

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté du Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études

**En Vue de l'Obtention du Diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques**

THEME

***Protection d'un grand poste
d'interconnexion et de transformation
220/60/30 kV d'OUED AISSI contre
les surtensions atmosphériques***

Proposé et dirigé par :

**Mr C.BIROUCHE
Mme S.BELKACEMI
(SONELGAZ)**

présenté par:

**M^{elle} MEZAGUER Naima
M^{elle} ABERRANE Fatiha
M^{elle} TIDJEDAM Sadia**

Promotion : 2009/2010

Remerciements

Nous remercions le bon dieu de nous avoir donné le courage et la force de mener à terme notre travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur, Monsieur C.BIROUCHE enseignant à UMMTO d'avoir accepté de nous encadrer, ainsi de nous avoir orienté jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Mme BELKACEMI, Mr MEDJBAR de la SONEGAS de Tizi-Ouzou et à Mr MOUALEK de l'ALGERIE TELECOM.

Sans oublier de remercier Mr HEMACHI et tout le personnel du poste THT d'OUED-AISSI pour leurs gentillesse et leurs aides précieuses.

Par la même occasion, nous ne voudrions pas oublier l'ensemble des enseignants qui ont contribué et enrichie notre formation.

Ainsi nous remercions les membres de jury qui vont juger ce travail.

Nous ne pouvons terminer sans mentionner toutes celles et ceux qui, de près ou de loin nous ont également aidés pour finaliser ce travail.

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à:

- Ø Mes chers parents qui quoique je fasse je ne pourrai jamais leurs rendre la moindre minimum de ce qu'ils m'ont offerts.*
- Ø Mon cher époux Samir qui ma beaucoup encouragé et soutenu tout le long de ce travail et toute sa famille.*
- Ø Mes adorables sœurs : Ghania, Samira, Karima, son mari et ses enfants Abed El Hafid et Hanane.*
- Ø Mes frères : Rabah et Djilali.*
- Ø Mes grands-mères et mon grand-père Saïd.*
- Ø Ma belle mère Malha.*
- Ø Ma tante Nadjia et sa petite famille.*
- Ø Mes oncles : Mohammed, Arezki, Moukran, Omar et Rachid.*
- Ø Mon cousin Abed El Aziz.*
- Ø Mes cousines.*
- Ø Mes amies : Naima, Fatiha, Ouardia, Fatima et Kassia et leurs familles.*



Sadia

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à :

- Ø Mes chers parents qui quoique je fasse je ne pourrai jamais leurs rendre la moindre minimum de ce qu'ils m'ont offerts.***
- Ø Mes très chers frères : Mohamed, Mourad et sa femme Karima et leur adorable fils Yanis.***
- Ø Mes cheres sœurs : Nadia, son fiancé Karim ; Farida, son mari Mouhamed ; Nassima, son mari Fawzi et leur adorable fils Moumouh .***
- Ø Mon fiancé Mohamed, qui ma beaucoup encouragé tout le long de ce travail et toute sa famille.***
- Ø Mes oncles, Mes tentes ainsi que leurs familles.***
- Ø Mes amies Sadia, Naima et leurs familles.***
- Ø Ma meilleure amie Nacera et sa famille.***
- Ø Toute la promotion ETH 2009 / 2010.***



Fatiha

Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à :

- Ø Mes très chers parents qui m'ont soutenu le long de mes études et à qui je dois une profonde reconnaissance.*
- Ø Mes chers frères : Mustapha, Ali, Rabah, Smail, Hocine.*
- Ø Mes adorables sœurs : Houria, Nacera, Malika, son mari Rachid, ainsi que leurs filles (Célina et Melissa).*
- Ø Toute ma famille.*
- Ø Mes amies Sadia, Fatiha et leurs familles.*
- Ø Toute la promotion ETH 2009 / 2010.*
- Ø Tous ceux qui j'ai connu durant mon cycle d'étude.*
- Ø Toutes les personnes qui m'aiment et que j'aime.*



Naima

SOMMAIRE

Introduction générale	(1)
Chapitre I: Généralités sur la foudre	
I-1 Introduction	(02)
I-2 L'origine de surtensions de la foudre	(02)
I-3 Surtension résultant du coup de foudre direct.....	(03)
I-4 Surtensions résultant de coups de foudre indirects.....	(04)
I-5 Les phénomènes précurseurs	(05)
I-5-1 Formation du nuage	(05)
I-5-2 Formation des charges	(05)
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 positif.....	(07)
I-6-1-2 Le coup de foudre négatif	(08)
I-6-1-3 Coup de foudre descendant.....	(08)
I-6-1-4 Coup de foudre ascendant.....	(08)
I-7 Les effets de la foudre.....	(11)
I-7-1 Les effets thermiques.....	(11)
I-7-2 Les effets électriques	(12)
I-7-3 L'effet électromagnétique	(12)
I-8 Conclusion.....	(13)

Chapitre II: Dispositifs de protection contre les surtensions de foudre

II-1 Introduction	(14)
II-2 Protection secondaire	(14)
II-2-1 Les éclateurs.....	(14)
II-2-1-1 Eclateur avec tige anti-oiseaux	(15)
II-2-1-2 Eclateur à tige	(16)
II-2-1-3 Avantages et inconvénients	(16)
II-2-2 Les parafoudre.....	(17)
II-2-2-1 Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs	(18)
II-2-2-1-1 Principe de fonctionnement.....	(18)
II-2-2-2 Parafoudre à oxyde de zinc.....	(19)
II-2-2-2-1 Principe de fonctionnement.....	(20)
II-2-2-2-2 Choix des parafoudres à oxyde de zinc en HT	(21)
II-3 La protection primaire	(22)
II-3-1 Le paratonnerre à tige simple.....	(23)
II-3-2 Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA).....	(24)
II-3-3 Le paratonnerre à cage maillée	(25)
II-3-4 Le paratonnerre à fils tendus.....	(25)
II-4 Le modèle électro-géométrique.....	(27)
II-4-1 Construction et propriétés géométriques du modèle.....	(29)
II-4-1-1 Construction géométriques du modèle.....	(29)
II-4-1-2 Propriétés géométrique du modèle.....	(31)

II-4-1-3 Valeur de Y à prendre en compte pour déterminer θ_0	(32)
II-5 Méthode graphique de détermination de la zone de protection	(32)
II-5-1 La méthode de la sphère fictive	(32)
II-5-1-1 Principe de la méthode	(32)
II-5-2 Quelques applications simples	(33)
a. Zone de protection de deux tiges verticales	(33)
b. Zone de protection de quatre tiges verticale	(37)
c. Zone de protection d'un fil tendu horizontalement	(39)
d. Zone de protection d'une nappe de fils horizontaux	(40)
II-6 Conclusion.....	(41)

Chapitre III : Sévérité orageuse et éléments de statistiques

III-1 Introduction.....	(42)
III-2 Le niveau kéraunique (N_K) et la densité de coup de foudre (N_S)	(42)
III-3 Facteur locaux influençant le foudroiemnt	(43)
III-3-1 Facteurs topologique	(43)
III-3-2 Facteurs géologiques	(44)
III-3-3 La concentration ionique de l'air	(44)
III-4 Fréquence de foudroiemnt.....	(44)
III -5 Cas générale d'une structure électrique.....	(45)
III -6 Analyse du foudroiemnt d'une ligne	(46)
III-7 Fréquence de foudroiemnt du poste.....	(48)
III-8 Forme et amplitude de l'onde de foudre.....	(51)

III-9 Les caractéristique d'un coup de foudre.....(53)

III-10 Conclusion.....(53)

Chapitre IV : Protection du poste contre la foudre

IV-1 Introduction.....(54)

IV-2 Description du poste d'interconnexion et de transformation THT OUED AISSI
(220/60/30Kv).....(54)

IV-2-1 Alimentation(54)

IV-2-2 Composition du poste 220 kV(54)

IV-2-3 Consistance des travées 220 kV(54)

IV-2-3-1 Travée départ ligne 220 kV(54)

IV-2-3-2 Travée transformateur 220/60/11 kV(55)

IV-2-4 Composition du poste 60 kV(55)

IV-2-5 Consistance des travées 60 kV(55)

IV-2-5-1 Travée départ ligne 60 kV(55)

IV-2-5-2 Travée transformateur 60/30 kV(56)

IV-2-6 Composition du poste 30 kV(56)

IV-2-7 Transformateurs des services auxiliaires (TSA).....(56)

IV-3 Détermination du courant critique(58)

IV-4 Tension d'isolement au choc de la ligne U_{μ}(58)

IV-5 Impédance d'onde(59)

IV-6 Evaluation du courant critique du poste THT d'OUED AISSI.....(60)

IV-7 Evaluation du niveau céramique.....(62)

IV-8 Application du modèle électro-géométrique.....	(63)
IV-8-1 Tiges verticales	(63)
IV-8-1-1 Première variante : tiges distantes de 15 m.....	(63)
IV-8-1 -1-1 Calcul des hauteurs des tiges.....	(63)
IV-8-1 -1-2 Calcul du risque de contournement d'isolation.....	(65)
IV-8-1-1-3 Tableaux récapitulatifs donnant les hauteurs des tiges verticale	(66)
IV-8-2 Fils de garde.....	(68)
IV-8-2-1 Etude de la protection par fils de garde existante.....	(68)
IV-8-2-2 Etude de nouvelles variantes	(68)
IV-8-2-2-1 Première variante.....	(69)
IV-8-2-3 Calcul du risque de contournement d'isolation.....	(70)
IV-8-2-4 Tableaux récapitulatifs donnant les hauteurs de fixations des câbles de garde	(71)
IV-9 Conclusion	(72)
Conclusion générale	(73)

Introduction générale

Dés les débuts des transports de l'énergie électrique, les ingénieurs ont été confrontés à la foudre et à ces effets sur leurs ouvrages, que se soit les lignes ou les postes. Ils se sont rapidement aperçus que ce phénomène atmosphérique constituait l'une des contraintes majeures dont il fallait tenir compte.

Pour maîtriser les perturbations engendrées par les surtensions atmosphériques, les chercheurs et les concepteurs des réseaux construisirent leurs propres dispositifs de protection (éclateurs, parafoudres, paratonnerres et câbles de garde) dans le but d'écouler la surtension à la terre.

Le but de notre travail est l'étude de la protection du poste très haute tension d'OUED AISSI, contre les surtensions atmosphériques, pour cela nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre traitera des généralités sur la foudre.

Le deuxième chapitre consistera à la représentation des moyennes de protection contre la foudre.

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

Dans le dernier chapitre on va étudier la protection du poste d'interconnexion et de transformation (220/60/30kV) d'OUED-AISSI.

Chapitre I :

Généralités sur la

foudre

I-1 Introduction :

Le coup de foudre est une décharge électrique se produisant dans un grand intervalle d'air dont les électrodes sont d'une part un nuage orageux chargé et d'autre part la terre.

La foudre reste scientifiquement assez mal connue car étant brève et imprévisible, son étude en laboratoire est donc difficile. Dans les grands laboratoires, on provoque le coup de foudre par le lancement d'une fusée, reliée par un fil à la terre.

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

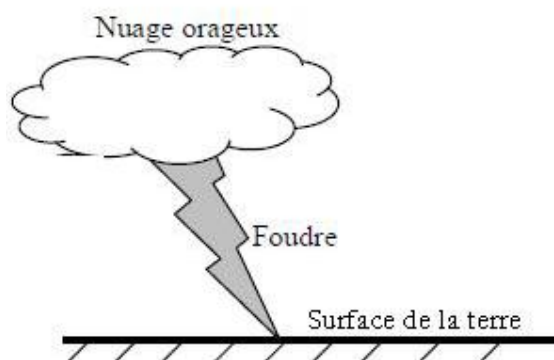


Figure (I-1) : Coup de foudre [2].

I-2 L'origine de surtensions de la foudre :

a. La foudre sur les lignes aériennes : En tombant sur la 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 tombant sur 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 [14].

I-3 Surtension résultant du coup de foudre direct :

Lorsque le coup de foudre tombe sur un conducteur de phase d'une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact et se propage le long du conducteur. Il entraîne avec lui une onde de tension, dont la valeur en première approximation est donnée par :

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

Z_c : impédance caractéristique de la ligne.

$i(t)$: le courant injecté

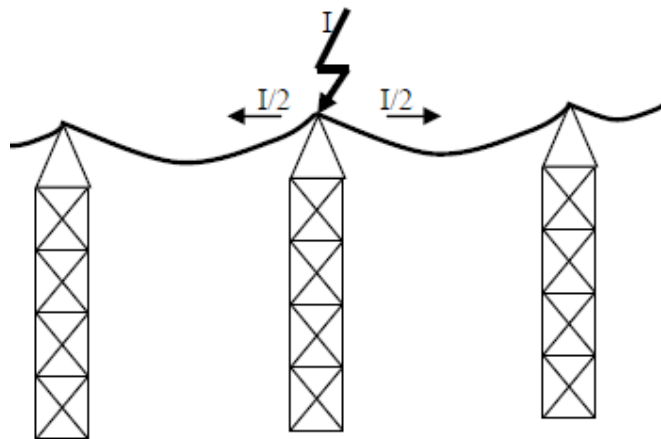


Figure (I-2) : Coup de foudre direct sur une ligne [2].

I-4 Surtensions résultant de coups de foudre indirects :

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. A cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs kilomètres [2].

La surtension correspondante peut atteindre des centaines de kV.

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

Avec :

R : résistance de la prise de terre.

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

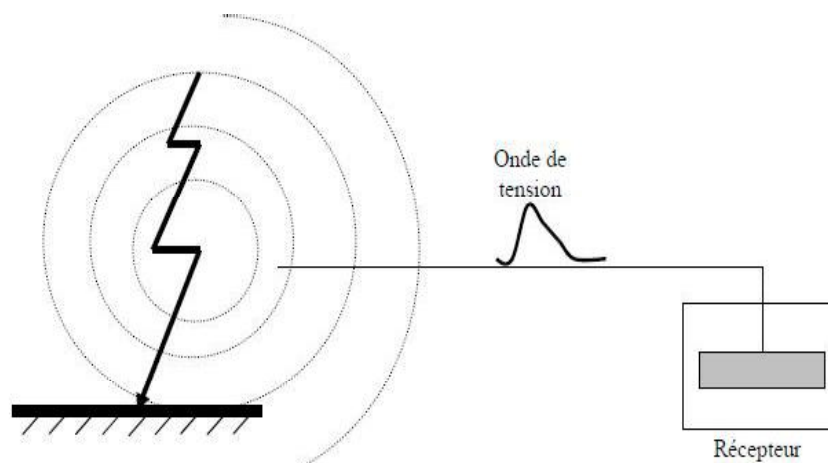


Figure (I-3) : Coup de foudre indirect [2].

I-5 Les phénomènes précurseurs :

I-5-1 Formation du nuage :

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 [2].

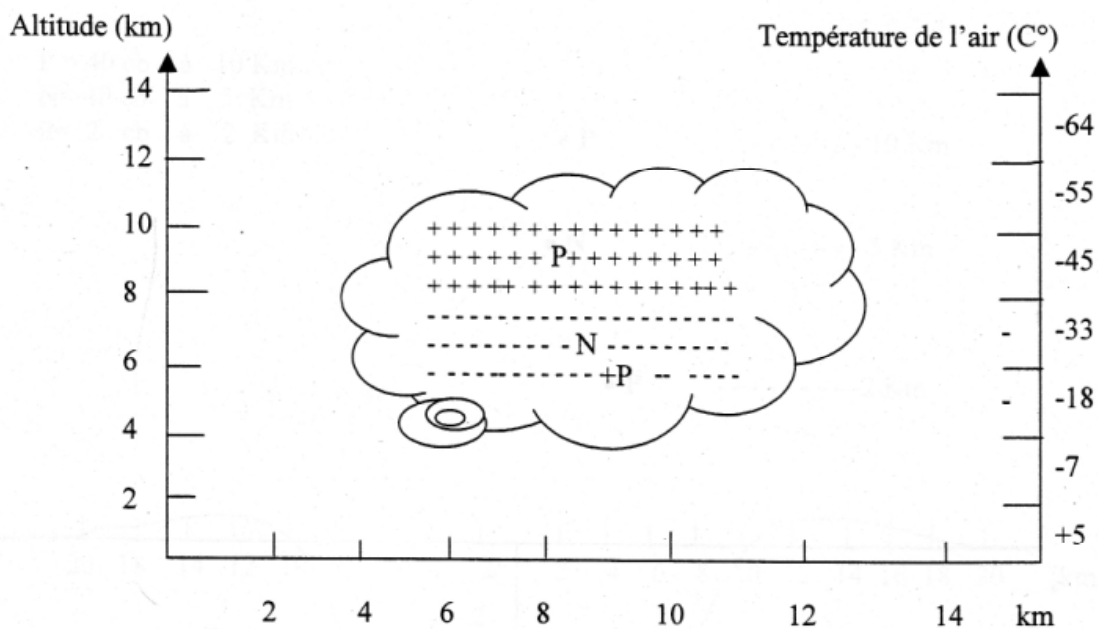


Figure (I-4): Constitution du nuage [2]

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 [2].

I-5 -3 Répartition des charges :

Les microparticules de glace plus légères et chargées positivement, sont emportées par le courant d'air ascendant vers le haut, occupent la partie supérieure du nuage et forment le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif. Une petite quantité de charges positives demeurent à la base du nuage [2].

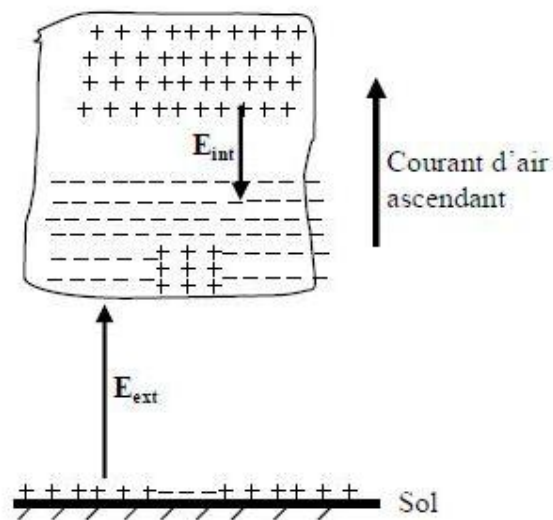


Figure (I-5) : Formation et répartition des charges [2].

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) [2].

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 traceur, qui progresse à travers l'air avec une vitesse relativement faible. Cette pré-décharge à son origine, soit dans le nuage et elle progresse alors en direction du sol, soit au niveau du sol, et progresse vers le nuage.

On classe donc tout d'abord les coups de foudre selon le sens de développement du traceur (ou leader):

- Les coups de foudre descendants (développement du traceur à partir du nuage).
- Les coups de foudre ascendants (développement du traceur à partir du sol).

En pays plat, le coup de foudre normal, de loin le plus fréquent, est descendant. Pour qu'un coup ascendant puisse se développer, la présence d'une proéminence importante, telle que une tour élevée est nécessaire ; c'est aussi la raison pour laquelle le coup ascendant se produit plus fréquemment en montagne.

En second lieu, on classe les coups de foudre selon le sens d'écoulement du courant principal. Conventionnellement, on définira [3] :

I-6-1-1 Le coup de foudre positif:

Le bas du nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant de 0,1 à 0,2 s. La durée d'attaque varie entre 20 μ s et 50 μ s et l'amplitude du courant des coups positifs est généralement supérieure à celle des coups de foudre négatifs [5].

I-6-1-2 Le coup de foudre négatif :

Le bas du nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées : à une première décharge partielle de durée de front de 10 à 15 μ s succèdent des décharges d'attaque plus raides et de descentes plus douces [5].

I -6-1-3 Coup de foudre descendant :

Caractérisé par son arborescence ouverte vers le bas, c'est le plus fréquent. Il comporte une phase initiale où une pré-décharge se propage par bonds successifs du nuage vers le sol (traceur). A l'extrémité de ce traceur, le champ électrique est extrêmement élevé, ce qui augmente localement le champ au sol.

Dès que la pointe du traceur approche du sol, des pré-décharges ascendantes vont se développer à partir du sol. Lorsque ces deux canaux se rejoignent, un pont conducteur entre nuage et sol s'établit et permet ainsi le passage d'un courant de forte intensité [5].

I-6-1-4 Coup de foudre ascendant :

Il est caractérisé par une arborescence ouverte vers le haut. Dans le cas de pylônes de grande hauteur ou de tours, l'effet couronne peut créer une décharge, partant du sol qui va se développer suffisamment loin pour atteindre le nuage. Dès qu'un canal conducteur est créé, les charges accumulées dans le nuage vont bien s'écouler au sol. Le coup de foudre ascendant est très fréquent en zone de montage [5].

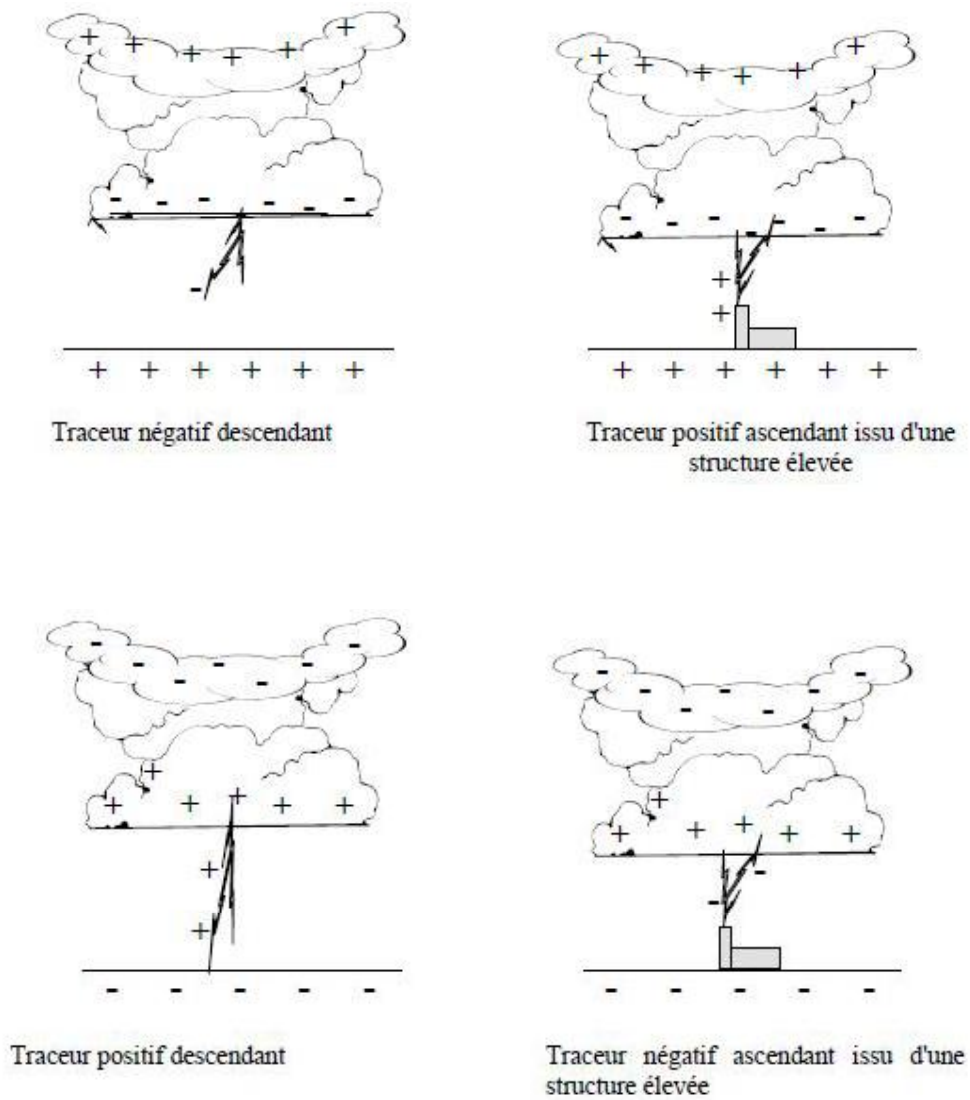


Figure (I-6) : Les différents types des coups de foudre [5].

90% des coups de foudre sont de type négatif descendant. Les mécanismes particuliers de ce type de coup de foudre sont présentés schématiquement ci-dessous.

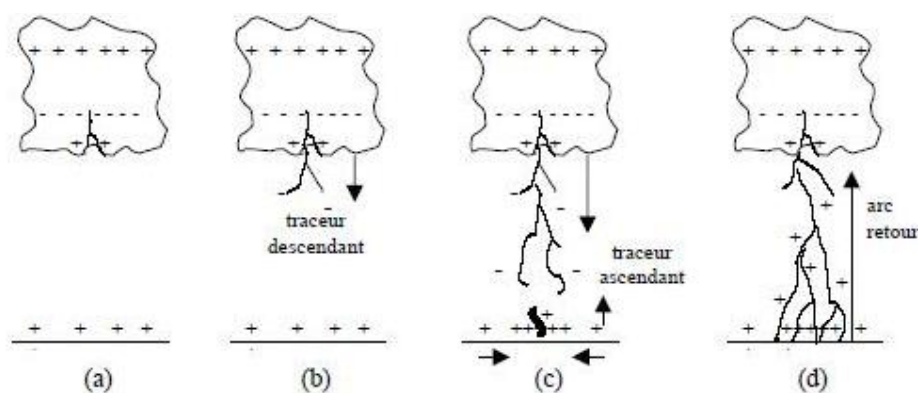


Figure (I-7) : Représentation schématique d'un coup de foudre négatif descendant.

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, se dirigeant du sol vers le nuage (c). Lors de la rencontre de ces deux traceurs, un canal conducteur 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 foudre 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 [5].

I-7 Les effets de la foudre :**I-7-1 Les effets thermiques :**

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

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

-Lors de coups de foudre, un contact de mauvaise qualité entre deux conducteurs peut être le siège d'un échauffement important conduisant à la fusion des pièces en contact. Cette fusion pouvant s'accompagner également de la formation d'un arc de retour et de projection de métal porté à haute température, peut constituer un facteur incendiaire important.

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

-Aux points de jonction entre un conducteur (surface métallique) et un arc de retour, une grande quantité de charges électriques doit être écoulée dans un temps très bref. Ce phénomène entraîne un échauffement local important du métal, qui, s'il s'avère généralement sans conséquences graves, peut conduire à la perforation de tôle d'acier de 2 à 3 mm d'épaisseur.

-Enfin, lorsque l'arc de retour traverse des substances inflammables, il est capable de déclencher un incendie directement par conduction de la chaleur ou par simple rayonnement thermique [5].

I-7-2 Les effets électriques :

-Lorsqu'un coup de foudre frappe une ligne électrique, l'onde électrique se propage le long du conducteur, c'est donc une très forte énergie qui est injecté dans la ligne électrique qui provoque une surtension et presque toujours un court-circuit.

-L'impact de la foudre est accompagné d'un rayonnement électromagnétique ; si ce dernier atteint un conducteur (une ligne électrique par exemple), le flux électromagnétique est générateur de tensions induites élevées [6].

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 apparaitre dans les conducteurs proches. A titre d'illustration, signalons qu'à 100 m du point d'impact, un éclair peut induire une tension de 80 V dans une boucle d'un mètre carré formée par un conducteur.

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

Par ailleurs, certains équipements sensibles aux perturbations électromagnétiques peuvent être perturbés ou détruits par le champ créé par un éclair proche [5].

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 petites décharges, provoque des tensions excédant largement les tensions maximum admissibles des matériels électriques. Alors la protection contre le danger de la foudre est impérative.

Chapitre II :

Les dispositifs de protection

II-1 Introduction :

Les systèmes d'énergie électrique peuvent être assujettis à des surtensions de toute nature. Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolation des lignes de transmission et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique. Par suite la nécessité de se protéger contre ces surtensions est indispensable. Pour cela, il faut utiliser des moyens de protections très performants et fiables. 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.

Le coup de foudre peut être direct s'il tombe directement sur une structure, les moyens de protection dans ce cas sont les paratonnerres : C'est la protection primaire, est indirect s'il frappe le sol au voisinage d'une structure, les moyens de protection dans ce cas sont les éclateurs et les parafoudres: C'est la protection secondaire.

II-2 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 dériver l'énergie de l'impulsion directement vers la terre et de réduire l'amplitude des surtensions [9].

II-2-1 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 :

II-2-1-1 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 [6].

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 mm²; la liaison à la terre est établie par un conducteur en cuivre de 29 mm² de section [1].

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 [6].

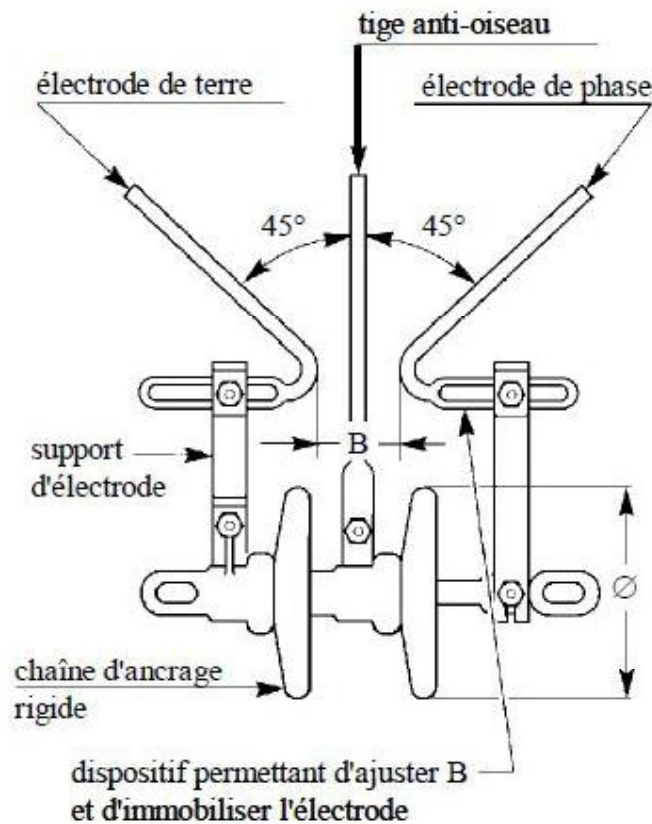


Figure (II-1): Eclateur avec tige anti-oiseaux [6].

II-2-1-2 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 [1].

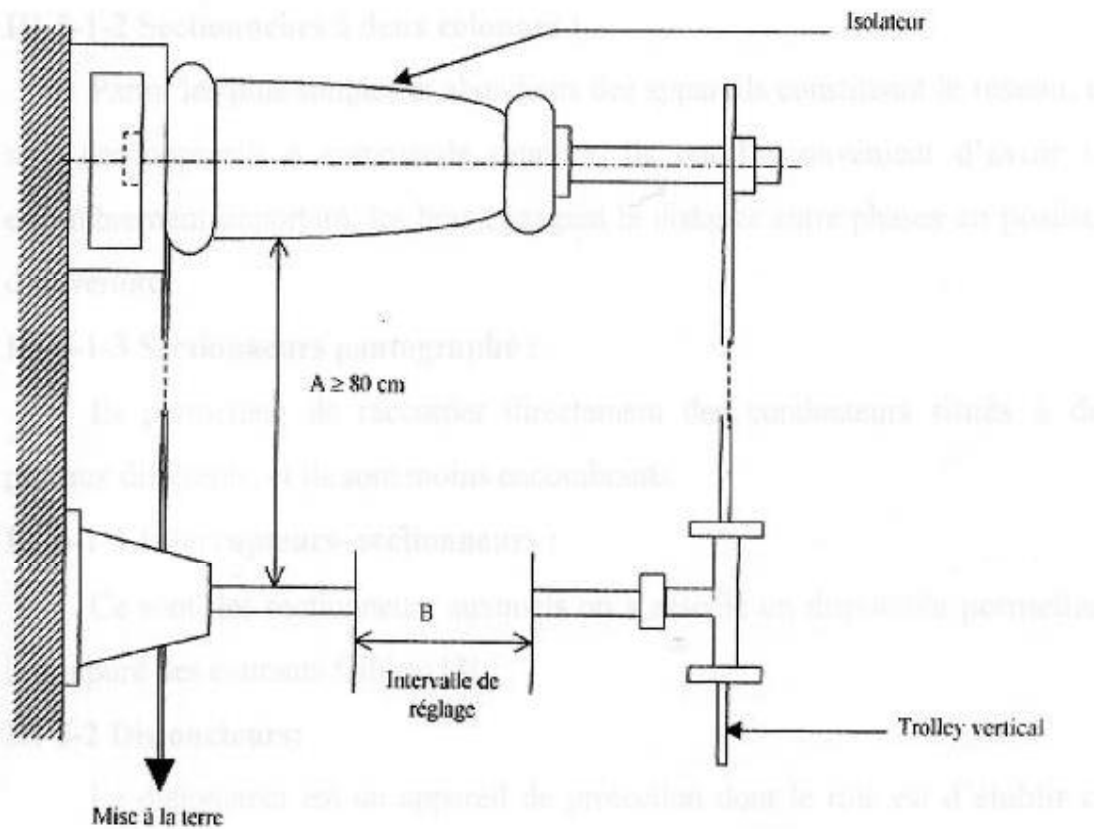


Figure (II-2): Eclateur à tige [1].

II-2-1-3 Avantages et inconvénients :

Les principaux avantages des éclateurs sont :

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

Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans de nombreux inconvénients.

-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 demeure, sur les réseaux de distribution et de transport d'électricité (jusqu'à 225kV), 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 que les niveaux de protection des éclateurs. En revanche, il est moins bien adapté à la protection des autres matériels tels que les transformateurs, les câbles, les postes électriques sous enveloppe métallique, etc. [6].

II-2-2 Les Parafoudres :

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

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

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 [6].

II-2-2-1 Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs :

Ce parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances au carbure de silicium, associées en série avec un ou plusieurs éclateurs.

L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote) [8].

II-2-2-1-1 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 du courant.

Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à varistance et éclateurs. La plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC) [6].

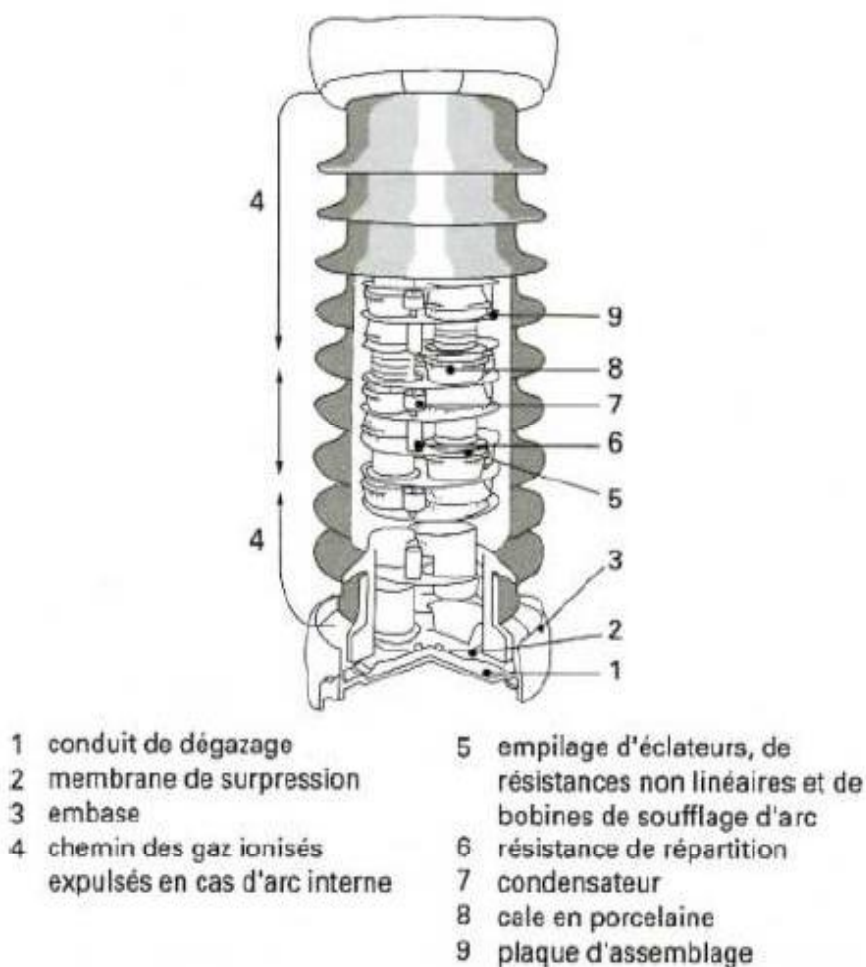


Figure (II-3) : Parafoudre à résistances variables avec éclateur [6].

II-2-2-2 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 [6].

II-2-2-2-1 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 mA) à 15Ω pendant la décharge.

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

La forte non linéarité du parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension [6].

-

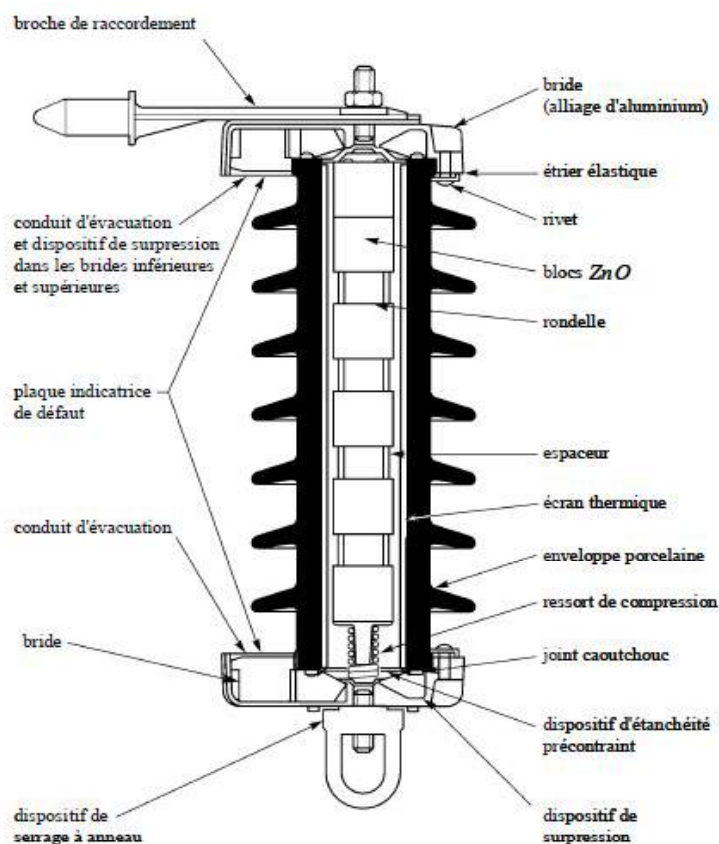


Figure (II-4) : Parafoudre à oxyde de zinc [6].

II-2-2-2-2 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.
- $I_{n(d)}$: courant nominal de décharge.
- Classe de décharge et capacité énergétique.

-Caractéristiques mécaniques.

Les données relatives au réseau sont :

- U_{rn} : tension la plus élevée pour le matériel.

- **Détermination de 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 :

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

$$U_r = 1,25 \cdot U_c$$

- **Détermination de courant nominale de décharge I_{nd} :**

En pratique, pour la gamme de tension $1\text{KV} \leq U_m \leq 52\text{kV}$, deux valeurs de I_{nd} sont disponibles : 5kA et 10kA [6].

II-3 La protection primaire :

Pour protéger une structure contre les coups de foudre directs, il convient de privilégier un point d'impact possible afin d'épargner le reste de la structure et de faciliter l'écoulement du courant électrique vers le sol en minimisant l'impédance de parcours utilisé par la foudre [9]

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.

II-3-1 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 du traceur de la foudre pour dévier le courant vers la terre.



Figure (II-5) : Paratonnerre à tige simple [10].

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 [2].

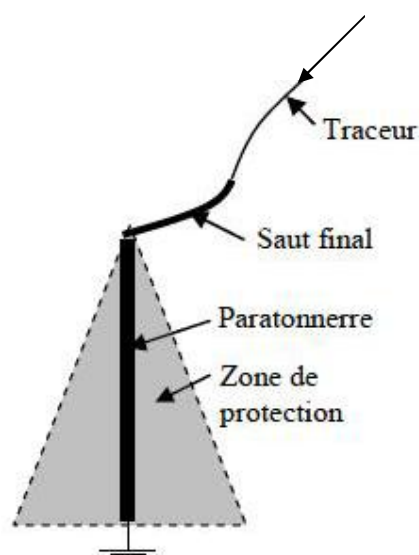


Figure (II-6) : Zone de protection d'un paratonnerre à tige simple [2].

II-3-2 Le paratonnerre à dispositif d'amorçage (PDA) :

Le paratonnerre à dispositifs d'amorçage est un paratonnerre à tige simple ou à pointe qui puise son champ magnétique dans le champ électrique atmosphérique. L'énergie récupérée est accumulée puis libérée en masse pour assurer une ionisation par étincelage au niveau de la pointe. Cette ionisation artificielle ainsi que l'effet de pointe favorisent le pouvoir actif.

Un système électrique ou électronique situé à l'extrémité de la tige, émet un signal de haute tension impulsionnelle d'amplitude et de fréquence déterminées générant une avance à l'amorçage dès que le champ ambiant dépasse une valeur seuil qui correspond au risque minimum de foudroiement.

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 [10].



Figure (II-7) : Paratonnerre à dispositif d'amorçage [10].

II-3-3 Le paratonnerre à cage maillée : (cage de Faraday)

Son principe consiste à favoriser la répartition et l'écoulement vers la terre du courant de foudre par un ensemble de conducteurs et prises de terre. En effet, le courant de foudre est divisé par le nombre de descentes et la faible valeur du courant circulant dans les mailles crée peu de perturbation par induction [9].

II-3-4 Le paratonnerre à fils tendus (câble de garde) :

Le câble de garde protège contre la foudre car il est placé juste au dessus des conducteurs, en cas de coup de foudre c'est lui qui est touché en premier. Après l'impact de la foudre, il transfère le courant vers la terre à travers le pylône. La présence des câbles de garde n'empêche pas d'éviter les coups de foudre, ils sont néanmoins utiles dans la mesure où leur présence fait diminuer leur probabilité dans un rapport de 1,5 à 5 environ, selon l'activité orageuse de la région [2].

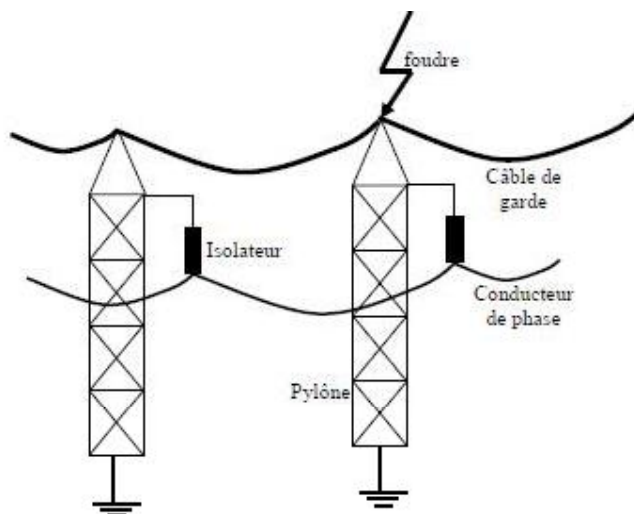


Figure (II-8) : Schéma de câble de garde [2].

• **Remarque :**

-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 du rôle de protection, il contribue à l'amortissement des ondes de surtension de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase 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 les câbles de garde [2].

II-4 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 haute tension. Il est donc particulièrement bien adapté à l'étude de la protection des lignes, mais peut être considéré, d'une façon plus générale, comme représentant assez bien les mécanismes physiques d'impact et de la foudre [3].

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 du courant de foudre peut être décrite par plusieurs formules selon leurs auteurs correspondants [5] :

Auteur	Formule
Whitehead	$d = 2I_{cr} + 30 1 - \exp(-I_{cr}/6,8) , \quad d = 7,1(I_{cr})^{0,75}$
Golde	$d = 9,4(I_{cr})^{2/3}$
Ruhling	$d = 28(I_{cr})^{0,5}$

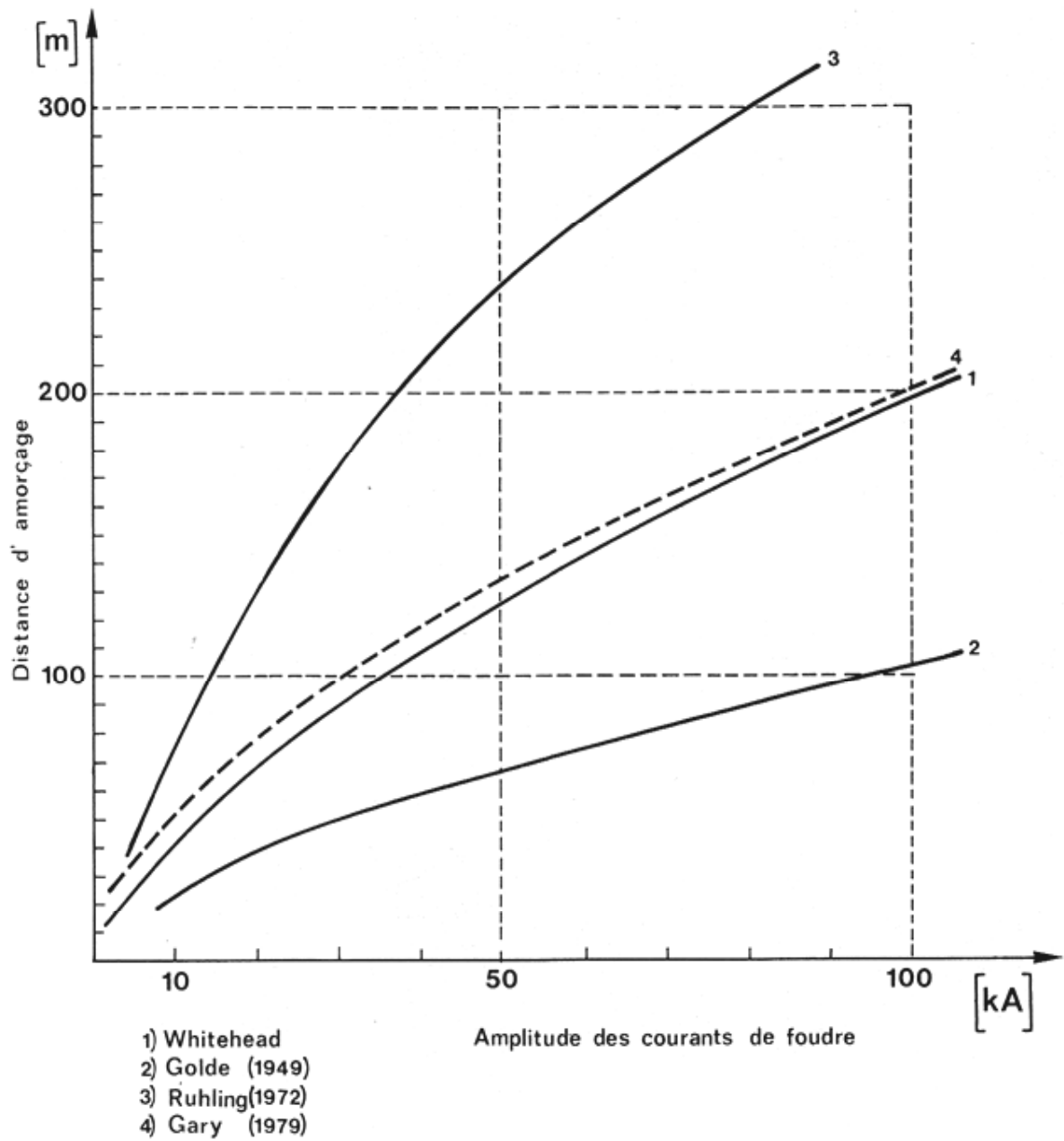


Figure (II-9) : Relation entre la distance d’amorçage et le courant de crête [7]

II-4-1 Construction et propriétés géométriques du modèle :**II-4-1-1 Construction géométriques du modèle :**

Cette construction doit être appliquée en premier lieu aux conducteurs les plus exposés.

Considérons un système d'axes xOy , dans lequel l'axe Ox représente le sol et plaçons un conducteur actif de ligne en A . Les autres conducteurs sont, suivant le type de lignes, à gauche de A ou au-dessous de A .

Traçons la parabole p définie par le lieu des points à égale distance du conducteur et du sol.

D'après la première hypothèse du modèle, toute pointe de traceur qui se présentera dans la zone I située à droite de cette parabole appellera une décharge ascendante à partir du sol avant le câble. La zone I est donc une région sans danger pour la ligne.

Supposons alors la distance d'amorçage critique connue, soit d_c ; traçons un arc de cercle de rayon d_c , centré en A et coupant la parabole en M , soit f cet arc.

Nous définissons une zone II, située à la fois à gauche de f et de la parabole P .

Si une pointe de traceur pénètre dans cette zone, le point d'impact qui en résultera serait en l'absence d'un câble de garde nécessairement le câble actif, mais comme cette zone est caractérisée par $d_a < d_c$, le courant présumé correspondant I_a sera inférieur au courant critique I_c et l'impact n'aura pas de conséquence.

Il reste donc à protéger une région III de l'espace, comprise entre l'arc de cercle f et la parabole P , au-dessus du point M , c'est la zone dans laquelle le câble de garde devra jouer son rôle protecteur pour le câble actif A . Traçons, avec M pour centre et d_c pour rayon, un nouvel arc de cercle g . Tout point F de cet arc forme avec A et M un triangle isocèle de base AF , par conséquent, tout point Q situé au-dessus de la médiatrice MN sera tel que $QF < QA$.

Cette condition est en particulier remplie pour tous les points de la région III.

Y : Hauteur pondérée des conducteurs au-dessus du sol.

Y_p : Hauteur du conducteur à son point d'accrochage au pylône.

S_c : Flèche du conducteur.

H : Hauteur pondérée du câble de garde au-dessus du sol.

H_p : Hauteur de l'accrochage au pylône du câble du garde.

S_g : Flèche du câble du garde.

C : Distance moyenne entre conducteur et câble de garde

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

d_c : Distance d'amorçage d'un coup de foudre d'intensité présumée I_A (kA).

Toutes les distances sont exprimées en mètres.

II-4-1-2 Propriétés géométrique du modèle :

D'après la figure (II-10), on a :

$$\alpha = \arcsin \left[1 - \frac{Y}{d_c} \right]$$

D'autre part $\theta_0 = \alpha - \beta$

Et en désignant par C la distance FA entre fil de garde et câble d'actif à hauteur moyenne, il vient :

$$\theta_0 = \arcsin \left[1 - \frac{Y}{d_c} \right] - \arcsin \left[\frac{C}{2d_c} \right] \quad (\text{II-1})$$

Cette relation permet de déterminer l'angle de protection θ_0 en fonction des paramètres réduits :

$$\frac{Y}{d_c} \text{ et } \frac{C}{d_c}$$

II-4-1-3 Valeur de Y à prendre en compte pour déterminer θ_0 :

Pour tenir compte, d'une part de l'influence du terrain, d'autre part des incertitudes électriques liées au modèle, on convient de prendre en terrain plat [3]:

$$Y = 1,1 \left(Y_p - \frac{2}{3} S_c \right) \quad (\text{II-2})$$

II-5 Méthode graphique de détermination de la zone de protection :

II-5-1 La méthode de la sphère fictive :

II-5-1-1 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 du 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 du traceur. A l'approche du 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 [3].

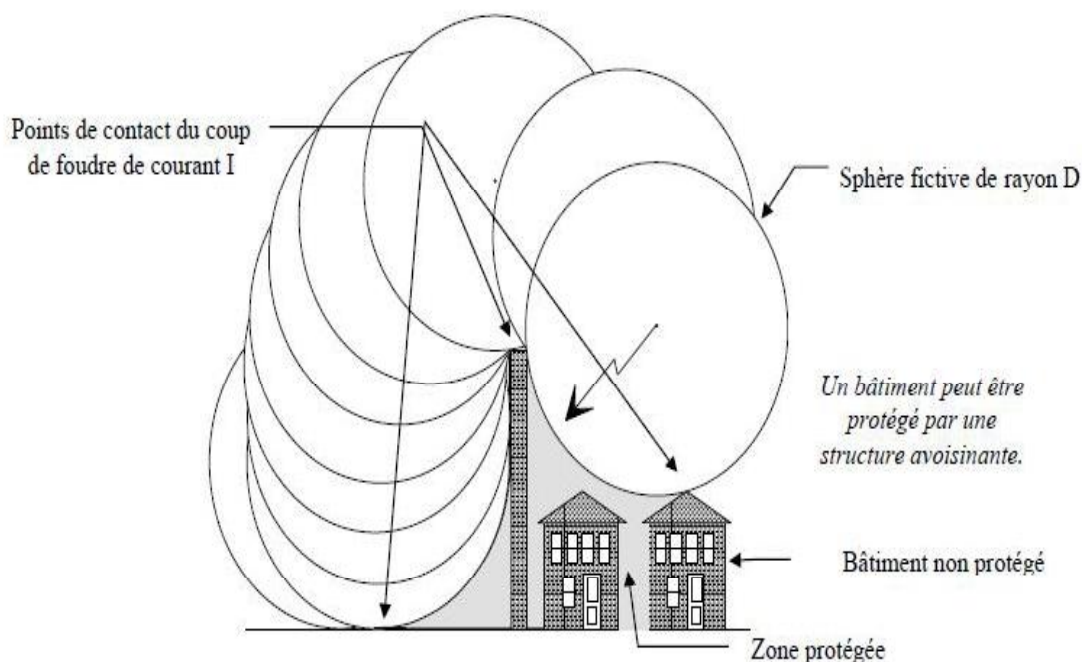


Figure (II-11) : Application de la méthode de la sphère fictive [5].

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 [5].

II-5-2 Quelques applications simples :

a. Zone de protection de deux tiges verticales :

Soient $2D$ la distance entre les deux tiges, et h leur hauteur commune. Pour que la protection soit efficace, il faut, bien entendu, que $D < h$, sinon les deux tiges ont une action indépendante.

Deux cas sont alors à considérer :

1) $d > h$

La figure (II-12-a) montre que, dans ces conditions, la hauteur protégée vaut, au centre :

$$p = d - \sqrt{(d - h)^2 + D^2} \quad (\text{II-3})$$

La distance de protection au sol est donnée par :

$$x_0 = h(2d - h) \quad (\text{II-4})$$

2) $d < h$

La figure (II-12-b) montre immédiatement que :

$$p = d - D \quad (\text{II-5})$$

$$X_0 = \sqrt{d^2 - D^2} \quad (\text{II-6})$$

Lorsque l'on fait basculer la sphère autour des deux tiges, de telle sorte qu'elle reste toujours en contact avec leurs sommets, on peut voir que le rayon r du cercle découpé par le plan contenant les deux tiges croît. Au moment où le centre de la sphère est exactement dans ce plan, la hauteur de protection devient :

$$p = h - d + \sqrt{d^2 - D^2} \quad (\text{II-7})$$

Qui est nécessairement supérieure à celle des cas 1) et 2) ci-dessus.

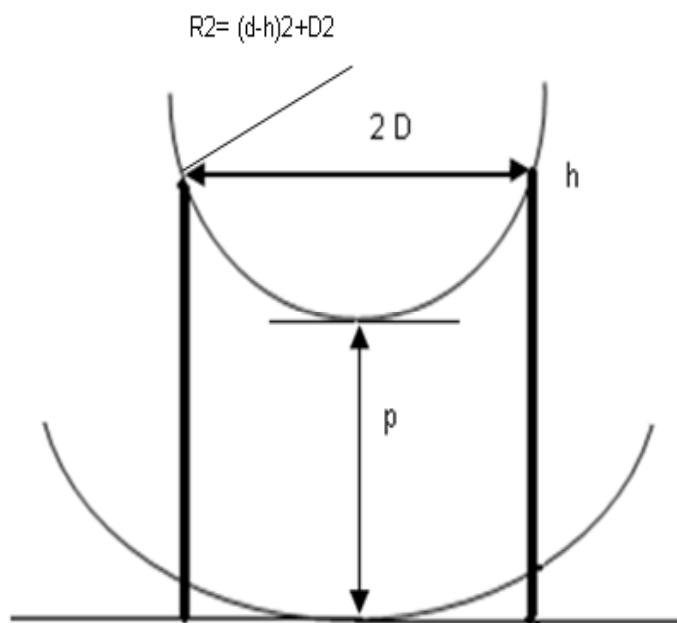
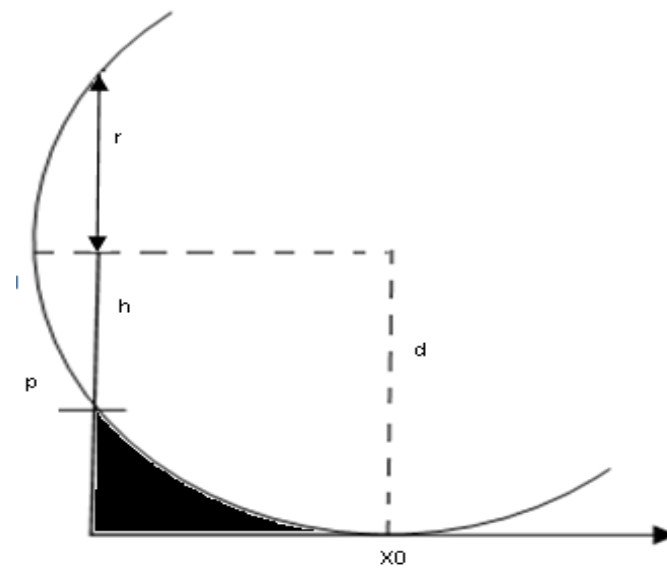


Figure (II-12-a): Zone de protection de deux tiges verticales si $d > h$ [3].

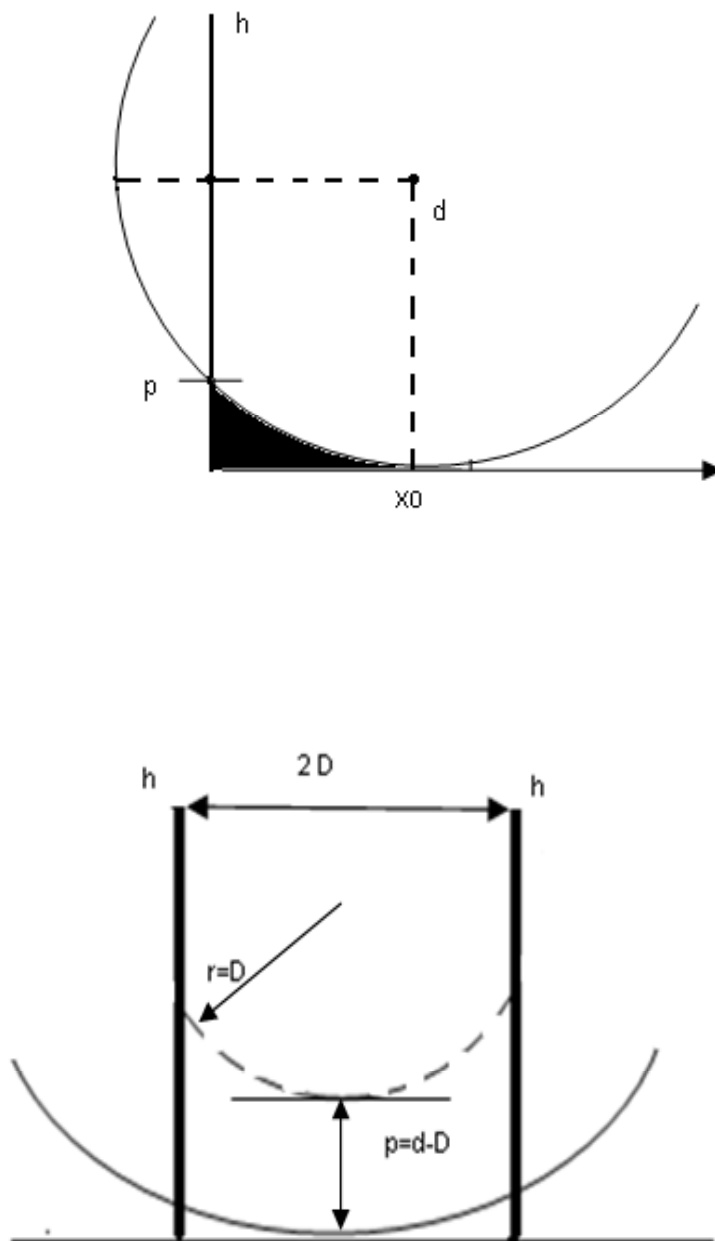


Figure (II-12-b): Zone de protection de deux tiges verticales si $d < h$ [3].

b. Zone de protection de quatre tiges verticale identiques:

Les quatre tiges forment un carré de côté $2D$.

Pour l'approche horizontale de la sphère, on construira la zone de protection comme ci-dessous.

Pour l'approche verticale, la figure (II-13) montre que la hauteur de protection, au centre du carré, vaut :

$$p = h - d + |d^2 - (X^2 + Y^2)/4|^{1/2} \quad (\text{II-8})$$

La figure montre alors la zone totale de protection offerte par un dispositif à 4 tiges verticales.

c. Zone de protection de quatre tiges verticale différentes:

Soit quatre tiges : deux tiges sont de hauteurs h_1 et deux autres tiges de hauteurs $h_2 < h_1$

La hauteur de protection h est donnée par la formule suivante :

$$h = p + d - [d^2 - ((X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} - Z/2)^2]^{1/2} \quad (\text{II-9})$$

Avec :

$$Z = 2 \cdot |\Delta h (2d - \Delta h)|^{1/2}$$

$$\Delta h = h - p$$

Z est la diagonale du rectangle formé par les tiges de même hauteurs.

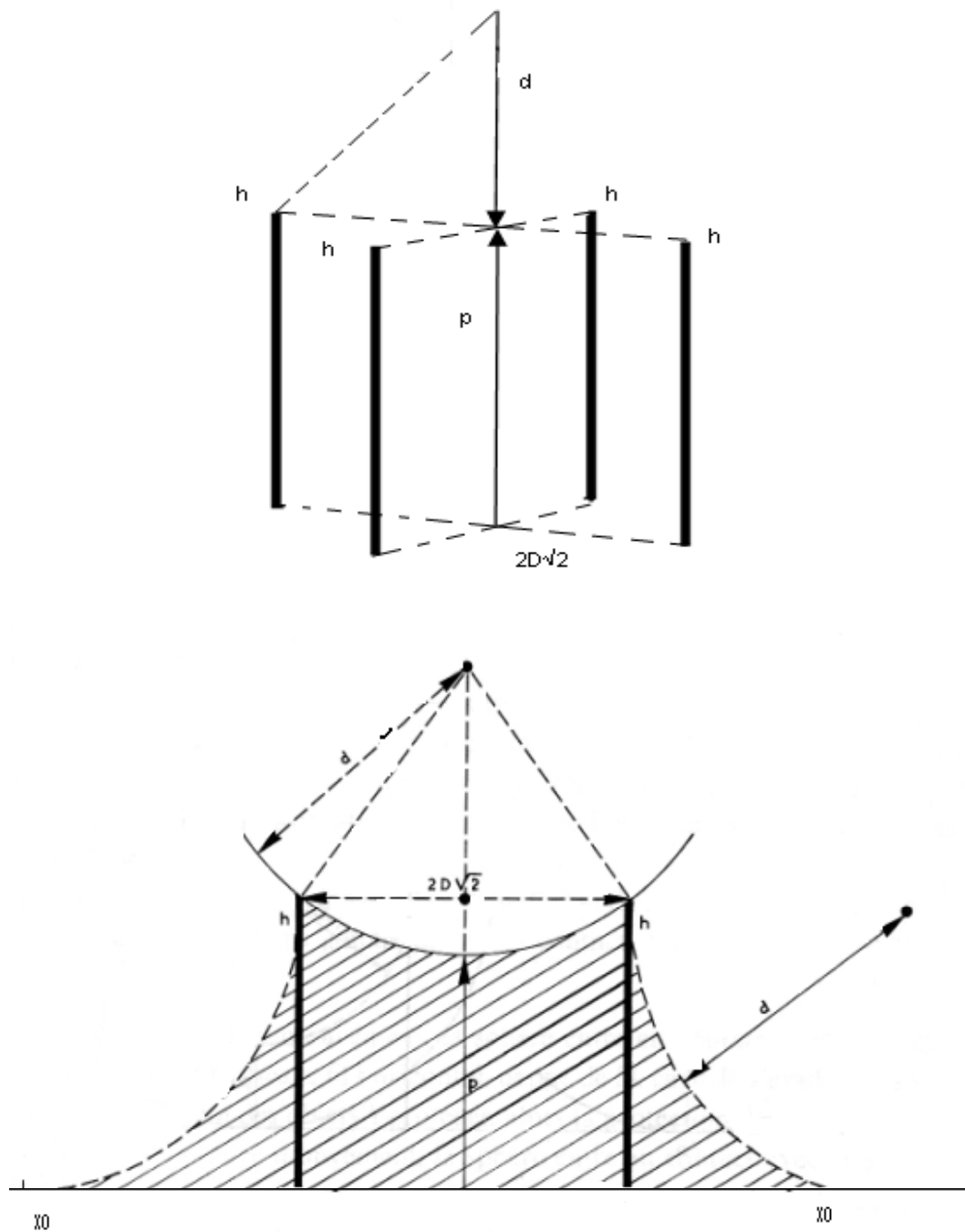


Figure (II-13) : Zone de protection de quatre tiges verticales.

d. Zone de protection d'un fil tendu horizontalement :

Lorsque la hauteur h du fil est telle que $d \geq h$, la construction géométrique est la même que celle de la figure (II-9). La seule différence réside dans le fait que la zone de protection a une symétrie axiale au lieu d'une symétrie de révolution.

Lorsqu'au contraire la hauteur est telle que $d < h$, l'action de la tige n'existe plus. Le rayon de protection au sol est toujours :

$$X_0 = \sqrt{2hd - h^2} \tag{II-10}$$

Mais ici, la hauteur maximale h_{max} que peut avoir un objet, pour qu'il soit protégé directement sous le fil, est réduite à :

$$P = 2d - h \tag{II-11}$$

La figure (II-14) illustre cette propriété.

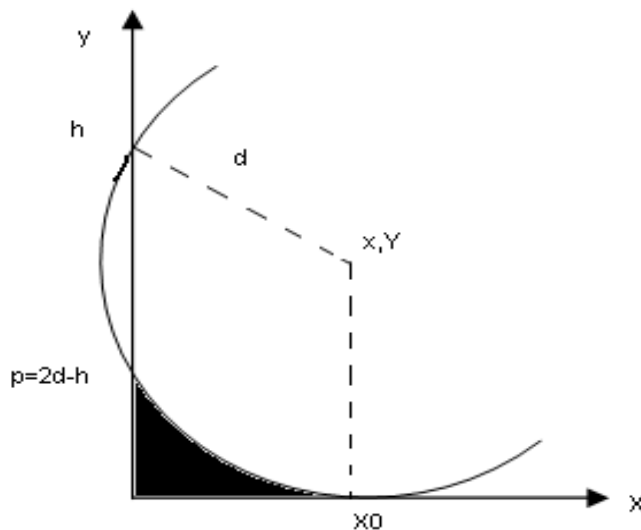


Figure (II-14) : Zone de protection d'un fil tendu horizontalement [3].

e. Zone de protection d'une nappe de fils horizontaux :

Si l'on se reporte à la figure (II-15-a), on voit qu'immédiatement qu'un objet placé sous une nappe de fils horizontaux distants l'un de l'autre de $2D$, sera correctement protégé si sa hauteur n'excède pas :

$$P = h - d + \sqrt{d^2 - D^2} \tag{II-12}$$

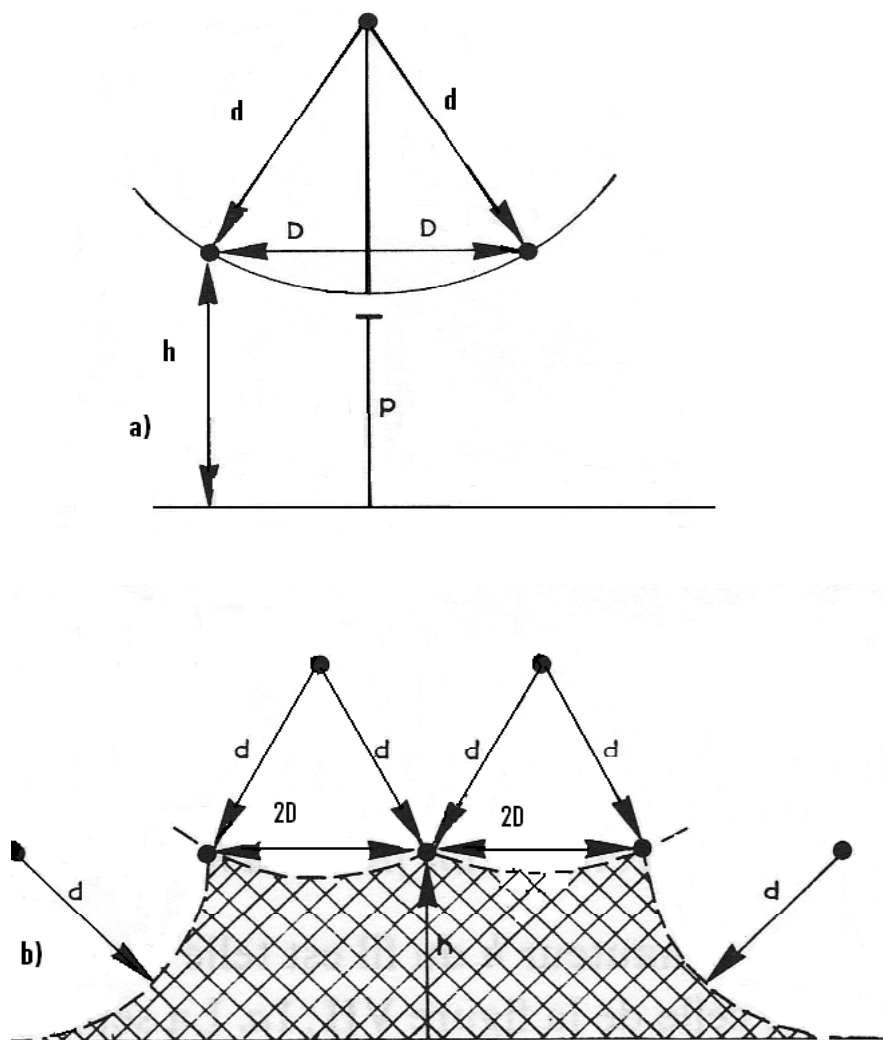


Figure (II-15) : Zone de protection d'une nappe de fils horizontaux.

- a) Principe de construction géométrique.
- b) Exemple d'application avec trois fils [3].

II-6 Conclusion :

On remarque que, quel que soit le dispositif de protection, la hauteur et la distance protégées au sol dépendent étroitement de la distance d'amorçage « d » et de la hauteur de l'objet au sol à protéger.

Lors de la réalisation d'une protection convenable, le paramètre « d » reste une inconnue dont le choix consiste à définir une distance dite critique « d_c » pour se protéger contre les courants de foudre.

Une protection est efficace pour des courants de foudre tels que la distance d'amorçage $d > d_c$, correspondant aux courants de forte intensité, mais la protection ne sera plus efficace pour les courants de foudre tels que $d < d_c$.

Chapitre III :
Sévérité orageuse
Et éléments de
Statistiques

III-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, est plus précisément mesurée par la densité de coup de foudre au sol.

III-2 Le niveau kéraunique (N_K) et la densité de coup de foudre (N_S) :

Le niveau kéraunique d'un lieu représente le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu. Cela ne fournit aucune indication sur la densité de foudroiement de ce lieu.

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 inférieur à 10 au niveau des régions côtières. Au niveau mondial, le niveau kéraunique est assez hétérogène : 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 notion de niveau kéraunique est trop peu adaptée pour donner une mesure utilisable de la sévérité orageuse. Les mesures de détection actuelles donnent une information plus intéressante : la densité de coup de foudre au sol. Elle est exprimée en nombre de coup par kilomètre carré et par an.

Des relations empiriques plus ou moins complexes ont été établies entre la densité de foudroiement au sol N_S et le niveau kéraunique N_K suivant les caractéristiques météorologiques locales [11].

$$N_S = aN_K^b \quad (\text{III-1})$$

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 [km²].

N_K : Le niveau kéraunique.

Pour la France, il est admet que :

$$N_s = 0,04 \cdot N_k^{1,25} \quad (\text{III-2})$$

Pour un niveau kéraunique moyen de 20, on obtiendrait avec cette formule une densité de foudroiement d'environ 1,7 coups de foudre par an et par kilomètre carré. Cette densité de foudroiement 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 du sud ou le Mexique. Malheureusement, cette valeur de la densité peut varier d'une région à l'autre, influencée par des facteurs locaux topologiques ou géologiques [11].

III-3 Facteur locaux influençant le foudroiement :

La densité de coup de foudre au sol n'est elle-même 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 » [3].

Parmi les facteurs influençant le foudroiement, on peut citer :

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

III-3-1 Facteurs topologique :

Canalisés par des vallées ou des fleuves, les mouvement d'air entraînent les nuages orageux, favorisent l'existence de couloirs orageux. En montagne, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets [3].

III-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 haute-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 [12].

III-3-3 La concentration ionique de l'air :

Elle a 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 trajet de la décharge [12].

III-4 Fréquence de foudroiement :

La fréquence de foudroiement d'un objet ou une construction quelconque est donnée par la relation [13] :

$$n = N_s \cdot S \quad \text{(III-3)}$$

Avec :

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

N_s : Densité de coups 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 [13] :

$$n = 2,4 \cdot 10^{-5} N_s (h_0)^{2,05} \quad \text{(III-4)}$$

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

Avec: $n(\text{an}^{-1})$; $N_s(\text{Km}^{-2} \cdot \text{an}^{-1})$; $h_0(\text{m})$.

Pour les structures vastes dont les dimensions horizontales sont grandes devant la hauteur, la fréquence de foudroiement est donnée par la formule de Drechsler [13] :

$$n = 10^{-6} N_s (l + 7h_0)(L + 3,5h_0) \quad \text{(III-5)}$$

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 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 ascendants.

III -5 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 [13] :

$$N_e = N_s \cdot S \cdot P \quad \text{(III-6)}$$

N_g : Nombre annuel de contournements dus aux coups de foudre.

N_s : Densité annuelle de coups de foudre ($\text{km}^2 \text{an}^{-1}$).

S : Surface d'attraction (km^2).

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

III-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 N_1 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 à la figure (III-1). Pour des niveaux kérauniques différents, on appliquera une simple règle de proportionnalité [4].

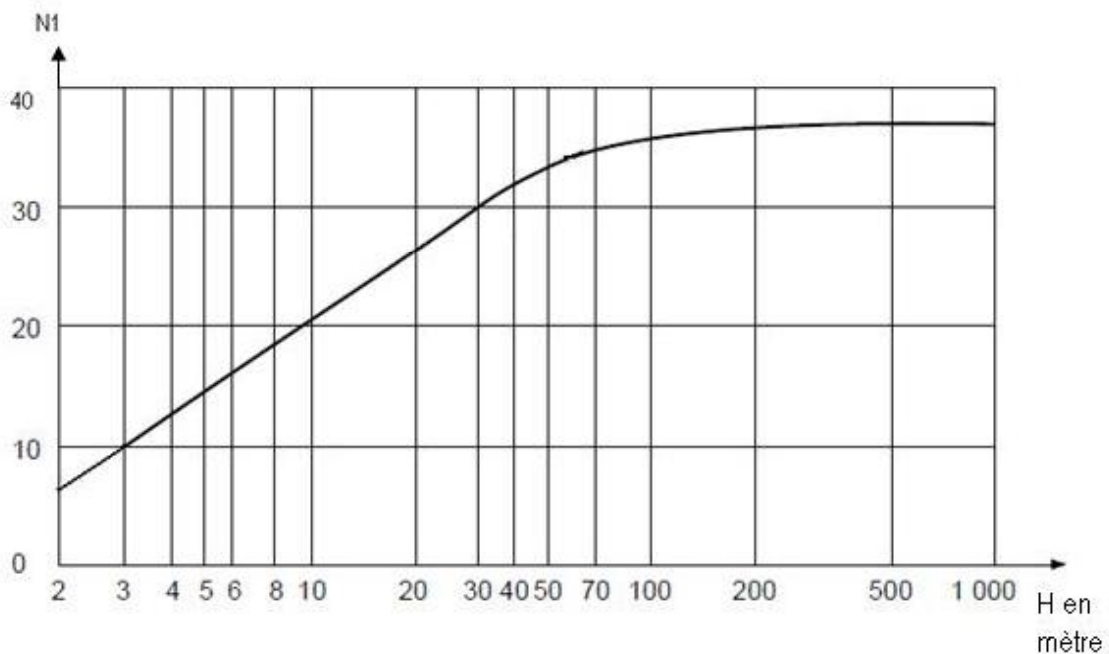


Figure (III-1) : Nombre de coups de foudre N_1 touchant annuellement un conducteur horizontal de 100 km situé à une hauteur H au-dessus du sol [4].

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 portées dans le tableau ci-dessous [4].

Nature de la ligne Nature Du terrain	Avec câble de garde	Sans câble de garde
Plat	$H = 1,1 \times (H_p - \frac{2}{3} S_g)$	$H = 1,1 \times (Y_p - \frac{2}{3} S_c)$
Vallonné	$H = H_p$	$H = Y_p$
Montagneux	$H = 2H_p$	$H = 2Y_p$

Tableau (III-1) : hauteur des conducteurs d'une ligne à prendre en compte pour le calcul de leur foudroiement [4].

Avec :

S_g et S_c : Flèche des câbles de garde ou des conducteurs.

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 [4].

La fréquence de foudroiement n sera alors donnée par :

$$n = N_{fl} \cdot L \left(\frac{N_1}{2.5} + \frac{l}{70} \right) \quad \text{(III-7)}$$

Où :

L : La longueur de la ligne (en 100 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 :

$$n = \frac{N_1}{4} \cdot H^{0,53} \cdot L \quad \text{(III-8)}$$

III -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 [13] :

$$T_c = 1/n_c \quad \text{(III-9)} \text{ définie comme étant l'intervalle de temps qui}$$

sépare deux contournements successifs des distances d'isolement.

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

$$n_c = n_{CDF} + n_{CDT} + n_{CEM} + n_{CES} \quad \text{(III-10)}$$

Où :

n_{CDF} : 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 foudre engendrant des ondes électromagnétiques.

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

Pour les structures à très haute tension, la fiabilité d'un système de protection est caractérisée essentiellement par la composante n_{CDDP} , les autres sont négligeables d'où [13] :

$$F = 1/n_{CDDP}$$

Avec :

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

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 les poteaux de la structure, on réduit les valeurs des hauteurs trouvées et on détermine la nouvelle intensité de courant (i'_{cr}) de foudre [13].

L'expression de ce courant est selon Drechsler [13]:

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

Avec:

$$h_e = h_{ep} + f_{20} - r - 0,5(4r^2 - d^2)^{1/2} \quad \text{(III-11)}$$

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_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.

$$r' = 28 \cdot i_{cr}'^{1/2} \quad \text{(III-12)}$$

L'expression donnant le nombre de contournements devient :

$$n_c = N_s \cdot S \cdot P(i_{cr}') \quad \text{(III-13)}$$

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 :

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

- 3) $i_{cr} \leq i_f \leq i'$ tous les coups de foudre dont i_f est compris entre i_{cr} et i' entraînent des défauts d'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} et protège contre les coups de foudre dont l’intensité de courant i_f est supérieure à i' sera [13] :

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

III-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 décharges 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 μs suivi d’une queue de décroissance de quelques dizaines de μs [6].

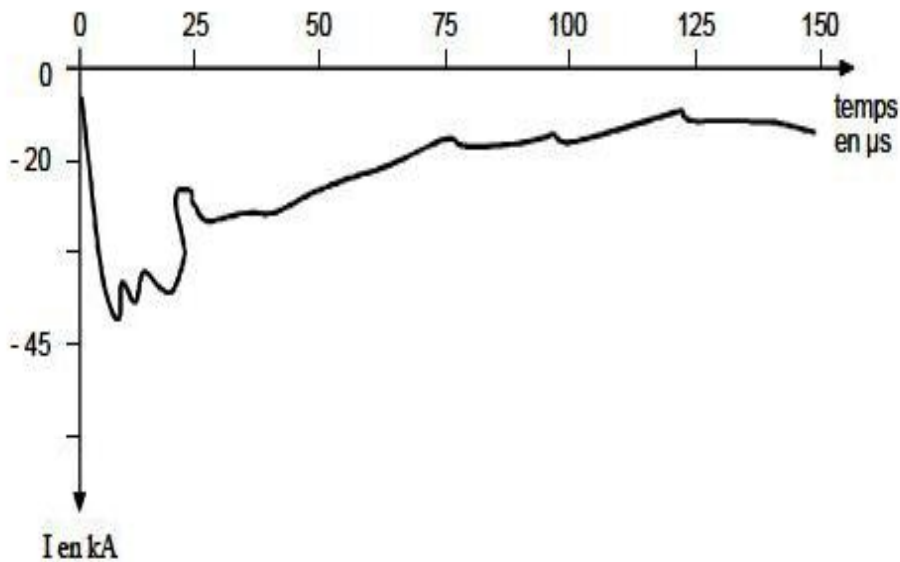


Figure (III-2) : Oscillogramme d’un courant de foudre [6].

L’amplitude du 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 courant 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 100 kA est de 5%. Ce qui signifie que 95% des coups de foudre ont une amplitude inférieure à 100 kA [6].

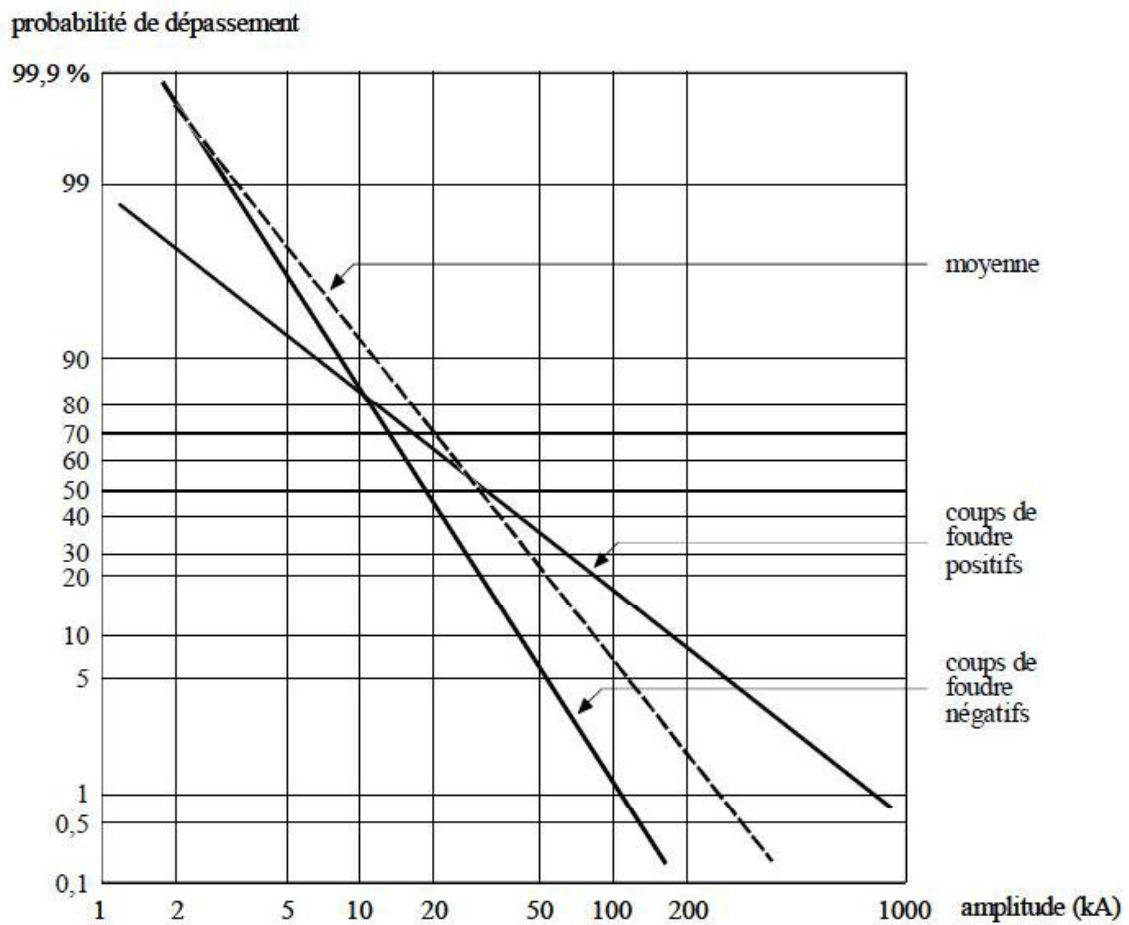


Figure (III-3) : Probabilité de dépassement des amplitudes des coups de foudre [6].

III-9 Les caractéristiques d'un coup de foudre :

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

Probabilité de dépassement (%)	Valeur crête du courant (kA)	Charge (C)	Pente (kA/ μ s)	Durée Totale (s)	Nombre de décharges
50	26	14	48	0,09	2
10	73	70	74	0,56	5
1	180	330	97	2,7	12

Tableau (III-2) : principales caractéristiques d'un coup de foudre [3].

III-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 IV :

*Protection du poste
d'interconnexion et de
transformation
d'OUED AISSI*

IV-1 Introduction :

Le poste se compose d'un certain nombre d'éléments appelés cellules ou travées, groupés en fonction d'un schéma déterminé (schéma unifilaire).

Leur installation doit répondre à un certain nombre de conditions qui réagissent sur la tenue et la fiabilité, son exploitation, ses possibilités, d'entretien et son coût.

IV-2 Description du poste d'interconnexion et de transformation THT d'OUED AISSI (220/60/30kV) :**IV-2-1 Alimentation :**

IL est alimenté par le poste d'interconnexion et de transformation SI-MUSTAPHA (400/220/60/30kV), par une ligne 220kV. Pour une longueur de 55,38 km en conducteur Almélec de section $S = 570\text{mm}^2$; de réactance $X = 0,4 \Omega$ [2].

IV-2-2 Composition du poste 220 kV :

- 02 jeux de barres.
- 03 travées transformateurs 220/60/11 kV.
- 02 travées lignes.

IV-2-3 Consistance des travées 220 kV :**IV-2-3-1 Travée départ ligne 220 kV :**

- 02 sectionneurs de barres à commande électrique à distance et en local.
- 01 disjoncteur.
- 01 sectionneur de ligne avec mise à la terre, à commande manuelle avec interverrouillage mécanique.
- 03 transformateurs de courant à deux enroulements.
- 03 transformateurs de tension.

-03 circuits bouchons à fréquence réglable.

IV-2-3-2 Travée transformateur 220 /60 /11 kV :

-02 sectionneurs d'isolement de barres 220 kV.

-01 disjoncteur.

-03 parafoudres.

-01 sectionneur d'isolement de barres de 60 kV.

-01 sectionneur de neutre 220 kV à commande manuelle.

-01 sectionneur de neutre 60 kV à commande manuelle.

IV-2-4 Composition du poste 60 kV :

-02 jeux de barres.

-03 travées départ lignes 60 kV.

-03 travées arrivées lignes 60 kV.

-02 travées transformateurs 60/30 kV.

-01 travée couplage.

IV-2-5 Consistance des travées 60 kV :**IV-2-5-1 Travée départ ligne 60 kV :**

-02 sectionneurs de barres.

-01 disjoncteur.

-01 sectionneur de ligne avec mise à la terre.

-03 transformateurs de courant.

-03 transformateurs de tension.

-01 circuit bouchon.

IV-2-5-2 Travée transformateur 60/30 kV :

-02 sectionneurs de barres.

-01 disjoncteur.

-02 transformateurs de puissance.

-01 sectionneur tripolaire d'isolement.

- 02 sectionneurs neutres.

IV-2-6 Composition du poste 30 kV :

- 02 demi-jeux de barres.

-02 cellules arrivées.

-08 cellules départs.

-02 résistances de mise à la terre (résistance d'écoulement).

-01 sectionneur de couplage.

IV-2-7 Transformateurs des services auxiliaires (TSA) :

Les deux transformateurs TSA1 et TSA2 sont raccordés aux bornes de 11 kV des transformateurs 220/60/11 kV [2].

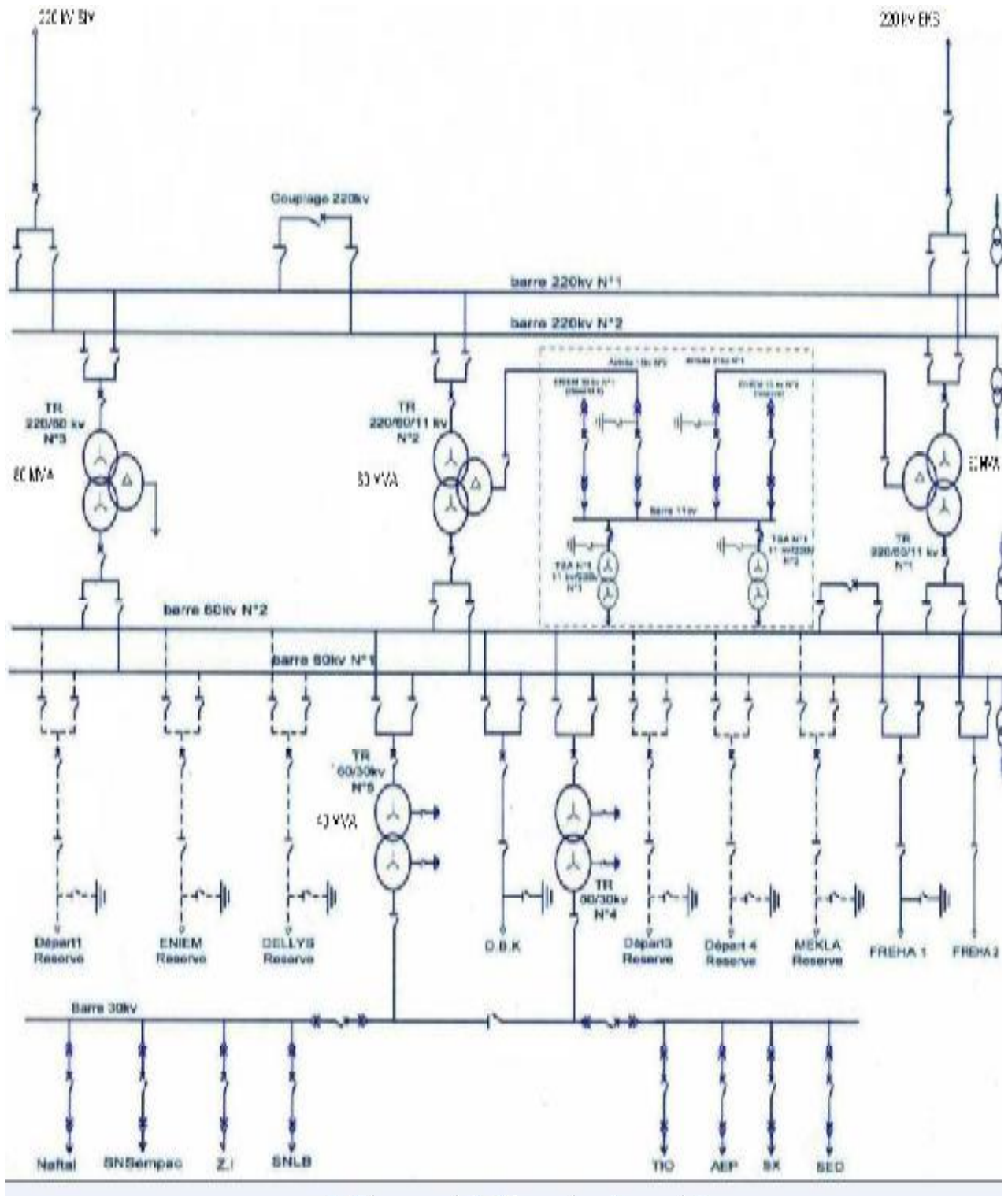


Figure (IV-1) : Schéma unifilaire du poste THT d'OUED AISSI (220/60/30 kV) [2].

IV-3 Détermination du courant critique :

Nous avons vu que la foudre génère une onde de tension dont la valeur est donnée par la relation [3] :

$$U(t) = \frac{Z}{2} \cdot i(t) \quad (\text{IV-1})$$

Z : Impédance d'onde du conducteur.

Le courant critique est donné par :

$$I_c = \frac{2U_f}{Z} \quad (\text{IV-2})$$

Sa détermination nécessite donc la connaissance de U_f et Z .

IV-4 Tension d'isolement au choc de la ligne U_F :

En polarité négative :

$$U_F^- = 580 d \quad (\text{IV-3})$$

En polarité positive :

$$U_F^+ = 530 d \quad (\text{IV-4})$$

U_F : En kV si d est donnée en mètres.

d : La distance d'isolement dans l'air entre conducteur de phase et masse du pylône.

Bien que la plupart des surtensions consécutives aux coups directs soient négatives, on utilisera de préférence la deuxième expression, ce qui donne l'avantage d'une marge de sécurité plus grande. C'est également celle que l'on appliquera au calcul simplifié du risque d'amorçage en retour [3].

Pour le poste THT d'OUED AISSI on a [2] :

$d = 3\text{m}$.

D'où :

$$U_f^+ = 530 \cdot 3 = 1590 \text{ kV.}$$

IV-5 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] :

$$Z = 60 \ln \frac{2H}{r} (\Omega) \quad (\text{IV-5})$$

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. Une manière approchée de considérer le problème consiste à supposer que l'effet de couronne entoure le conducteur d'une gaine conductrice cylindrique, et que le rayon de cette gaine va croître jusqu'à ce que le champ superficiel devienne juste inférieur au champ critique d'ionisation $E_c = 30 \text{ kV/cm}$. Le conducteur aura donc un rayon apparent r_c plus grand que son rayon géométrique, et par conséquent aussi une capacité linéique C_c plus grande que sa capacité linéique géométrique [3].

Le processus sera gouverné les équations suivantes :

- a) Relation entre rayon critique r_c et tension d'isolation de la ligne est donnée par la relation suivante:

$$U_f^+ = E_c r_c \ln \frac{2H}{r_c} \quad (\text{IV-6})$$

- b) Expression de l'impédance d'onde modifiée sera:

$$Z_c = 60 \sqrt{\ln \frac{2H}{r} \ln \frac{2H}{r_c}} \quad (\text{IV-7})$$

- d) Courant critique est donnée par l'expression suivante:

$$I_c = \frac{2U_f^+}{Z_c} \quad (\text{IV-8})$$

Plusieurs travaux, montrent que le phénomène couronne a une influence sensible sur le courant critique pour les lignes de tension égale ou inférieure à 225kV, à conducteur de phase unique. Dès que les lignes sont équipées de faisceaux, la modification d'impédance d'onde peut être négligée [3].

La règle sera donc la suivante :

-Pour les lignes à conducteur unique, de tension égale ou inférieure à 225 kV, on posera $r_c = 0,06$ m, quel que soit $r < r_c$.

- Pour les lignes à conducteurs en faisceau, on calculera Z par la formule classique, avec :

$$r = R \sqrt[n]{\frac{n\rho}{R}} \quad (\text{IV-9})$$

Où :

r : Le rayon équivalent.

ρ : Le rayon d'un sous conducteur.

R : Le rayon géométrique du faisceau.

On déduit ensuite la distance d'amorçage critique [3] :

$$d_c = 9,1 I_c^{2/3} \quad (\text{IV-10})$$

IV-6 Evaluation du courant critique du poste THT d'OUED AISSI :

Pour le poste THT d'OUED AISSI, les conducteurs de phase sont en faisceaux de section [2]:

$$S = 570 \text{ mm}^2$$

Le rayon géométrique correspondant est :

$$R = \left[\frac{s}{\pi} \right]^{1/2} = \left[\frac{570}{\pi} \right]^{1/2} = 13,47 \text{ mm}$$

Nous avons pour le poste THT d'OUED AISSI [2] :

-Rayon d'un sous conducteur

$$\rho = 1,725 \text{ mm}$$

-Nombre de sous conducteurs :

$$n = 61$$

D'où le rayon équivalent:

$$r = R \cdot \left[n \cdot \frac{\rho}{R} \right]^{1/n}$$

$$r = 13,47 \cdot \left[61 \cdot \frac{1,725}{13,47} \right]^{1/61} = 13,93 \text{ mm}$$

Donc, on calculera Z par la formule classique :

$$Z = 60 \ln \frac{2H}{r}$$

Avec : $H = 15 \text{ m}$ [14]

$$Z = 60 \ln \frac{2 \cdot 15}{0,01393} = 460,49 \Omega$$

Finalement, on aura :

$$I_{cr} = \frac{2U_f^+}{Z} = \frac{2 \cdot 1590}{460,49} = 6,90 \text{ kA}$$

IV-7 Evaluation du niveau kéraunique :

D’après les données de l’Office National de la Météorologie (ONM), on a le tableau suivant :

Année Mois	Année									
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Janvier	0	4	1	6	1	1	1	0	0	5
Février	0	5	2	2	0	2	2	1	0	2
Mars	0	1	0	0	0	2	2	11	4	2
Avril	3	2	3	2	4	2	1	6	1	3
Mai	5	1	1	1	4	0	1	1	2	1
Juin	1	0	1	0	1	2	3	2	3	0
Juillet	0	0	0	3	0	2	2	3	3	3
Aout	0	0	6	4	4	1	0	0	1	5
Septembre	0	5	1	6	2	1	2	10	1	6
Octobre	1	2	1	6	0	1	2	3	7	1
Novembre	1	1	3	2	2	3	0	0	3	6
Décembre	4	0	4	6	3	4	2	1	0	2
Nombre de jours orageux	15	21	23	38	21	21	18	38	25	36

Tableau (IV-1) : Nombre de journées orageuses de 2000 à 2009.

Donc le niveau kéraunique est de : $N_k = 25,6$

$$N_s = 0,04 \cdot N_k^{1,25}$$

$$N_s = 2,3 C \cdot F / Km^2 . an$$

IV-8 Application du modèle électro-géométrique :

IV-8-1 Tiges verticales :

On calcule de rayon de la sphère fictive selon la formule de Whitehead :

$$d_c = 2 \cdot I_{cr} + 30 \left[1 - \exp\left(-\frac{I_{cr}}{6,8}\right) \right] \quad (IV-11)$$

Nous trouvons :

$$d_c = 32,925 \text{ m}$$

IV-8-1-1 Première variante : tiges distantes de 15 m :

IV-8-1 -1-1 Calcul des hauteurs des tiges :

a. Etude de la partie BC (120x47 m) :

-Protection de la partie délimitée par les poteaux (2) et (3) de dimension 47 x 15 m. Dans cette partie la hauteur à protéger est de $p = 17,16 \text{ m}$ en tenant compte de la flèche $f = 1,091 \text{ m}$ [2].

Calcul de la hauteur de la tige :

$$h = p + d_c - \left[d_c^2 - \frac{(X^2 + Y^2)}{4} \right]^{1/2} \quad (IV-12)$$

Valable pour un rectangle de dimension : $X = 47 \text{ m}$; $Y = 15 \text{ m}$.

Nous trouvons $h_{t\grave{e}ge} = 10,28 \text{ m}$ qui sera placée sur la structure de hauteur de 18 m du sol. Nous voyons que $h_{t\grave{e}ge} > 10 \text{ m}$, cette hauteur dépasse la condition de limitation de fixation des tiges.

Pour cela nous limiterons la hauteur de la tige à 10 m. La relation (IV-12) permet de nous donner le nouveau rayon d_c de la sphère fictive. Ce rayon est $d_c = 33,48 \text{ m}$.

En utilisant la formule de Whitehead, nous trouvons le nouveau courant critique $I_{cr} = 7,9 \text{ kA}$.

Finalement donc nous placerons sur les poteaux (2) et (3) des rangées (B) et (C) des tiges de hauteur **10 m**.

-Pour les quatre parties comprises entre les poteaux (4) - (5) - (6) - (7) - (8) toutes de dimensions **15x47 m** et de hauteur à protéger $p = 14,52 \text{ m}$ avec $f = 0,99 \text{ m}$ [2], leurs protection sera assurée en plaçant des tiges de hauteur $h_{t\grave{a}ge} = 7,64 \text{ m}$ sur les poteaux (4) - (5) - (6) - (7) - (8) de la rangée (B) et (C) trouvée avec la formule (IV-12)

-Il nous reste à déterminer la hauteur de la tige à mettre sur le poteau (1). Avec $p = 14,52 \text{ m}$. Pour cette partie on doit utiliser la méthode de la tige fictive.

Calcul de la distance à la tige fictive Z :

$$Z = 2|\Delta h (2d_c - \Delta h)|^{1/2}$$

Où $\Delta h = h_{t\grave{a}ge} - p$ où $h = 10 + 18 = 28 \text{ m}$ et $p = 14,52 \text{ m}$

D'où $Z = 53,7 \text{ m}$

Nous trouvons h selon la formule :

$$h = p + d_{cr} - [d_{cr}^2 - ((X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} - Z/2)^2]^{1/2}$$

$h = 23,19 \text{ m}$ donc $h_{t\grave{a}ge} = 5,19 \text{ m}$.

b. Etude de la partie DC (21,5 x 60 m):

-Protection de la partie comprise entre les poteaux (2) et (3) où $p = 17,62 \text{ m}$ en tenant compte de la flèche $f = 0,57 \text{ m}$ [2].

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

On trouve $Z = 48,47 \text{ m}$ et $h = 17,98 \text{ m}$ à partir du sol.

-Pour les poteaux (4) - (5) - (6) nous avons : $p = 15,5 \text{ m}$

D'où : $\Delta h = 12,5 \text{ m}$, nous trouvons $Z = 52,18 \text{ m}$, d'où $h = 15,64 \text{ m}$.

c. Etude de la partie AB de dimension (21x120 m)

Pour cette partie, nous avons : $p = 15,5 \text{ m}$ et $\Delta h = 15,5 \text{ m}$

D'où nous trouvons : $Z = 52,18 \text{ m}$ donc : $h = 15,5 \text{ m}$; hauteur des tiges à partir du sol pour les poteaux (1) - (2) - (3) - (4) - (5) - (6) - (7) - (8).

IV-8-1 -1-2 Calcul du risque de contournement d'isolation :

Probabilité de dépassement du courant $I_{cr} = 6,9 \text{ kA}$.

$$P(I_f > 6,9 \text{ kA}) = 93 \% \quad \text{figure (III-3)}$$

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

$$P_t(t_f < 1\mu\text{s}) = 10^{-2}$$

Probabilité de dépassement du courant $I'_{cr} = 7,9 \text{ kA}$

$$P(I_f > 7,9 \text{ kA}) = 91 \% \quad \text{figure (III-3)}$$

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

$$P = P(I_f < 6,9 \text{ kA}) \cdot P_t(t_f < 1\mu\text{s}) + P(I_f > 6,9 \text{ kA}) \cdot P(I_f < 7,9 \text{ kA})$$

$$P = 0,07 \cdot 10^{-2} + 0,93 \cdot 0,09 = 0,0844$$

Calcul du nombre de contournement d'isolation :

$$n = (120 + 3,5 \cdot h_1 + 3,5 \cdot h_2)(93,5 + 3,5 \cdot h_3) \cdot P \cdot N_S \cdot 10^{-6}$$

h_1 : Hauteur maximale sur la ligne du poteau (1)

h_2 : Hauteur maximale sur la ligne du poteau (8) ou (6)

h_3 : Hauteur maximale sur la ligne D

$$n = (120 + 3,5 \cdot 23,19 + 3,5 \cdot 25,38)(93,5 + 3,5 \cdot 17,98) \cdot P \cdot N_S \cdot 10^{-6}$$

$$n = 0,0088 \text{ contournement/an.}$$

D’où finalement nous aurons comme risque :

$$t = \frac{1}{n} = 113,55 \text{ ans, donc un contournement d’isolation tous les 113,55 ans.}$$

IV-8-1-1-3 Tableaux récapitulatifs donnant les hauteurs des tiges verticales:

Tableau (IV-2):

Première variante

Distance : 15 m

Les résultats sont les suivants

---i-----AB-----ht---

2	17,98
3	17,98
4	15,64
5	15,64
6	15,64

Tableau (IV-3):

Deuxième variante

Distance : 30 m

Les résultats sont les suivants

---i-----AB-----ht---

2	19,31
4	19,31
6	16,59

Les résultats sont les suivants

---i-----BC-----ht---

1	23,19
2	28,00
3	28,00
4	25,64
5	25,64
6	25,64
7	25,64
8	25,64

Les résultats sont les suivants

---i-----DC-----ht---

1	15,61
2	15,53
4	15,50
5	15,50
6	15,50
7	15,50
8	15,50

La nouvelle valeur de $I_{cr} = 7,9 \text{ kA}$

Pour cette variante nous aurons

un risque tous les 113,55 ans

Les résultats sont les suivants

---i-----BC-----ht---

1	23,14
2	28,00
3	28,00
4	25,36
5	25,36
6	25,36
7	25,36
8	25,36

Les résultats sont les suivants

---i-----DC-----ht---

1	15,58
2	15,32
4	15,32
6	15,78
8	15,78

La nouvelle valeur de $I_{cr} = 10,15 \text{ kA}$

Pour cette variante nous aurons

un risque tous les 66,44 ans

IV-8-2 Fils de garde :**IV-8-2-1 Etude de la protection par fils de garde existante :**

En appliquant le modèle électro-géométrique on aura :

Hauteur de fixation : $h = 18 \text{ m}$

Distance entre deux fils : $2D = 15\text{m}$ d'où $D = 7,5\text{m}$

Hauteur à protéger en tenant compte de la flèche : $p = 14,52 \text{ m}$

En utilisant la relation :

$p = h - d + \sqrt{d^2 - D^2}$, nous trouvons le rayon de la sphère fictive :

$d = 9,82 \text{ m}$

En utilisant la formule :

$d = 9,4 I^{2/3}$, nous trouverons comme courant critique :

$I_{cr} = 1,07 \text{ kA}$

IV-8-2-2 Etude de nouvelles variantes

Nous nous proposons de protéger le poste à l'aide des fils de gardes distants de 15 m et 30 m.

Le courant critique déjà évalué pour la protection du poste est de :

$I_{cr} = 6,9 \text{ kA}$ (IV-6)

Ce courant impose un rayon de la sphère fictive de $R = 32,925 \text{ m}$ (formule de Witehead).

Nous expliciterons la méthode de calcul pour la première variante de $2D = 15 \text{ m}$.
L'autre variante sera donner sous forme de tableau.

IV-8-2-2-1 Première variante :

Nous choisissons d'utiliser le courant critique $I_{cr} = 7,9 \text{ kA}$ déjà employé dans le calcul des hauteurs des tiges verticales (première variante).

Le rayon de la sphère fictive correspondant à ce courant est de $d_c = 33,48 \text{ m}$.

Calcul des hauteurs de fixation des fils.

a. Protection de la partie BC :

-Entre les poteaux (2) et (3) : $p = 17,16$; $2D = 15 \text{ m}$

La hauteur est donnée par la formule suivante :

$$p = h - d_c + (d_c^2 - D^2)^{1/2}$$

Nous trouvons : $h = 18,01 \text{ m}$, la hauteur de fixation des fils de garde est de

$$h_f = 19,1 \text{ m}.$$

- Entre les poteaux (4) - (5) - (6) - (7) - (8) : $p = 14,52$; $2D = 15 \text{ m}$

$$h_f = 16,36 \text{ m}.$$

- Entre les poteaux (2) et (1), il se présente une dénivellation : $p = 14,52 \text{ m}$.

Nous utiliserons la méthode de la tige fictive, nous trouvons :

$$h_f = 16,17 \text{ m}.$$

b. Protection de la partie DC :

- Entre les poteaux (2) et (3) : $p = 17,62 \text{ m}$, $2D = 15 \text{ m}$.

Nous trouvons comme précédemment:

$$h = 18,47 \text{ m}$$

$$h_f = 19,04 \text{ m}$$

- Entre les poteaux (4) - (5) - (6) : $p = 15,5 \text{ m}$, $2D = 15 \text{ m}$

$$h = 16,35 \text{ m}$$

$$h_f = 16,92 \text{ m}$$

c. Protection de la partie AB :

- Entre les poteaux (1) - (2) - (3) - (4) - (5) - (6) - (7) - (8) : $p = 15,5 \text{ m}$, $2D = 15 \text{ m}$.

$$h = 16,35 \text{ m}$$

$$h_f = 16,92 \text{ m}$$

IV-8-2-3 Calcul du risque de contournement d'isolation :

En utilisons la relation suivante :

$$n = (120 + 3,5 \cdot 16,17 + 3,5 \cdot 16,36)(93,5 + 3,5 \cdot 19,04) \cdot P \cdot N_s \cdot 10^{-6}$$

$$n = 0,00727 \text{ contournement/an.}$$

D'où finalement nous aurons comme risque :

$$t = \frac{1}{n} = 137,56 \text{ ans, donc un contournement d'isolation tous les 137,56 ans.}$$

IV- 8-2-4 Tableaux récapitulatifs donnant les hauteurs de fixations des câbles de garde:

Tableau (IV-4):

Première variante

Distance : 15 m

Les résultats sont les suivants

i	AB	hf
1		17,98
2		16,92
3		16,92
4		16,92
5		16,92
6		16,92
7		16,92
8		16,92

Les résultats sont les suivants

i	BC	hf
1		16,17
2		19,10
3		19,10
4		16,36
5		16,36
6		16,36
7		16,36
8		16,36

Tableau (IV-5):

Deuxième variante

Distance : 30 m

Les résultats sont les suivants

i	AB	hf
1		15,70
3		18,89
5		18,89
7		18,89

Les résultats sont les suivants

i	BC	hf
2		21,07
4		21,07
6		18,33
8		18,33

Les résultats sont les suivants

---i-----DC-----hf----	
2	19,04
3	19,04
4	16,92
5	16,92
6	16,92

La nouvelle valeur de $I_{cr} = 7,9 \text{ kA}$

Pour cette variante nous aurons

un risque tous les 137,56 ans

Les résultats sont les suivants

---i-----DC-----hf----	
2	21,01
4	21,01
6	18,89

La nouvelle valeur de $I_{cr} = 10,15 \text{ kA}$

Pour cette variante nous aurons

un risque tous les 80,60 ans

IV-9 Conclusion :

La protection par fils de garde déjà existante au poste d'OUED AISSI et que nous avons vérifié (première variante) est dimensionnée pour le courant de foudre le plus petit possible, d'où une protection absolue de celui-ci.

L'étude menée dans ce chapitre, montre que l'augmentation de la distance entre tiges verticale et entre fils de garde entraîne l'augmentation du risque de contournement d'isolation.

Conclusion Générale

Notre objectif principal est l'étude de la protection contre les coups de foudre d'un grand poste d'interconnexion et de transformation (220/60/30kV) d'OUED AISSI, qui consiste à déterminer les paramètres caractéristiques des dispositifs de protection.

Le projet fait aussi l'objet de l'étude de la foudre qui est caractérisé par un phénomène non conforme au fonctionnement normal des appareils électroniques.

La protection du poste par paratonnerres verticaux ou horizontaux a été conçue sur la base du modèle électro-géométrique en exploitant les structures existantes.

L'étude technique, montre que la protection par fils de garde est plus avantageuse que celle réalisée par tiges verticale, vu l'inconvénient que présente cette dernière.

Cette étude nous a permis d'une part d'acquérir de nouvelles connaissances concernant les systèmes de protection des grands postes et d'autre part à nous familiariser avec le monde du travail.

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

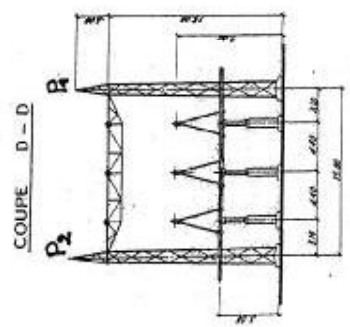
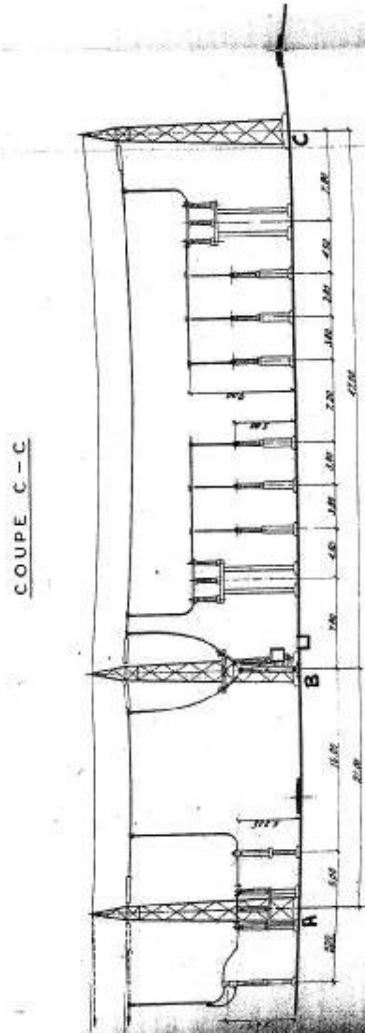
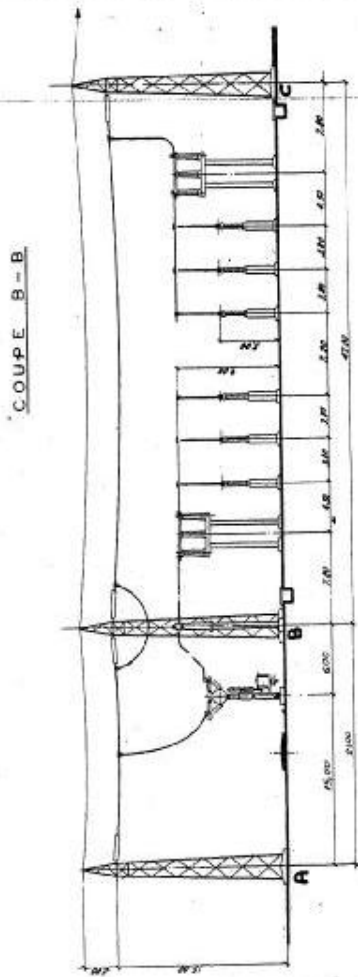
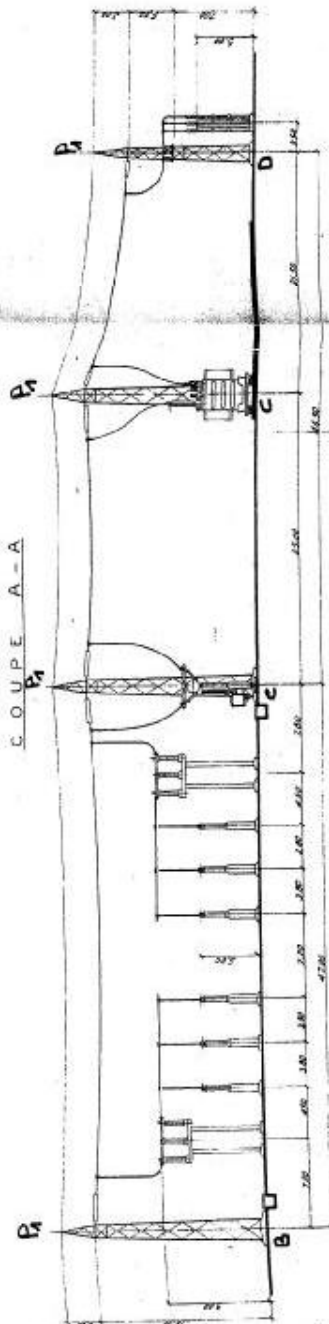
BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : J Favraud : « Fonctionnement et protection des réseaux de distribution » E.D.F, 1996
- [2] : Documents SONELGAZ (THT D'OUED AISSI).
- [3] : Georges Le Roy, Claude Gary, Bernard Hutzler, Jacques Lalot, Christian Dubanton : « Les propriétés diélectrique de l'aire et les très hautes tensions », éditions Eyrolles 1984.
- [4] : Claude GARY : « La technique des hautes tensions choix et coordination des isolements ».
- [5] : INERIS « Le risque foudre et les installations classées pour la protection de l'environnement », direction des risques accidentels septembre 2001.
- [6] : Schneider Electric : « Guide de conception des réseaux électriques industriels », T&D 6883427/A.
- [7] : C.Gary « foudre et protection des bâtiments technique de l'ingénieur D3 II, 33707.
- [8] : Alain Rousseau et Isabel Hennebique ; « Technique de l'ingénieur, traite génie électrique (parafoudre). », édition copyright 1989.
- [9] : Documentation HELITA, novembre 2006.
- [10] : Schneider Electric : « La protection des récepteurs contre les surtension d'origine atmosphérique », n°sa 32VP133F.
- [11] : 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. Année 2004.
- [12] : R .Belaicha : « contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans le cas des terres mauvaises conductrices », thèse de magister, université de Tizi Ouzou. Année 1994.
- [13] : C.Gary, A.Baillot, H.Gigot: « Lignes et postes choix de coordination d'isolement », Technique de l'ingénieur D4 II, 670.

PLAN DE REFERENCE:

VUE EN PLAN
 LOGE TIRAFUSOL
 N° 7665.0.0 - 44007
 N° 7685.0.0 - 44005



C	CONTRACTANT / CONCESSIONNAIRE	02-20-377
D	STATUT / REGIME	SA - SA
E	PROJET / OBJET	SA - SA
F	DATE	21.08.2007
G	REVISION	01
H	PROJETANT	SA - SA
I	DATE	21.08.2007
J	REVISION	01

SONELGAZ
 DIRECTION DE L'EQUIPEMENT ELECTRIQUE
 DEPARTEMENT "LIGNES ET POSTES" - SERVICE "POSTES"
 2, Boulevard SALAH BOUMEDJENEUR ALGERIA, ALGERIA 16000

ENTREPRISE: **SATELIT**
 SOCIETE GENERALE PROVISIONNAIRE & INSTALLATION

OBJET: **POSTE 225 KV "TIZI OUZOU"**
 EQUIPEMENT ELECTRIQUE
 IMPLANTATION GENERAL - COUPES

N° de plan: 02-20-377
 Date: 21.08.2007
 Révision: 01
 N° de plan: 02-20-377
 Date: 21.08.2007
 Révision: 01

PROJETANT: SA - SA
 CONCESSIONNAIRE: SA - SA
 N° de plan: 02-20-377
 Date: 21.08.2007
 Révision: 01

Résumé :

Le travail que nous avons effectué a été consacré à l'étude d'une protection d'un grand poste d'interconnexion et de transformation 220/60/30 kV d'Oued Aissi contre les surtensions atmosphériques.

En premier temps nous avons fait une courte synthèse sur le phénomène de la foudre, puis nous avons exposé et étudié les différents moyens de protection pour cela nous avons bien défini le modèle électro-géométrique qui permet de déterminer les points d'impacts les plus probables de la foudre et la méthode de la sphère fictive qui permet la détermination de la zone de protection, ensuite nous avons défini la notion de fréquence de foudroiement et autres statistiques relatives à la foudre. Finalement nous avons vérifié la protection par fils de garde existants au poste.