des mailles d'une cage par une méthode rationnelle. Ce modèle se base sur les propriétés de la distance d'amorçage. Les auteurs de ce modèle sont Armstrong, Gold, Darvinissa et Whitehead [7].

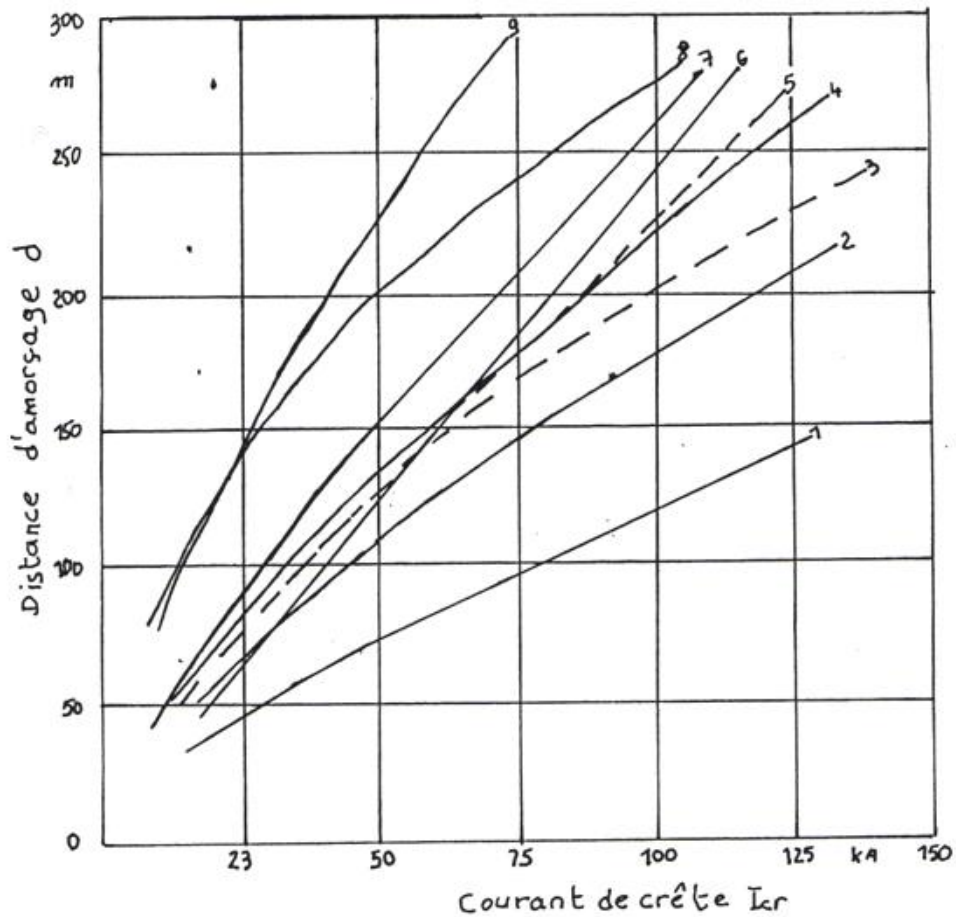
Pour la construction du modèle, les scientifiques ont supposé que :

- La première impulsion du coup de foudre correspond à la neutralisation des charges portées par le traceur.
- Il permet de définir une distance "d" dite d'amorçage ou d'attraction qui représente la distance entre l'extrémité de la structure d'où est issue la décharge ascendante et le point de jonction de celle-ci et le traceur par bonds descendant. Cette distance est fonction du courant de crête de la première décharge. La relation liant la distance "d" à l'intensité crête du courant de foudre ; " $d=f(I_{cr})$ " peut être décrite par plusieurs formules selon leurs auteurs correspondants [1], [7].

Les écarts énormes entre les différentes courbes (fig.4) sont dus aux conditions d'obtention des relations correspondantes qui diffèrent d'un auteur à un autre. Pour que ce modèle soit utilisable pratiquement, il faut le compléter par l'hypothèse suivante :

— On admettra que l'expression de  $d=f(I_{cr})$  de la distance d'amorçage reste applicable quel que soit la hauteur des objets au sol : que se soit le sol plat lui-même, une pointe de paratonnerre, un fil tendu horizontalement, les parties métalliques d'une structure, les arbres.

Selon ce modèle, c'est donc en définitif, l'objet qui se trouvera en premier à la distance d'amorçage " d" de la pointe du traceur, qui constituera le point d'impact du coup de foudre.



**Figure 4** : relation entre la distance d' amorçage et le courant de crête [7].

#### Auteur

1. GOLDE
2. GOLDE
3. WHITEHEAD
4. WHITEHEAD, BROWN
5. WHITEHEAD
6. HORVATH
7. ARMSTRONG, WHITEHEAD
8. DRECHSLER
9. RUHLING

#### Formule

$$d = 3,3 \cdot (I_{cr})^{0,78}$$

$$d = 9,4 \cdot (I_{cr})^{0,66}$$

$$d = 7,1(I_{cr})^{0,75}$$

$$d = 2(I_{cr}) + 30[1 - e^{(-I_{cr}/6,8)}]$$

$$d = 2,5 \cdot I_{cr}$$

$$d = 6,7 \cdot (I_{cr})^{0,8}$$

$$d = 28 \cdot (I_{cr})^{0,5}$$

## II -4-2 Application du modèle:

### II -4-2-1 Principe de fonctionnement d'un paratonnerre :

Afin de bien faire saisir le mode d'action d'un paratonnerre, nous allons appliquer le modèle électro-géométrique, au cas simple d'une tige verticale de hauteur "h" placée sur un terrain parfaitement plat. On procède à la construction géométrique, valable pour un demi-plan de symétrie de révolution, dans un système d'axe XOY, l'axe OX représentera le sol, OH=h représentera la tige (fig5).

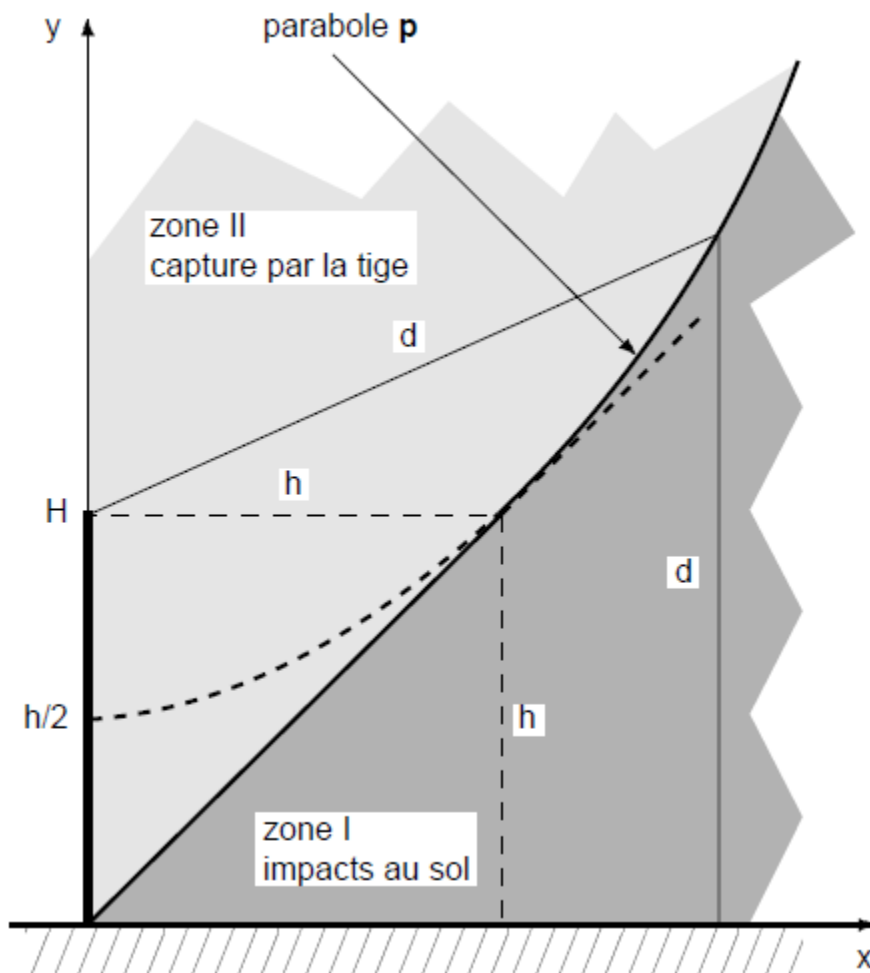


Figure 5 : Cas simple d'une tige verticale [15].

On trace la parabole "P" définie par le lieu des points à égales distances du sol et de la pointe H de la tige.

Equation de la parabole "P" :

$$\text{On a: } d(T,S) = |Y| \text{ et } d(T,H) = (X^2 + (Y - h)^2)^{\frac{1}{2}}$$

Par définition  $d(T,S) = d(T,H)$  ; d'où:

$$Y^2 = (X^2 + (Y - h)^2) \Rightarrow Y^2 = X^2 + Y^2 - 2hY + h^2 .$$

Finalement on aura :

$$x^2 + h^2 - 2hy = 0 \quad (2) \quad (\text{Équation de la parabole "P"})$$

### - Dans la zone ( I )

On a  $d(T,H) > d(T,S)$ , le traceur ne sera jamais capté par la pointe de la tige, et touchera le sol.

### -Dans la zone ( II ) (zone comprise entre l'axe OY et la parabole P)

Le traceur sera capté par la pointe de la tige car  $d(T,S) > d(T,H)$  cela dès que  $d(T,H) \leq d$  (d est la distance d'amorçage).

Si le traceur, arrivant dans la zone ( II ) peut traverser la parabole "P" sans qu'il soit capté par la tige cela signifie que  $HT > d$ .

T : tête du traceur.

La condition limite de capture de la pointe est donc que toute au long de la parabole "P" la relation  $HT \leq d$  soit respectée.

Or :  $HT=y$  ordonné du point T par définition de la parabole(P).

Dans (2), on peut donc remplacer y par d et on obtient :

$$x \leq h(2d/h - 1)^{\frac{1}{2}}$$

x est le rayon que protège la pointe du paratonnerre pour un coup de foudre caractérisé par une distance d'amorçage "d" c'est-à-dire par un courant d'intensité " $I_{cr}$ " donnée [3].

## **II -5 METHODE GRAPHIQUE DE DETERMINATION DE LA ZONE DE PROTECTION: la méthode de la sphère fictive :**

### **II -5-1-1 Principe de la méthode:**

Méthode pratique, à l'aide d'une sphère fictive, de positionnement optimale (meilleur possible) des paratonnerres à tige et de détermination de la largeur des mailles d'une cage d'une installation extérieure de protection. Le rayon de la sphère fictive utilisé pour la construction géométrique de la protection dépend du niveau de protection retenu ; il coïncide autrement dit, comme à une distance d'amorçage donnée est associée une amplitude du courant de foudre, le niveau de protection détermine l'amplitude du courant au dessus de laquelle la protection est assurée. Dans la méthode de la sphère fictive, le volume protégé par un paratonnerre à tige est limité par un arc de cercle passant par la pointe et tournant autour de la tige.

On imagine que la sphère fictive de rayon "d" est roulée au sol dans toutes les directions sans jamais perdre contact soit avec le sol, soit avec un objet proéminent.

-Si au cours de son mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protections, (tige verticale, fil horizontale), sans jamais pouvoir toucher l'un des objets à protéger, alors la protection de ceux-ci est assurée.

-Si 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 puisse plus se produire. (Fig. 6)[1,7]

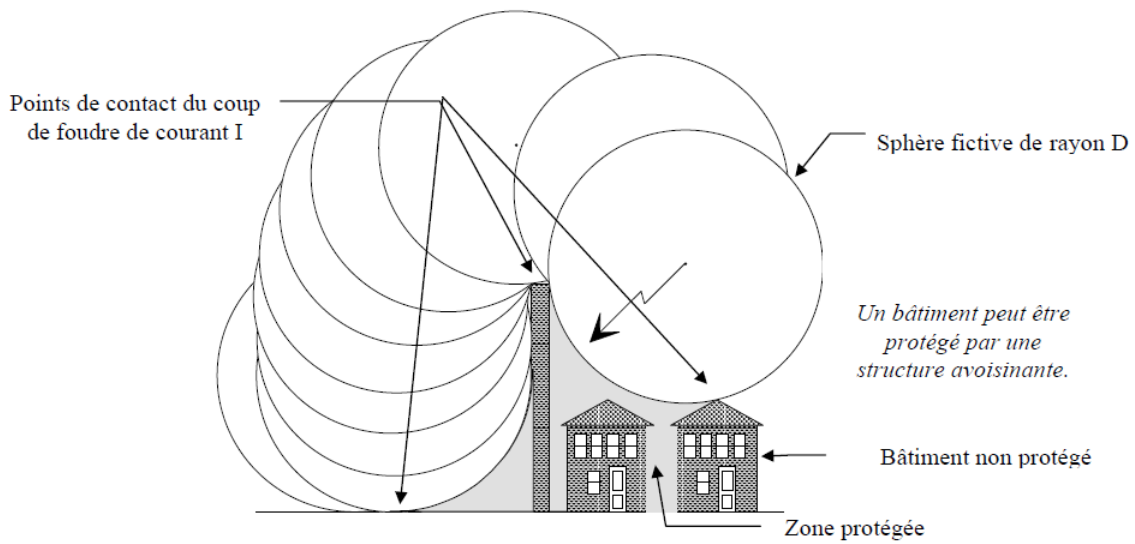


Figure 6 : Application de la méthode de la sphère fictive

## II -6 QUELQUES APPLICATIONS SIMPLES:

### II -6-1 Zone de protection d'un paratonnerre vertical :

Soit un paratonnerre vertical de hauteur  $H_p$ . La construction est illustrée par la (fig.7) [1].

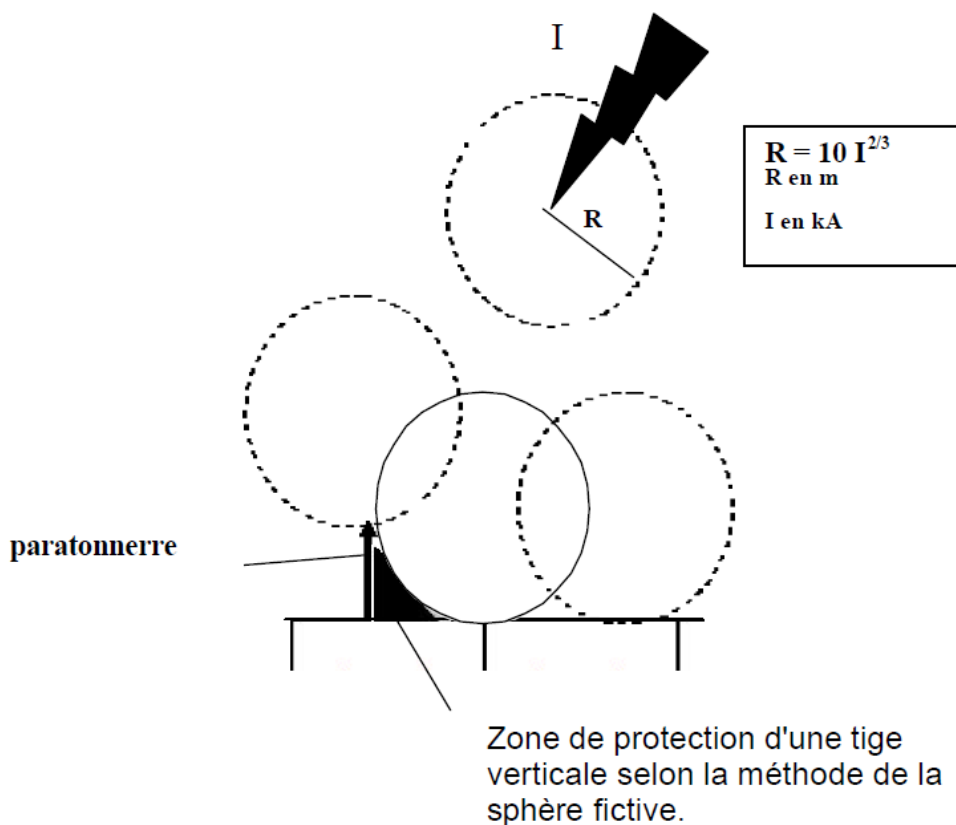


Figure 7 : zone de protection d'un paratonnerre vertical [15]

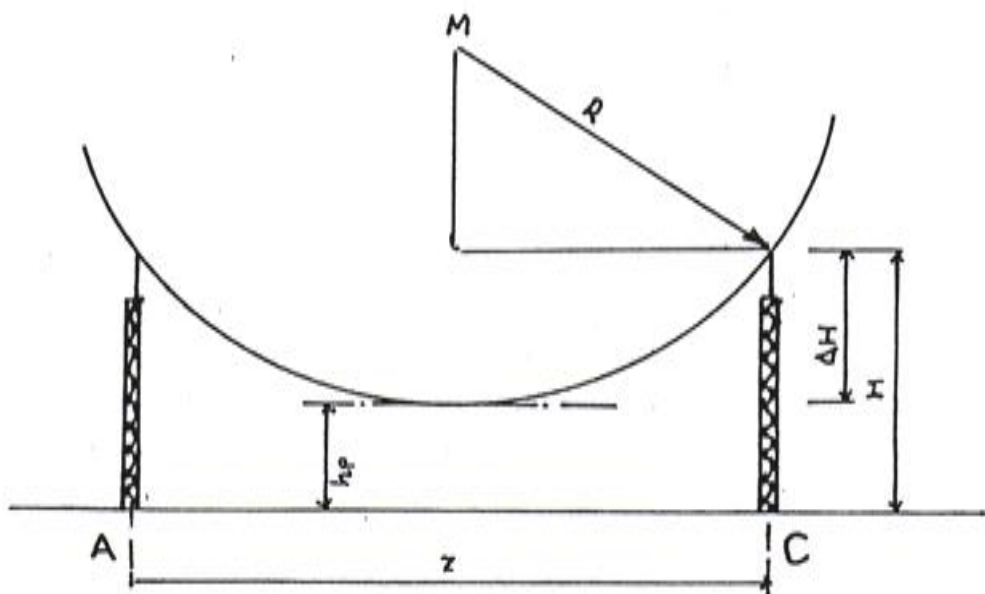
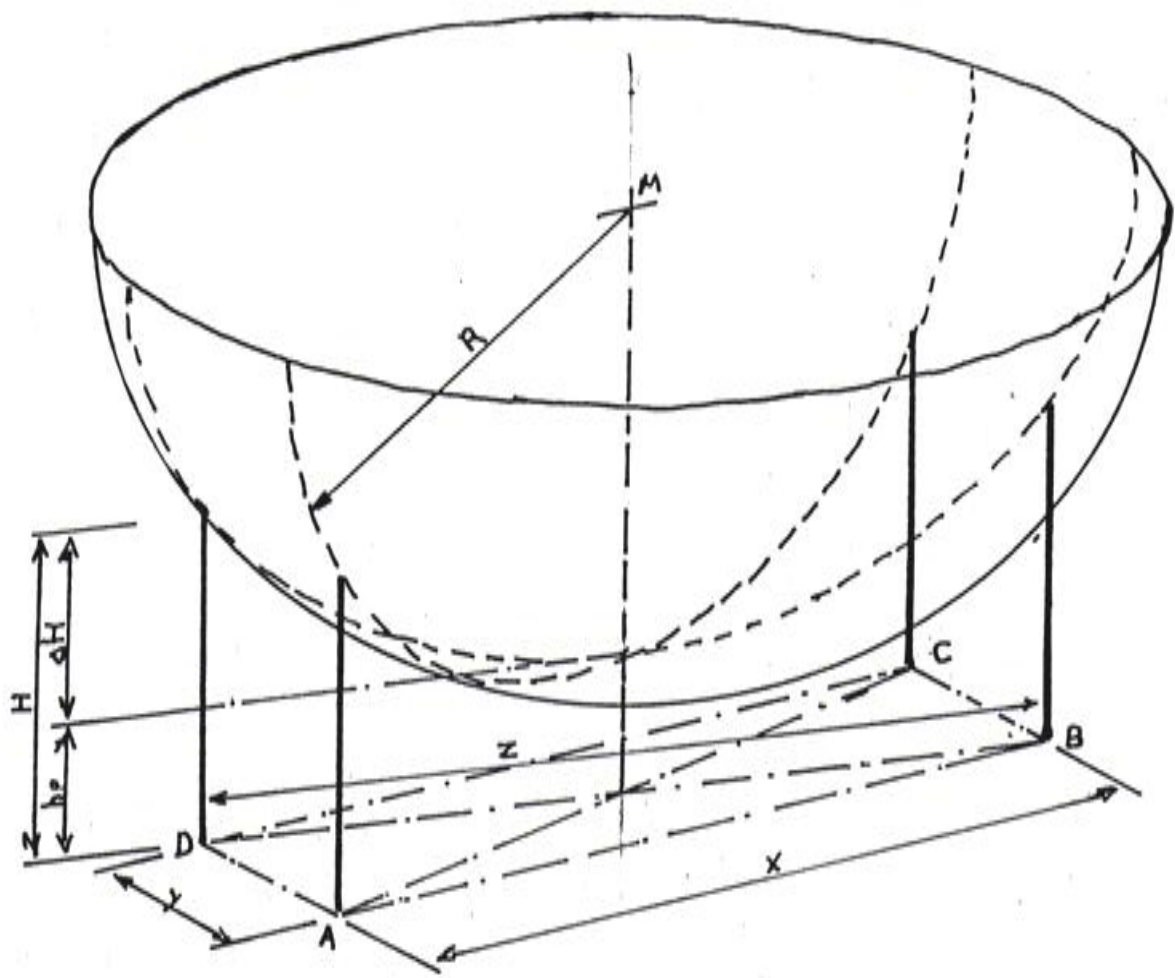
### **Calcul du rayon de protection :**

$$Rp^2 = R^2 - (R - Hp)^2 \Rightarrow Rp = Hp(2R - Hp)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

La zone a une symétrie de révolution donc une forme conique.

### **II -6-2 Application pour 4 tiges verticales identiques :**

Soit un ensemble de quatre paratonnerres verticaux de hauteurs H. La construction géométrique est donnée par la (fig. 8) [4].



**Figure 8:** méthode de la sphère fictive appliquée à 4 tiges verticales identiques [15].

On a :  $\Delta H = H - h_p$

$$R^2 = (R - \Delta H)^2 + (Z/2)^2 \quad (4)$$

$$\text{Avec : } Z = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{D'où : } \Delta H^2 - 2R \cdot \Delta H + Z^2/4 = 0$$

$$(4) \Rightarrow \Delta H - R - (R^2 - (X^2 + Y^2/4))^{\frac{1}{2}}$$

D'où la hauteur de protection est donnée par :

$$h_p = H - R + (R^2 - (X^2 + Y^2/4))^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

### II -6-3 Application pour 4 tiges verticales de hauteurs différentes:

Soit 4 tiges : dont 2 tiges sont de hauteurs  $H_1$  et 2 autres tiges de hauteurs

$$H_2 < H_1$$

La méthode consiste à placer deux tiges fictives de même hauteur que celles possédant la plus grande hauteur ( $H_1$ ) et d'appliquer la méthode de la sphère fictive. (fig.9) [4].

Les grandeurs  $h_p$  et de  $H_2$  peuvent être déterminé de la manière suivante :

On a :

$$\Delta H_1 = H_1 - h_p \quad (6)$$

$$R^2 = (R - \Delta H_1)^2 + (Z'/2)^2 \quad (7)$$

D'où :

$$Z' = 2 \cdot [\Delta H_1(2R - \Delta H_1)]^{\frac{1}{2}}$$

$Z'$  est la diagonale du rectangle formé par les tiges de même hauteur  $H_1$

" $h_p$ " peut être déterminé de la manière suivante : (7) donne :

$$R - \Delta H_1 = [R^2 - (Z'/2)^2]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \Delta H_1 = R - [R^2 - (Z'/2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

De la relation (6), on aura :

$$, H_1 - h_p = R - [R^2 - (Z'/2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow h_p = H_1 - R + [R^2 - (Z'/2)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$H_2$  peut être obtenue comme suit :

$$\text{On a : } R^2 = (R - \Delta H_2)^2 + (Z - Z'/2)^2 \quad (9)$$

$$\text{D'où: } \Delta H_2^2 - 2R\Delta H_2 + (Z - Z'/2)^2 = 0.$$

De la relation(9) on aura:

$$\Delta H_2 = R - [R^2 - (Z - Z'/2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Or: } Z = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Et: } \Delta H_2 = H_2 - h_p$$

$$\text{Donc : } H_2 = h_p + R[R^2 - ((X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} - Z'/2)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$



## II -6-4 Application pour un fil tendu horizontalement :

Soit un fil tendu horizontalement à une hauteur H : alors sa zone de protection est donnée par (fig. 10a).

$$1/2 = [H(2R - H)^{\frac{1}{2}}] \quad (11)$$

## II -6-5 Application pour deux fils horizontaux:

Soit deux fils de garde placés horizontalement, distants entre eux d'une distance 2D comme le montre la (fig.10b). La hauteur protégée sera :

$$H_p = H - [R - (R^2 - D^2)^{\frac{1}{2}}]$$

$$H_p = H - R + (R^2 - D^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

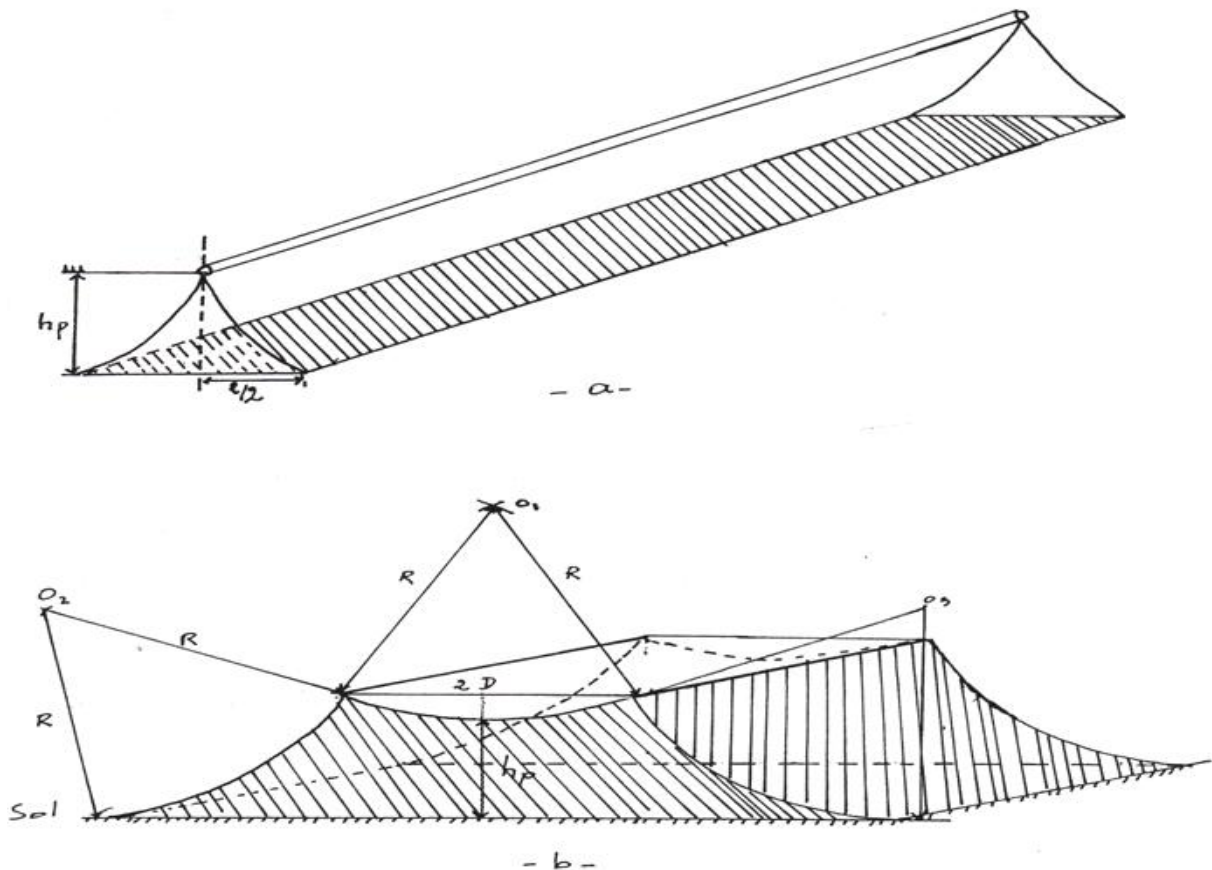


Figure 10 : zone de protection d'un fil et de deux fils horizontaux [15].

## **II -7 CRITIQUE DU MODELE ELECTRO-GEOMETRIQUE:**

### **II -7-1 Existence de la décharge ascendante:**

L'existence des décharges ascendantes au voisinage d'une aspérité entraîne un changement brutal de direction du canal de foudre, ce qui induit une difficulté de l'estimation de la distance d'amorçage [3].

### **II -7-2 Estimation de la distance d'amorçage :**

La relation entre charge et l'intensité de crête de la première impulsion de courant ne saurait être rigoureusement déterminée. Cette incertitude se traduit par un grand nombre de proposition de relation  $d = f(I_{cr})$  [3].

### **II -7-3 Influence de l'impédance de l'aspérité sur le développement de la décharge ascendante:**

La nature des objets au sol influe sur le développement de la décharge ascendante. On a effectivement constaté que l'objet dont la résistance est plus faible qui est le plus foudroyé [3].

### **II -7-4 Foudroiemnt des structures élevées:**

Le modèle électro-géométrique est valable pour la protection des structures dont la hauteur n'excède pas 60m, à partir de 100m apparait un accroissement de la fréquence de foudroiemnt mettant ainsi la théorie complètement en défaut [5].

## **SEVERITE ORAGEUSE ET ELEMENTS DE STATISTIQUES :**

### **III-1 INTRODUCTION:**

Ce chapitre traitera les statistiques du coup de foudre puis estimera la fiabilité des systèmes de protection.

### **III-2 SEVERITE ORAGEUSE:**

La sévérité orageuse exprime la fréquence d'occurrence des orages ou de la foudre en un lieu donné. Elle est donnée habituellement de deux manières:

- Le niveau kéraunique (d'où les cartes isokérauniques) ou par :
- La densité de coups de foudre au sol.

#### **III-2-1 Niveau kéraunique (Nk):**

Le niveau kéraunique, en un endroit donné, est exprimé comme étant le nombre de jours orageux par an ou le tonnerre a été entendu. Il est évident qu'un jour orageux est une notion assez sommaire, et qu'elle dépend du niveau de bruit de fond régnant au lieu d'observation. Cette notion permet d'établir les courbes isokérauniques du globe.

#### **III-2-2 Densité de coups de foudre (Ng):**

C'est le nombre de coups de foudre au sol par an et par  $km^2$ . Des relations empiriques ont été établi entre la densité de foudroiement au sol Ng et Nk suivant les caractéristiques météorologiques locales [5] :

$$Ng = a. Nk^b \quad (13)$$

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

Ng : nombre de coups de foudre par an par  $[km^2]$ .

Nk : nombre de jours orageux par an.

### III-2-2-1 Détermination de la densité de coups de foudre:

Ce paramètre peut être déterminé à partir des enregistrements des compteurs des coups de foudre dans la région considérée, suivant la relation [5]:

$$Ng = Kg - N\pi \cdot Rg^2 \quad (14)$$

- $Rg$  : Rayon d'action du compteur.

- $Kg$  : Facteur de correction ( $Kg < 1$  pour compenser l'enregistrement des décharges dans les nuages).

- $N$  : Nombre total de coups de foudre enregistrés.

La relation la plus utilisée est celle obtenue par l'analyse des résultats de 350 compteurs installés en Afrique du sud [5].

$$Ng = 0,023Nk^{1,3} \quad (15)$$

$Ng$  : Nombre de coups de foudre au sol par an par  $km^2$

$Nk$  : Nombre de jours orageux par an.

En Sud-est montagneux, le niveau kéraunique est supérieur à 30 jours par an, inférieur à 15 dans les régions costières du Nord-ouest, dans d'autres régions du globe, ce niveau dépasse 100 comme en Floride, et même 180 en Afrique de Sud ou en Indonésie [3].

### III-3 FACTEURS LOCAUX INFLUENCANT LE FOUDDROIEMENT :

Dans les régions de sévérité orageuse, la densité de coup de foudre n'est qu'une indication moyenne. Il existe des zones particulières foudroyées appelées "nids d'orages". Trois facteurs locaux possibles, influençant le foudroiement [3]:

- Facteurs géologiques.
- Facteurs topologiques.
- Concentrations ionique de l'air.

### **III-3-1 Facteurs géologiques :**

L'un des facteurs qui pourrait avoir une influence sur la décision de l'impact, c'est la conductivité des sols. Cette hypothèse repose sur un certain nombre d'observations concernant le foudroiement des lignes à haute tension, ainsi que sur les résultats des recherches expérimentaux sur la physique de la décharge. Ces résultats permettraient d'allouer aux failles humides, aux nappes d'eau, à des terrains marécageux, une certaine attirance préférentielle pour la foudre, leur zone d'action ne saurait toutefois excéder la centaine de mètres au delà de leur contour [3].

### **III-3-2 Facteurs topologiques:**

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait de conditions privilégiées de formation des nuages orageux, c'est le cas des orages de chaleur, souvent très localisés. Des mouvements d'air, canalisés par des vallées ou des fleuves, et qui entraîne des nuages orageux, favorisent l'existence de couloirs orageux. Ainsi en montagnes, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets [3].

### **III-3-3 Concentrations ioniques de l'air (conductivité de l'air):**

La concentration en ions de l'air a parfois été invoquée pour expliquer un nid d'orage. Mais il n'existe à l'heure actuelle aucune donnée expérimentale à partir d'observations sur le terrain. On n'a semble t-il jamais observé de corrélation entre le foudroiement d'une zone et la conductivité de l'air. Cet effet de la foudre n'a pas été non plus mis en évidence par des études expérimentales [3].

### **III-4 FREQUENCE DE FOUDROIEMENT:**

La fréquence de foudroiement d'un objet de surface "S" situé dans une région de densité de coups de foudre "Ng" est donnée par la relation [5]:

$$n = Ng.S \quad (16) \text{ avec}$$

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

$Ng$ : Densité de coups de foudre.

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

On a :

$$\text{➤ } n = 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot Ng(h_0)^{2,05} \quad (17) \quad (\text{Formule d'Irikson})$$

Où :  $n(an^{-1})$ ;  $Ng(Km^{-2} \cdot an^{-1})$ ;  $h_0(m)$

Cette formule est valable pour l'objet dont les dimensions horizontales sont très petites devant sa hauteur ( $h_0$ ), et ayant une hauteur qui ne dépasse pas 100 m.

$$\text{➤ } n = 10^{-6} \cdot Ng(l + 7h_0)(L + 3,5h_0) \quad (18) \quad (\text{Formule de Drechsler})$$

Cette formule est valable pour les structures dont les dimensions horizontales sont grandes devant la hauteur.

$h_0$ : Hauteur du point culminant de la structure en [m]

L : longueur de la structure en [m]

l: Largeur de la structure en [m]

Ng : Densité annuelle de coups 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.

### III-5 FREQUENCE DE FOUDROIEMENT D'UNE STRUCTURE A PROTEGER:

#### III-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 nominale du réseau ( $U_n$ ), correspond un courant critique de foudre " $I_{cr}$ " qui entraîne l'amorçage des conducteurs de phase contre la terre ou contournements des distances d'isolement de la structure. **Tableau1 :**

#### Des courants critiques correspondants aux tensions nominales :

Valeurs données par Drechsler [5]

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

Valeurs selon la norme française [3], [5]

$Un(kV)$	$I_{cr}(kA)$
225	5,4
400	8,5
750	19

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

On détermine la fréquence de contournement d'isolation due aux coups de foudre d'une structure à protéger par la relation suivante : [5]

$$Ne = Ng \cdot S \cdot Pa \quad (19) \quad \text{ou:}$$

$Ne$ : Nombre annuel de contournements dus aux coups de foudre.

$Ng$ : Densité de coups de foudre [ $km^2an^{-1}$ ]

$S$ : Surface d'attraction [ $Km^2$ ]

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

### III-5-3 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 [5]:

$T_c = 1/n_c$  (20) définie comme étant l'intervalle de temps qui sépare deux contournements successifs des distances d'isolement [5].

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

$$n_c = n_{CDP} + n_{CDT} + n_{CEM} + n_{CES} \quad (21)$$

Où :

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

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

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

$n_{CES}$ : Nombre de contournements causés par les coups de foudre 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 négligeable d'où :  
[5]

$$T_C = 1/n_{CDP} \quad (22)$$

Avec :

$$n_{CDP} = Ng \cdot S \cdot Pa(i)$$

On distingue deux cas possibles :

- $i > I_{cr}$  : tous les coups de foudre dont l'intensité du courant est supérieure au courant critique 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 ou les hauteurs des paratonnerres verticaux obtenus ne répondent pas à certaines conditions de limitation des possibilités de fixation des tiges sur les poteaux de la structure, on réduit les valeurs des hauteurs trouvées et on détermine la nouvelle intensité de courant ( $i'_{cr}$ ) de foudre [5].

L'expression de ce courant est selon Drechsler:

$$i'_{cr} = 1,24 \cdot 10^{-3} \left( \frac{he}{2} + \frac{d^2}{8he} \right)^2$$

Avec :

$$he = hep + f_{20} = r - 0,5(4r^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

Où :  $h_e$ : Hauteur efficace du paratonnerre vertical.

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

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

$h_e$  : Hauteur du point de fixation du conducteur (jeu de barre à protéger).

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

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

$$r' = 28 \cdot i_{cr}'^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

L'expression donnant le nombre de contournements devient :

$$n_c = Ng \cdot S \cdot Pa(i_{cr}') \quad (25).$$

Selon le dimensionnement des 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 foudre dont  $i_f < i_{cr}$  ne sont pas captés mais n'entraîneront aucun défaut sauf pour ceux dont la durée de front  $t_f < 1\mu s$ . On aura :

$$Pa(i_{cr}') = P_2(I_{cr}') = P_1(i < i_{cr}) \cdot P_\tau(t_f < 1\mu s)$$

3)  $i_{cr} \leq i_f \leq i'$  tous les coups de foudre dont  $i_f$  est compris entre  $i_{cr}$  et  $i'$  entraînent des défauts d'isolation de la structure. [5]

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

D'où : la probabilité qu'un coup de foudre entraîne un défaut d'isolation pour une structure de courant critique  $i_{cr}$  et protège contre les coups de foudre dont l'intensité de courant  $i_f$  est supérieure à  $i'$  sera : [5]

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

### III- 6 DISTRIBUTION DES AMPLITUDES DES COURANTS DE Foudre:

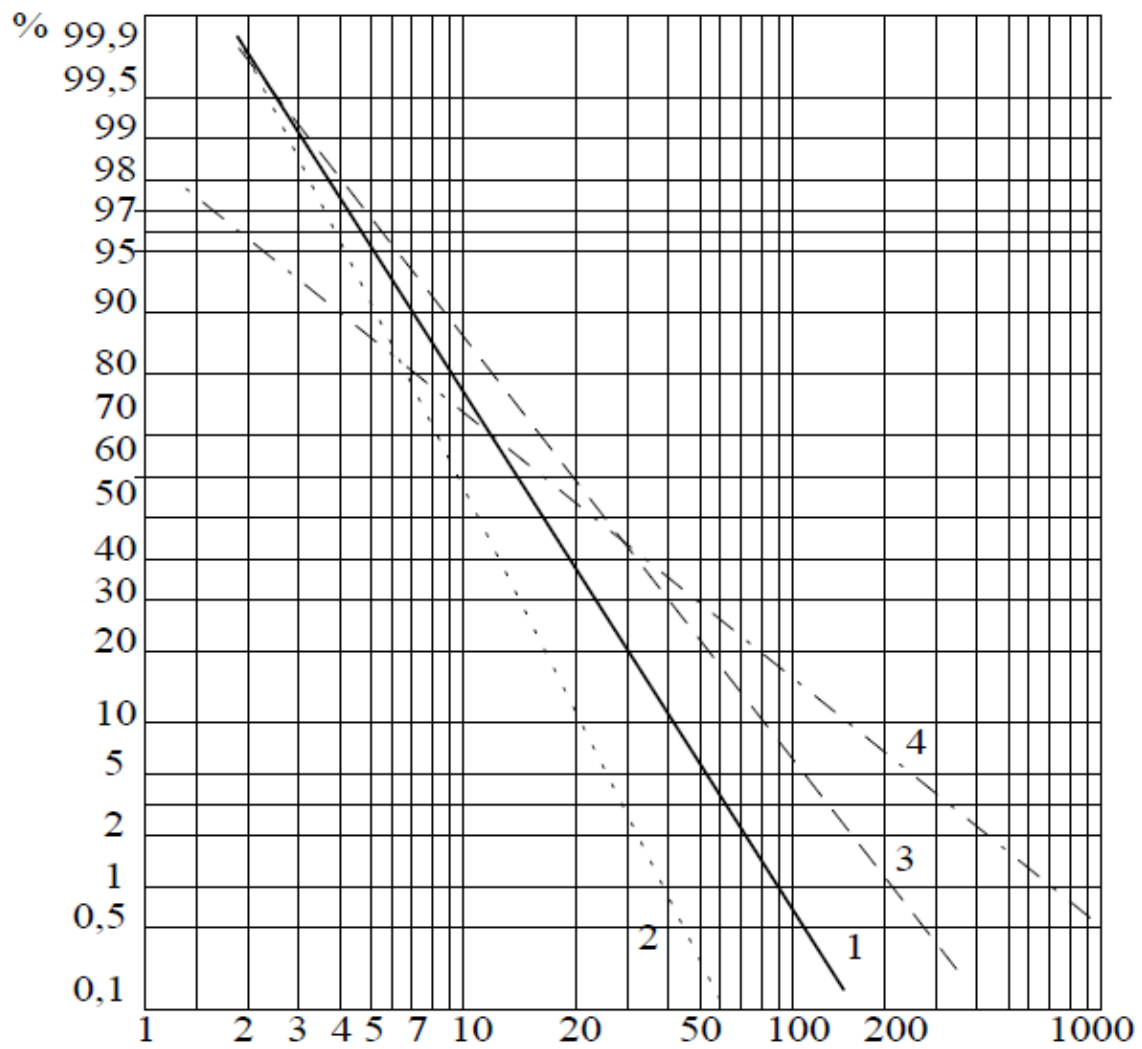
Le système de surveillance des orages fournit pour chaque arc en retour une estimation de l'amplitude crête du courant d'arc. Les mesures sur la foudre ont été

effectuées en enregistrant les courants de coups de foudre frappant des tours de grandes hauteurs, entre 100 et 200m. La distribution des intensités des courants de foudre est reportée sur un abaque regroupant toutes les données mondiales représenté sur la (fig11). Ces mesures effectuées ne représentant probablement pas la distribution des coups de foudre touchant le sol ou les lignes et postes.

### **III-6-1 Courants de foudre:**

Les courants de foudre mesurés au Mont San Salvatore(Suisse) sont représentés sur le tableau [14].

10%	Supérieur à 40kA
2%	Supérieur à 60kA
0,5%	Supérieur à 90kA
	Valeurs maximum enregistrée 325kA



**Amplitude du courant de foudre en kA [5]**

- (1) coups de foudre négatifs : première décharge
- (2) coups de foudre négatifs : décharge secondaire
- (3) moyenne
- (4) coups de foudre positifs

**Figure 11** : distribution statistique des amplitudes des courants de foudre

## **PROTECTION DU POSTE CONTRE LA Foudre (POSTE DE FREHA 60/30kV):**

### **IV-1 INTRODUCTION:**

Pour assurer la protection d'un poste contre la foudre, il est nécessaire d'installer soit des fils de garde, soit des tiges verticales. Le concept du courant critique, déjà exposé montre que la protection se fait en captant les courants de foudre dont l'intensité crête est supérieur à celle du courant critique. Cette protection est basée sur le modèle électro-géométrique, qui a été développé afin de déterminer une position optimale des paratonnerres assurant une protection efficace.

### **IV-2 DESCRIPTION DU POSTE SIMPLIFIE DE FREHA (60/30kV) :**

#### **IV-2-1 Alimentation :**

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

IV-2-2 Schéma du poste de FREHA 60/30 kV :

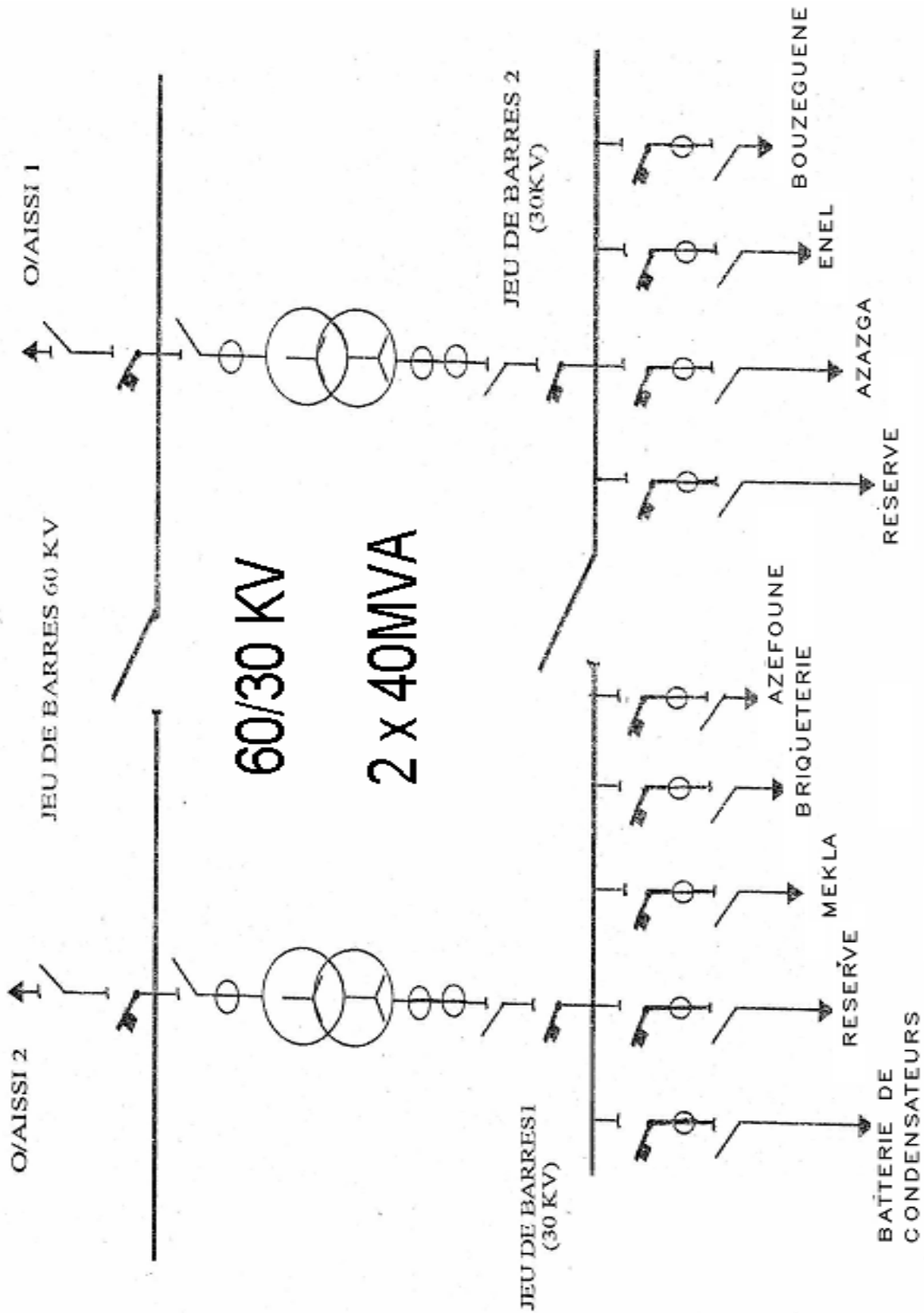


FIG.VI.1. POSTE SOURCE FREHA

### IV-3 DETERMINATION DU COURANT CRITIQUE:

Lorsqu'un coup de foudre tombe sur un conducteur de phase, le courant de foudre  $i(t)$  se propage de part et d'autre du conducteur. Il génère une onde de tension dont la valeur est donnée par la relation suivante : [3]

$$U(t) = (Z/2) \cdot i(t) \quad (26)$$

$Z$  : Impédance d'onde du conducteur.

Le courant critique est donné par :

$$I_c = (2U_f/Z) \quad (27)$$

Sa détermination nécessite donc la connaissance de  $U_f$  et  $Z$ .

#### IV-3-1 Tension d'isolement au choc $U_f$ :

➤ En polarité négative ;  $U_f$  est donnée par la relation approchée : [3]

$$U_f^- = 580 \cdot d \quad (28)$$

➤ En polarité positive ;  $U_f$  est donnée par :

$$U_f^+ = 530 \cdot d \quad (29) \text{ avec :}$$

$U_f$  est en [kV] si  $d$  en [m].

$d$  : est la distance d'isolement dans l'air entre le conducteur et la masse du pylône.

Bien que la plupart des surtensions de foudre soient négative, alors nous utiliserons de préférence la deuxième expression, ce qui donne l'avantage d'une marge de sécurité plus grande. [3]

En ce qui concerne le poste de FREHA:

$$d = 0,75 \text{ [m]} \quad [9]$$

D'où :

$$U_f^+ = 530 \cdot 0,75 = 397,5 \text{ [kV]}$$

#### IV-3-2 Impédance d'onde Z:

L'impédance d'onde  $Z$  d'un conducteur de rayon " $r$ ", placé à une hauteur " $H$ " au dessus du sol est donnée par l'expression classique : [3]

$$Z = 60 \ln(2 \times H/r) \text{ [\Omega]} \quad (30)$$

Cependant, aux surtensions engendrées par les courants de foudre, il apparait 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 [3].

L'expression de l'impédance d'onde devient :

$$Z_c = 60 [\ln(2H/r) \cdot \ln(2H/r_c)]^{1/2} \quad (31)$$

-pour les conducteurs de phase unique de tension égale ou inférieure à 225kV on posera  $r_c = 0,06m$  quelque soit  $r < r_c$

-pour les conducteurs en faisceaux, on calculera  $Z$  par la formule classique (31) avec :

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

Avec :

$r$  : Rayon équivalent

$\rho$  : Rayon d'un sous conducteur

$R$  : Rayon géométrique du faisceau

$n$  : Nombre de sous conducteurs

### IV-3-3 Evaluation du courant critique du poste de FREHA:

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

$$S = 288,34 \text{ mm}^2 \quad [9]$$

D'où le rayon géométrique correspondant :

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

Nous avons pour le poste de FREHA :

-rayon d'un sous conducteur:

$$\rho = 1,75 \text{ mm} \quad [9]$$

-nombre de sous conducteurs:

$$n = 37 \quad [9]$$

D'où nous avons le rayon équivalent :

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

Vu que nous avons des conducteurs en faisceaux, nous calculerons  $Z$  par la formule classique (30) avec :

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

$$Z_C = 451,49 \quad \Omega$$

Finalement nous aurons :

$$I_{cr} = 2U^{f+}/Z_C = 2 \cdot 397,5/451,49 = 1,76 \text{ kA}$$

$$I_{cr} = 1,76 \text{ kA}$$

## IV-4 APPLICATION DU MODELE ELECTRO-GEOMETRIQUE:

### IV-4-1 Tiges verticales:

-Calcul du rayon de la sphère fictive selon la formule de Whitehead

$$R = 2 \times I_{cr} + 30 \times [1 - e^{(-I_{cr}/6,8)}] \quad (32)$$

Nous trouvons :

$$R = 10,32 \text{ m}$$

-NB: pour l'implantation des tiges verticales, nous utiliserons les structures existantes.

#### IV-4-1-1 Première variante: tiges distantes de 6m

##### IV-4-1-1-1 Calcul des hauteurs des tiges:

###### A- Etude de la partie BC :

❖ Protection de la partie délimitée par les poteaux (2) et (3) de dimension  $6 \times 9m$ . Dans cette partie la hauteur à protéger est de  $H_p = 12m$  en tenant compte de la flèche  $f = 95 \text{ cm}$  [9]

• Calcul de la hauteur de la tige:

$$H = H_p + R - [R^2 - (X^2 + Y^2)/4]^{1/2} \quad (33)$$

Valable pour un rectangle de dimension :  $x=9 \text{ m}$     $y= 6 \text{ m}$

Nous trouvons :

$$H=14,48m$$

D'où :

$H_{tige} = 1,53m$  qui sera placée sur la structure de hauteur  $12,95m$  du sol.

Nous voyons que  $H_{tige} < 10m$ .

Cette hauteur ne dépasse pas la condition de limitation de fixation des tiges fixée par la contrainte du vent.

Finalement, nous placerons sur les poteaux (2) et (3) des rangées (B) et (C) des tiges de hauteurs 1,53m.

b) Pour les quatre parties comprises entre les poteaux (4), (5), (6), (7), (8) toutes de dimensions 9X6m et de hauteur à protéger  $H_p = 10\text{ m}$  avec  $f = 0,94\text{m}$  [9],

Nous trouvons  $H = 11,53\text{m}$  donc la protection sera assurée en plaçant des tiges de hauteurs 0,59 m sur les poteaux (4), (5), (6), (7), (8) des rangées (B) et (C) trouvée avec la relation (33).

c) Il nous reste à déterminer la hauteur de la tige à mettre sur le poteau (1), avec  $H_p = 10\text{m}$ . Pour cette partie on doit utiliser la méthode de la tige fictive. (fig. 9)

#### **Calcul de la distance à la tige fictive Z :**

$$Z = 2[\Delta H(2R - \Delta H)]^{1/2}$$

$$\text{Ou : } \Delta H = H_1 - H_p \quad \text{ou}$$

$$H_1 = 1,53 + 12,95 = 14,48\text{m} \quad \text{et } H_p = 10\text{m}$$

$$\Delta H = 14,48 - 10 = 4,48\text{m} \quad \text{d'où}$$

$$Z = 17,01\text{m}$$

Nous trouvons  $H$  selon la formule :  $H = H_p + R - [R^2 - ((X^2 + Y^2)^{1/2} - Z/2)^2]^{1/2}$

$$H = 10,26 \quad \text{donc } H_{\text{tige}} = 5,78\text{m}$$

#### **B) Etude de la partie DC :**

a) Protection de la partie comprise entre les poteaux (2) et (3) ou  $H_p = 13\text{ m}$  en tenant compte de la flèche  $f = 0,5\text{m}$  [9]

Pour cette partie, nous utiliserons la méthode de la tige fictive. On trouve :

$$Z = 10,65\text{m} \quad \text{donc nous trouvons :}$$

$$H = 14,57\text{m} \quad \text{à partir du sol.}$$

b) Pour les poteaux (4), (5), (6) nous avons  $H_p = 11\text{m}$  d'où :  $\Delta H = 0,53\text{m}$  nous trouvons :

$$Z = 6,529$$

d'où  $H=14,29\text{m}$

### C) Etude de la partie AB :

Pour cette partie, nous avons :  $H_p=11\text{m}$  et  $\Delta H=0,53\text{m}$

D'où nous trouvons :  $Z = 6,529$  donc :

$H=14\text{m}$ , hauteur des tiges à partir du sol pour les poteaux :

(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8).

### IV-4-1-1-2 Calcul du risque de contournement d'isolation :

Probabilité de dépassement du courant  $I_{cr}=1,76\text{ kA}$

$$P(I_F > 1,76\text{ kA}) = 97,5\% \quad (\text{fig.11})$$

Probabilité pour que la durée du courant de foudre soit inférieure à  $1\mu\text{s}$ .

$$P\tau(t_F < 1\mu\text{s}) = 10^{-2}$$

Probabilité qu'un courant de foudre entraîne un contournement d'isolation :

$$P = P(I_F < 1,76\text{ kA}) \cdot P\tau(t_F < 1\mu\text{s}) + P(I_F > 1,76\text{ kA})$$

$$P = 0,025 \cdot 10^{-2} + 0,975 = 0,97525$$

### Evaluation du niveau kéraunique :

**Tableau 2** : Nombre de journées orageuses de 2001 à 2008 : [10]

Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Nombre moyen de jours orageux
Nombre de jours orageux	21	24	38	22	21	12	22	21	22,625

Donc le niveau kéraunique est de :

$$Nk = 22,625$$

La densité de coup de foudre est de :

$$Ng = 1,326 CF/km^2 \cdot an$$

Calcul du nombre de contournement d'isolation :

$$\text{On a: } n = (l + 3,5h_1 + 3,5h_2) \cdot (L + 3,5h_3) \cdot P \cdot Ng \cdot 10^{-6}$$

$l$  : Largeur de la structure en [m]

$L$  : Longueur de la structure en [m]

$h_1$  : Hauteur maximale sur la ligne du poteau (1) ici  $h_1 = 10,26m$

$h_2$  : Hauteur maximale sur la ligne du poteau (8) ou(6) ici  $h_2 = 14,28m$

$h_3$  : Hauteur maximale sur la ligne (D) ici  $h_3 = 14,57m$

Avec :

$$L = 25,65m$$

$$l = 11,3m$$

$n = 0,00963$  Contournement /an.

D'où finalement nous aurons comme risque :

$$t = 1/n = 103,21 \text{ ans}$$

D'où un contournement d'isolation tous les 103,21 ans

**Tableaux récapitulatifs donnant les hauteurs des tiges verticales :**

**Tableau 3-1 : Première variante :**

**Distance 6m : partie bc**

poteaux	Ht
1	10,26
2	14,48
3	14,48
4	11,53
5	11,53
6	11,53

7	11,53
8	11,53

**Distance 6m : partie dc**

poteaux	Ht
2	14,57
3	14,57
4	14,28
5	14,28
6	14,28
7	14,28
8	14,28

**Distance 6m : partie ab**

Poteaux	HT
1	14,11
2	14,03
4	14,00
5	14,00
6	14,00
7	14,00
8	14,00

Le risque pour cette variante est d'un ci tous les 103,84 ans.

**Tableau 3-2 : Deuxième variante**

**Distance 12m : Partie bc**

Poteaux	HT
1	11,93
2	15,23
3	15,23
4	13,23
5	13,23
6	13,23
7	13,23

**Distance 12m : Partie dc**

Poteaux	HT
---------	----

2	17,61
3	17,61
4	15,61
5	15,61
6	15,61

**Distance 12m : Partie ab**

Poteaux	HT
1	13,51
2	13,23
4	13,76
6	13,76
8	13,76

Le nombre de contournement d'isolation pour cette variante est de

$n = 0,0107$  contournements /an.

D'où finalement nous aurons  $t = 1/n = 93,45$  ans

Donc nous aurons un risque tous les 93,45 ans.

#### IV-4 DIMENSIONNEMENT DU DISPOSITIF DE PROTECTION:

Un dispositif de protection est constitué de trois parties

- a. **Prise de terre:** ensemble de conducteurs enterrés reliés entre eux et en contact direct avec le sol.
- b. **Organes capteurs:** ils sont constitués de tiges verticales ou de câbles garde placés sur les points culminants de la structure à protéger et servent à intercepter la foudre.
- c. **Organes de descente:** ils sont constitués de conducteurs de toitures pour les bâtiments et les poteaux pour les postes ou les lignes.

##### IV- 4-1 Calcul des sections des paratonnerres:

La formule ci-après nous permet de calculer la section du conducteur selon le courant qu'il véhicule. [11]

$$S = \frac{[I^2 \times t]^{\frac{1}{2}}}{A} \quad (34)$$

S : Section du conducteur [ $mm^2$ ]

I : Intensité du courant [A]

t : Durée d'application du courant [S]

A: Facteurs fonction de la nature du matériau utilisé :

$$A = [\theta_c(B + 20) / \rho_{20} \cdot \ln(\theta_f - \theta_i) / (B + \theta_i) + 1]^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

$\theta_i$  : Température initial (ambiante) [°C]

$\theta_f$ : Température finale admissible du conducteur [°C]

$\rho_{20}$ : Résistivité électrique du matériau à 20°C [ $\Omega \cdot m$ ]

$\theta_c$  : Capacité thermique volumique du matériau [ $J/^\circ Cmm^3$ ]

$B$  : Inverse du coefficient de température de la résistivité à  $0^\circ C$  du matériau en [ $^\circ C$ ]

**Tableau 5** : Valeurs servant au calcul de "A"

Matériau	$B(^\circ C)$	$\theta_c(J/^\circ Cmm^3)$	$\rho_{20}(\Omega mm)$	$\theta_i(^\circ C)$	$\theta_f(^\circ C)$
Cuivre	234,5	$3,45 \times 10^{-3}$	$17,241 \times 10^{-6}$	20	200
Aluminium	228	$2,5 \times 10^{-3}$	$28,264 \times 10^{-6}$	20	200
Acier	202	$3,8 \times 10^{-3}$	$138,264 \times 10^{-6}$	20	200

En ce qui concerne le calcul de la section "S" nous utiliserons du cuivre comme matériau constituant les paratonnerres (verticaux et horizontaux).

Cette proposition vient du fait des très bonnes propriétés conductrices et de la rigidité mécanique du cuivre.

-pour le calcul de A nous trouvons :

$$A = 163,68$$

- Les sections minimales des paratonnerres pour toutes les variantes correspondants aux courants minimaux seront données par [11] :

$$S_{min} = [I_{min}^2 \cdot t]^{\frac{1}{2}}/A$$

Avec  $t = 0,2s$

- Les sections maximales pour les paratonnerres verticaux et horizontaux seront calculés par :

$$S_{max} = [I_{max}^2 \cdot t]^{\frac{1}{2}}/A$$

Avec

$$I_{max} = 150kA \quad t = 0,2s$$

**Conclusion :**

L'étude menée dans ce chapitre, montre que l'augmentation de la distance entre les tiges verticales entraîne l'augmentation du risque de contournement d'isolation. La méthode de détermination de la fiabilité d'une installation de protection primaire contre la foudre des structures électriques, est basée essentiellement sur le modèle électro-géométrique.

L'application de cette méthode au poste de FREHA montre que la protection par des tiges verticales est techniquement plus fiable.

Pour déterminer la variante la plus rentable, une étude économique est nécessaire pour déterminer le prix du revient.

Notons que par manque d'informations (tension de tenue des chaînes d'isolateurs et la résistance de la prise de terre), nous n'avons pas pu vérifier s'il y'aura un amorçage en retour des chaînes d'isolateurs (la contrainte pouvant conduire à un amorçage en retour est une surtension apparaissant aux bornes des chaînes d'isolateurs, qui a pour composante la tension induite par couplage électromagnétique entre le circuit emprunté par le courant de foudre et les conducteurs de phases d'une part, la montée en potentiel de la prise de terre d'autre part).

## **CONCLUSION GENERALE**

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à la protection contre les impacts de foudre, du poste d'interconnexion de FREHA.

La recherche bibliographique nous a permis de cerner le phénomène de la foudre, permettant l'application du modèle électro-géométrique.

Grace à ce modèle, nous avons conçu une protection du poste d'interconnexion par l'intermédiaire des paratonnerres et cela en exploitant les structures existantes.

Nous avons proposé deux variantes à savoir des tiges de 6m de longueur et celle de 12m.

Nous souhaitons que ce modeste travail constituera une contribution à la bibliographie universitaire, et une amorce à d'autres sujets sur la protection contre la foudre pour les futures promotions.

# POSTE HT/MT FREHA

