

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**Protection contre la Foudre
du Laboratoire
à Haute Tension de l'ENP**

Proposé par :

A. BOÛBAKEUR

Etudié par :

HADDAD Abderrahmane

TERKI Nacer

Dirigé par :

M^{me} FERRAS

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIE

PROMOTION : Janvier 1985

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

**Protection contre la Foudre
du Laboratoire
à Haute Tension de l'E N P**

Proposé par :

A. BOUBAKEUR

Etudié par :

HADDAD Abderrahmane

TERKI Nacer

Dirigé par :

M^{me} FERRAS

PROMOTION : Janvier 1985

Remerciements

Nous profitons de cette importante occasion pour adresser nos remerciements à Madame Ferras et monsieur A. Boubakous, qui n'ont cessé de nous aider et prodiguer de précieux conseils durant le déroulement de ce travail; ainsi qu'à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Nous tenons à remercier également messieurs SITOUAH, ACHA et YEKKOUR de KAHRAKIB et M^{re} BOULFIZA de l'INAPI pour leur apport bibliographique qui nous a été d'une grande utilité.

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre 1: Phénomène de décharge de foudre

- 1.1 - Généralités
- 1.2 - Les phénomènes précurseurs
- 1.3 - Le point d'impact du coup de foudre
- 1.4 - Physique de la décharge
- 1.5 - Mécanisme de la décharge
- 1.6 - Classification des coups de foudre
- 1.7 - Paramètres électriques de la foudre
- 1.8 - Effets d'un coup de foudre.

Chapitre 2: Protection contre la foudre

- 2.1 - Généralités
- 2.2 - Distribution et sévérité orageuse
- 2.3 - Paratonnerre
- 2.4 - Mécanisme d'impact et modèle électro géométrique
- 2.5 - Principe de fonctionnement d'un paratonnerre
- 2.6 - Analyse des composants d'un paratonnerre.

Chapitre 3: Protection du laboratoire à haute tension de l'E.N.P.A.

- 3.1 - Configuration du bâtiment
- 3.2 - Protection à tiges.
- 3.3 - Protection à cage
- 3.4 - Choix de la protection à adopter

Introduction

Phénomène naturel, spectaculaire et redoutable, la foudre avec son cortège de manifestations lumineuses et sonores a excité de tout temps la curiosité et l'imagination de l'homme.

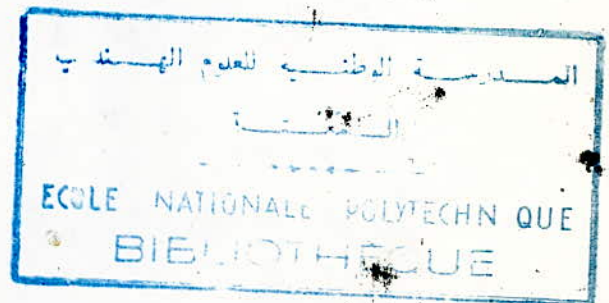
Il y a, à peine un siècle, elle faisait peur autant parce que son atteinte est toujours fatale que par le mystère qui l'entourait. Elle ne pardonne pas plus aujourd'hui, néanmoins on sait dans quelles circonstances et pour quelles raisons, elle constitue un danger sérieux.

Observations, mesures, expériences et calculs se sont succédés pour arriver à comprendre le mécanisme complexe de l'éclair. Bien qu'on ne puisse se flatter de l'avoir entièrement compris sous tous ses aspects.

C'est alors que des systèmes de protections ont vu le jour, pour atténuer les méfaits que provoque souvent chaque coup de foudre. Ainsi, se répandent les câbles de gardes et les parafoudres pour la protection des lignes de transport d'énergie électrique et les postes d'interconnexion et les paratonnerres pour protéger les bâtiments où la foudre pourrait provoquer des dégâts importants.

Dans ce projet, nous allons présenter la description

du phénomène, la protection par paratonnerres, puis
comme application, une étude pour protéger le
batiment abritant le laboratoire à haute tension
de l'école nationale polytechnique (E.N.P.).



Chapitre 1: Phénomène de décharge de foudre

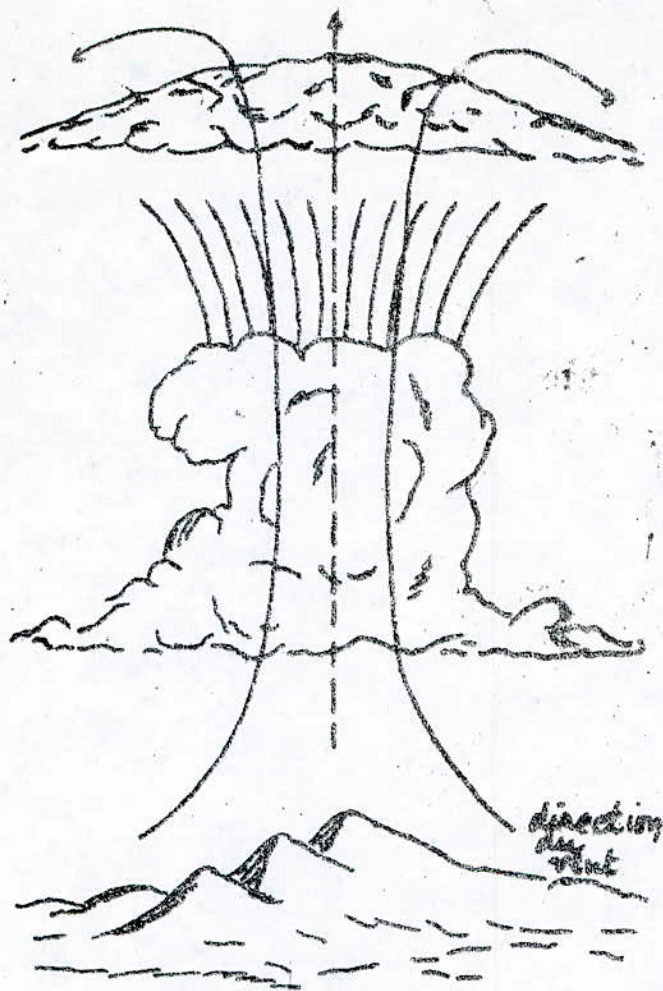
1.1 - Généralités :

Phénomène à caractère électrique, la foudre a fait l'objet de recherche dans plusieurs laboratoires et stations expérimentales conçues à cet effet. C'est alors que s'est dégagé l'explication des conditions qui l'engendrent, les étapes de son développement, les grandeurs de ses différents types et les dangers de son atteinte.

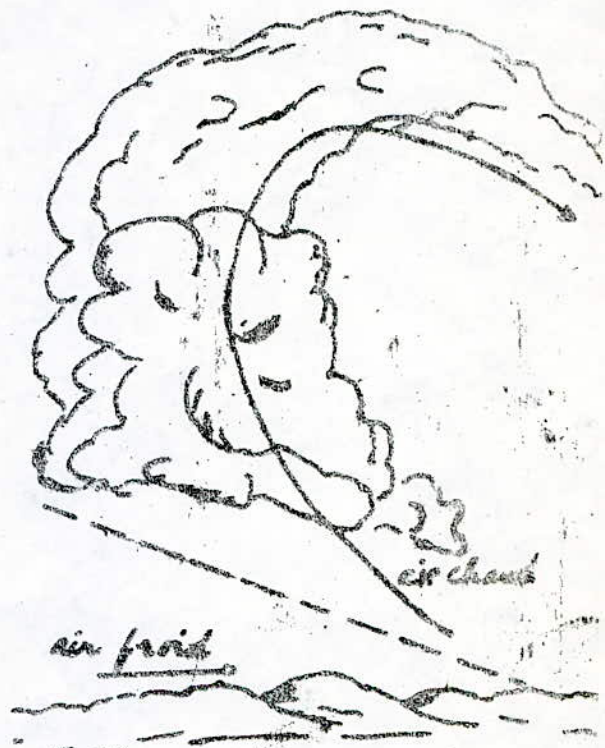
1.2 - Les Phénomènes précurseurs :

Par temps clair et d'une façon générale, en l'absence de systèmes orageux, le sol terrestre est chargé négativement alors que les parties supérieures de l'atmosphère sont chargées positivement [1,2]. Il existe alors un champ électrique vertical dirigé vers le bas. Au voisinage d'un sol plat, celui-ci est de 100 V/m environ [1,2].

L'air devient faiblement conducteur par la présence d'ions (radiations diverses traversant l'atmosphère) et en plus une concentration de charges positives est induite, par la charge négative d'un nuage orageux, à la surface de la terre. Ainsi la portion du sol se trouvant sous le nuage est chargée positivement ce qui inverse



a) nuage orageux thermique:
 L'air chauffé au voisinage du sol
 repousse les vapeurs d'eau vers le
 haut. Celles-ci se transforment en
 cristaux de glace dans les régions
 froides ($t < 0^{\circ}\text{C}$).



b) nuage orageux frontal:
 L'air chaud se foule la
 vapeur d'eau sur
 un front étendu.

figure 1.4 : formation de nuages orageux [19]

localement le champ électrique, alors que le reste du globe garde sa charge négative. (fig 1.2.6).

Nuage orageux :-

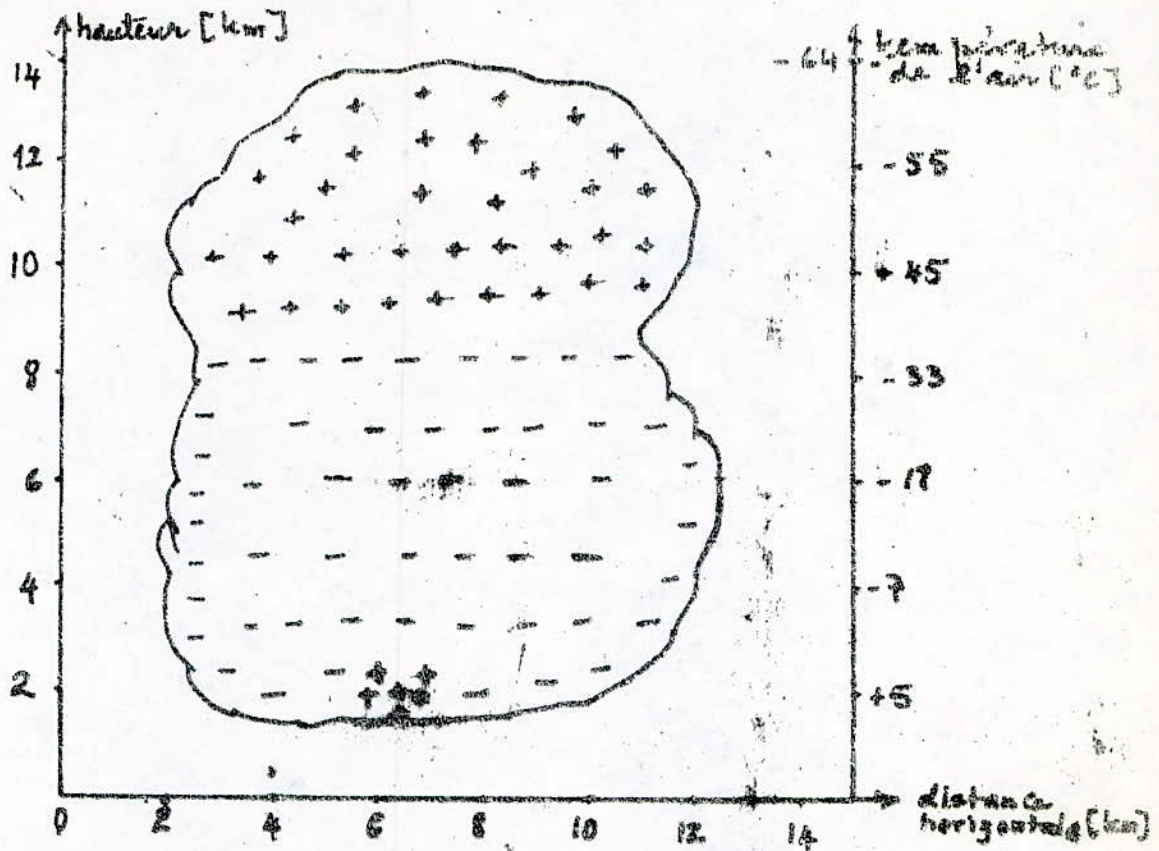
Un nuage orageux est généralement un "Cumulo-nimbus" (fig 1.2), Il peut s'étendre sur plusieurs kilomètres carrés, Sa base est à environ 2-3 km au dessus du sol et il se développe en hauteur jusqu'à des altitudes de 10-15 km.

Dans un nuage orageux typique, la partie supérieure, constituée de cristaux de glace, est chargée positivement; tandis que la partie inférieure, constituée de gouttelettes d'eau, est chargée négativement (fig 1.2.7). Souvent, un îlot de charges positives est insérée dans cette masse négative.

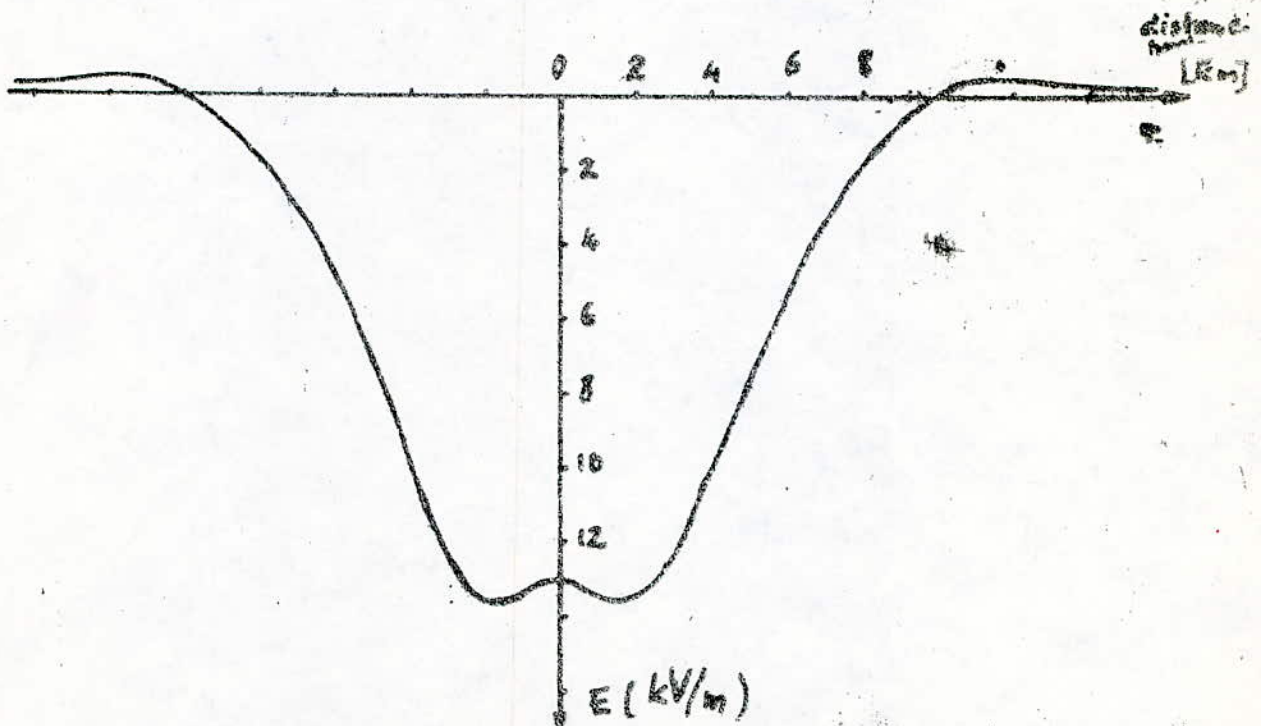
Lorsque le gradient limite de disruption dans l'air (30 kV/cm) est atteint, il y a décharge (amorcage) électrique soit entre deux zones du nuage, soit entre le nuage et le sol.

En admettant que le champ électrique entre le nuage et le sol est à peu près uniforme, on peut estimer la différence de potentiel entre ces deux surfaces à plusieurs mégavolts. (MV). [11]

En effet, si on assimilait le système terre-nuage à un



a) nuage orageux typique.



b) champ électrique au sol.

figure 1.2 :- schéma d'un nuage orageux et du champ électrique qu'il crée au sol [1,2]

Condensateur théorique (fig 1.3) on aura :

$$u = Q/C, \dots (1.1)$$

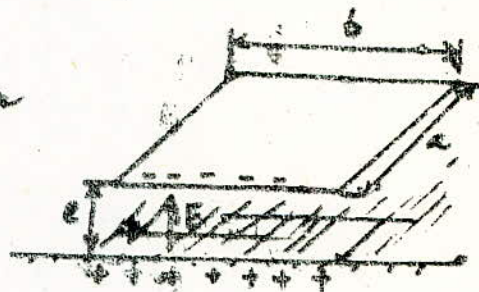
avec Q charge du nuage.

C : capacité du condensateur
(terre - nuage)

$$\text{or } C = \epsilon_0 \frac{S}{e} = \epsilon_0 \frac{a \cdot b}{e}$$

il vient alors :

$$u = \frac{Q \cdot e}{\epsilon_0 \cdot a \cdot b}$$



- fig 1.3 -

Soit par exemple : $Q = 50C$, $e = 2 \text{ km}$, $a = b = 10 \text{ km}$
donc $u = 100 \text{ MV}$.

Le champ électrique sera alors :-

$$E = u/e = 50 \text{ kV/m}$$

Et l'énergie contenue dans un tel système.

$$W = \frac{1}{2} C u^2 = 1250 \text{ MJ} \approx 350 \text{ kWh}$$

1.3 - Le point d'impact du Coup de foudre :-

On entend par point d'impact, le point à la surface de la terre sur lequel la foudre peut tomber. Suite à des observations (K. Berger au mont Salvator - Suisse - et Sypor en Pologne) [1], il a été constaté qu'il existe des zones localisées particulièrement foudroyées dites "nids ou greniers d'orages". Ce fait peut être expliqué par [1, 2] :-

a) Facteurs topographiques :

L'effet combiné de l'humidité du sol et d'un réchauffement

Local constitue des conditions privilégiées pour la formation d'un nuage orageux thermique. D'autre part, la canalisation des mouvements d'air par des vallées ou des fleuves conduisent à l'existence de couloirs orageux. Ainsi en montagne, les versants des vallées sont souvent plus foudroyés que les sommets.

b) Facteurs géologiques:-

La conductivité local du sol constitue un facteur important dans le pouvoir attractif pour la foudre. Ainsi les nappes d'eau, les forêts humides et les terrains marécageux ont une certaine attirance pour la foudre. Leur zones d'action ne pourrait toutefois dépasser la centaine de mètres. Ceci revient au fait que la trajectoire du coup de foudre est totalement aléatoire.

1-4. PHYSIQUE DE LA DECHARGE:-

Des appareils photographiques tournants, dont la rotation permet d'étaler sur l'émission la progression de la décharge orageuse et en distinguer les différentes phases, ont permis d'expliquer la mécanisme de la décharge (fig 1.4). [12, 11, 13, 14].

Font -commence par un "trait-flèche" peu lumineux, un peu plus brillant à son extrémité qui part

d'un point de la base du nuage et parcourt une cinquantaine de mètres en direction du sol puis s'éteint. 10 à 150 μ s plus tard, il sera suivi par un autre "trait-flèche" qui s'avance plus loin. 15 à 20 "traits-flèche" se suivent ainsi, et se rapprochent de plus en plus du sol. La vitesse de propagation de celui-ci est de l'ordre de 10 m/ μ s, mais leur ensemble appelé "traceur par bond" ou "stepped-leader" ne progresse qu'à 100 ÷ 500 km/s (0,1 ÷ 0,5 m/ μ s).

Quand la pointe d'un "trait-flèche" est à 100 ÷ 150 m du sol, des effluves jaillissent de la terre pour à sa rencontre et se transforment en une colonne très brillante, dite "trait de retour" ou "return-stroke", une fois la jonction faite. Cette colonne rejoint le nuage à 20 ÷ 150 m/ μ s. Quelques centièmes de secondes plus tard, se produit un second traceur. Continu cette fois-ci (dart-leader) qui descend du nuage vers le sol à travers le même canal à 1 ÷ 10 m/ μ s. Celui-ci est suivi d'un autre trait brillant (return stroke) analogue au premier (fig 1.5).

Un éclair se compose généralement de 3 à 5 décharges aller-retour successives.

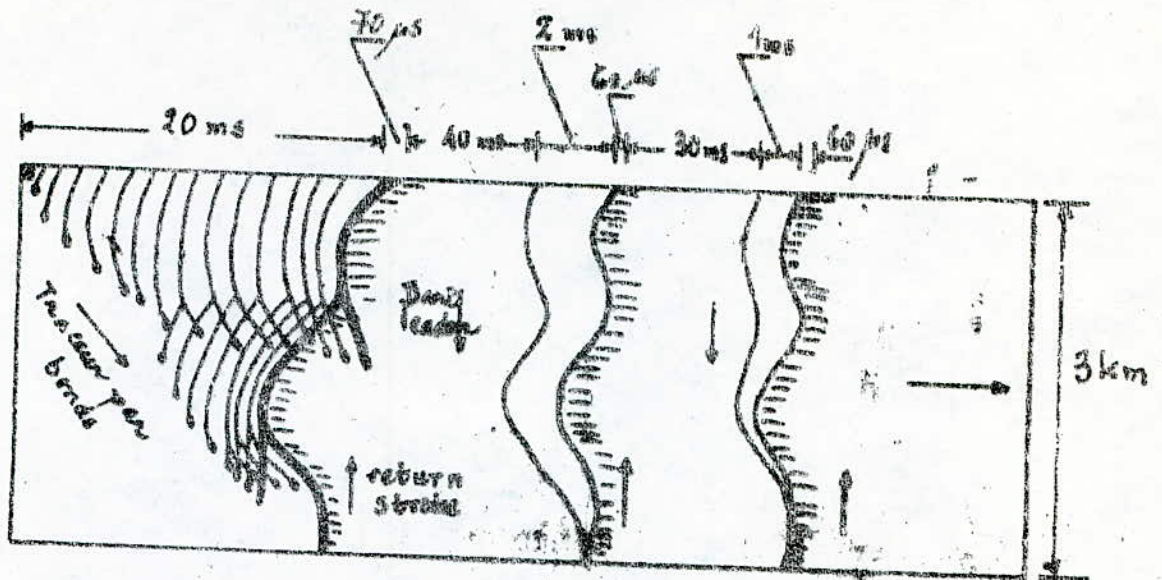


figure 1.4 : Aspect dynamique d'un coup de foudre d'après Martin & Uman [12]

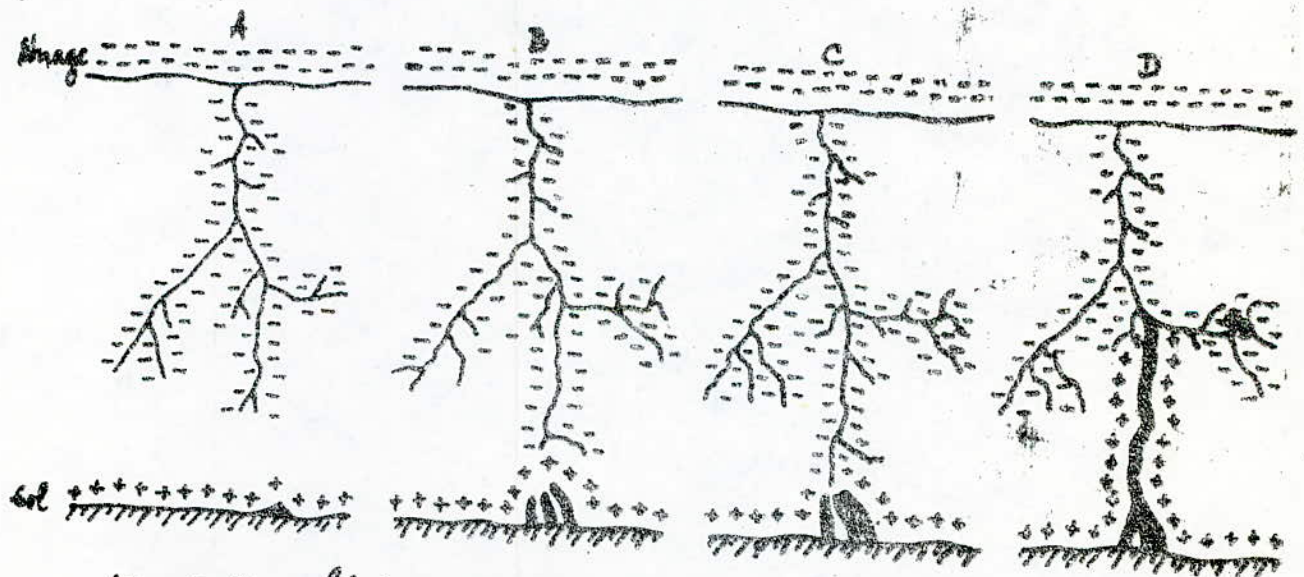


fig 1.5 :- Schéma de l'amorce et du développement du 1^{er} trait de remontée (return stroke). [1, 4, 13, 14]

A : colonne d'ionisation ramifiée.

B : abaissement de la colonne négative jusqu'à amorces positives.

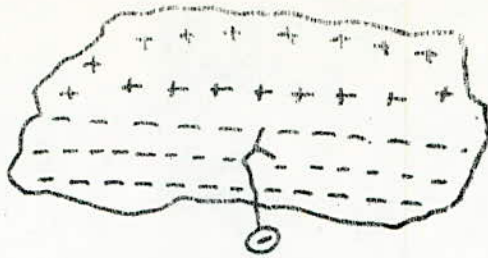
C et D : Contact établi : les charges positives se précipitent dans le canal.

1.5. MECANISME DE DECHARGE

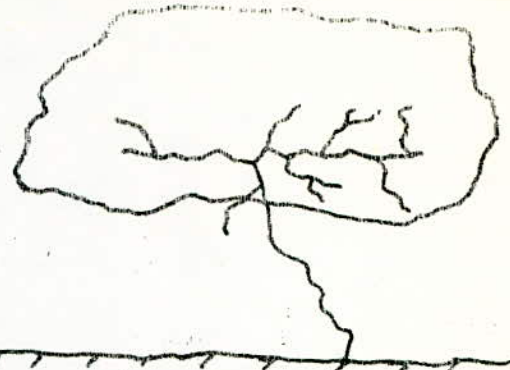
Partant du fait que la base du nuage orageux est fortement chargée en électricité négative, des champs locaux très élevés ($\approx 30 \text{ kV/cm}$) provoquent des avalanches électroniques, en direction du sol, chargées positivement.

L'avalanche d'électrons provoque sur son parcours des ionisations par choc et excite les atomes restés neutres. Ceux-ci produiraient à leur tour des radiations de courte longueur d'onde. Ces radiations, par l'effet photoélectrique, arracheraient des électrons aux atomes (photoionisation). Ainsi se produirait un canal de plasma très conducteur où la haute température empêcherait une recombinaison rapide des ions positifs et négatifs (fig 1.5)

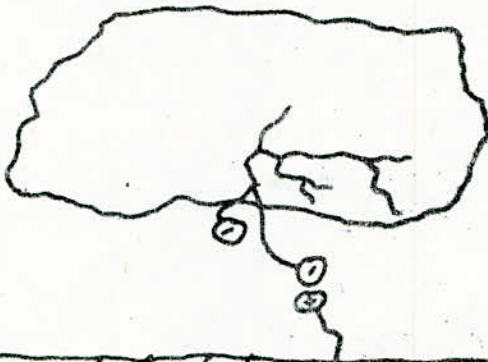
Une fois l'avalanche aurait effectué un certain trajet elle serait momentanément arrêtée par des charges positives laissées derrière elle. Mais, sous l'influence du champ, une nouvelle avalanche ne tarderait pas à se produire et s'avancerait un peu plus loin (traceur par bonds). A $100 \div 150 \text{ m}$ du sol, s'est un jet positif qui va à sa rencontre, à partir du sol. Quand la jonction serait faite, un flux positif de grande intensité remonte vers le nuage (retourno-strobes). L'ionisation persistant un certain temps (quelques centièmes de seconde)



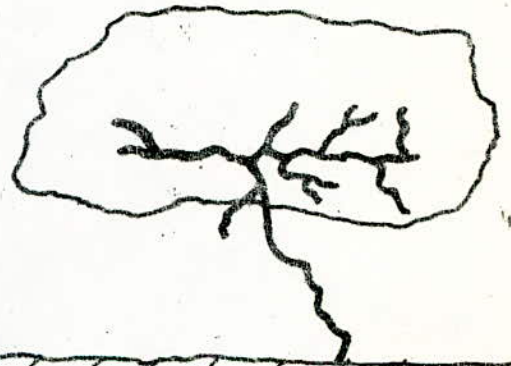
a. traceur par bonds et ramifications à l'intérieur du nuage.



d. d'autres "Dart-Leader" épuisent les charges de la profondeur du nuage.



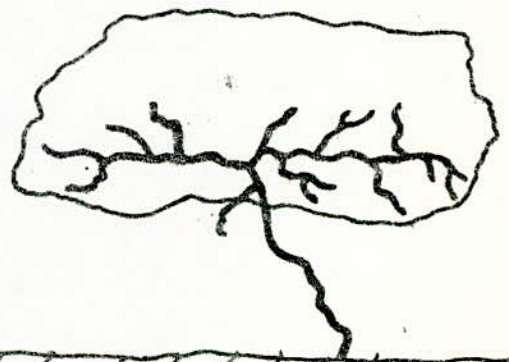
b. Apparition de décharges ascendantes (de capture)



e. Chacun des "Dart-Leader" est suivi par un "return stroke"



c. Voie Conductrice tracée.
1^{er} "return stroke"



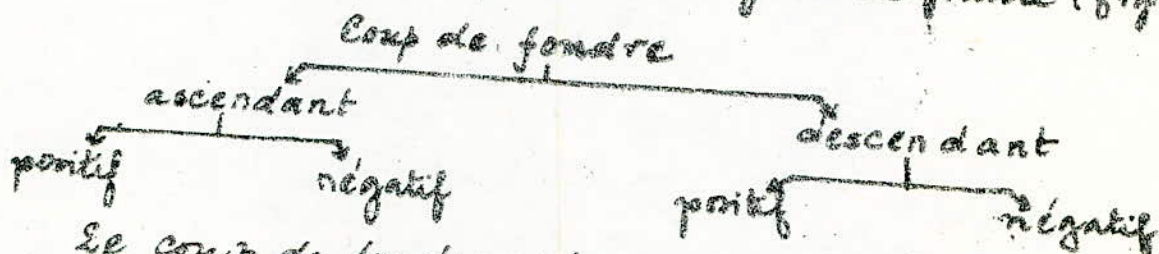
f. Une toute petite partie du canal est visible sous le nuage.

figure 1.6. étapes d'un coup de foudre. [1, 10, 14]

explique que plusieurs décharges d'aller et retour puissent se produire sans être précédées par des "traitements flèches". Selon Schonland, les aller-retour sont dus au fait qu'à chaque fois le "return-stroke" s'enfonce dans la profondeur du nuage pour y éprouver les charges négatives qui s'y accumulent. (fig 1.6).

1.6. CLASSIFICATION DES COUPS DE FONDRE :-

Selon l'origine du traceur principal et sa polarité, on définit quatre (04) grandes catégories de foudre (fig 1.7).



Le coup de foudre est ascendant si le traceur principal se développe depuis le sol et descendant (90% des cas) si le traceur principal prend naissance à partir de la base du nuage.

Remarque:- Les coups de foudre ascendants n'ont lieu, généralement, qu'en présence d'aspérités.

La polarité du coup de foudre sera celle du point de départ du traceur principal. (fig 1.7).

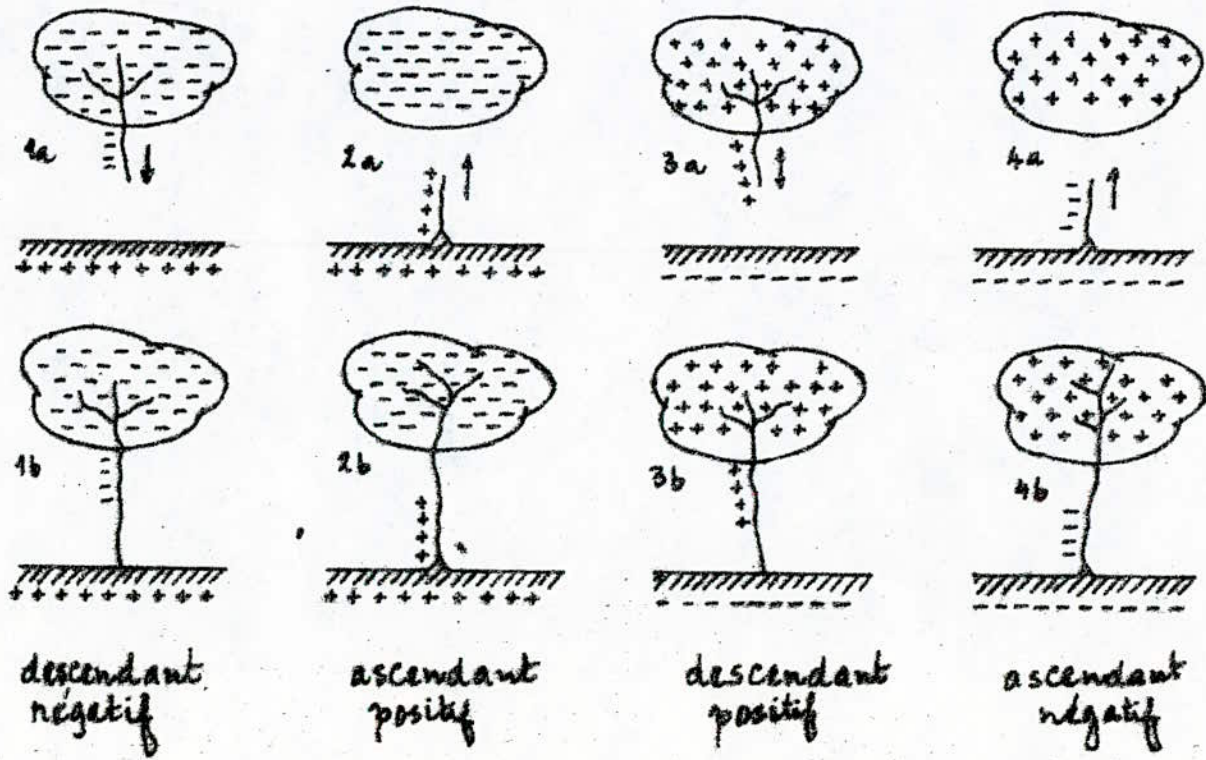


figure 1.7 : types de coups de foudre [9]

1.7 - PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA Foudre

A partir de mesures faites dans les stations expérimentales, des courbes donnant la forme et la distribution des paramètres électriques de la foudre ont été établies. Parmi ces paramètres nous citerons les plus importants.

1.7.1 - INTENSITE DE CRETE DU COURANT :-

Elle est l'intensité la plus élevée qu'atteint le courant lors d'une décharge de foudre. Comme cette crête diffère d'une décharge à une autre, des expressions analytiques, basées sur les mesures, sont proposées pour le calcul de la probabilité globale qu'a un courant de foudre de dépasser une crête donnée :

a) Selon les Russes [4,2] :

$$\text{Log } P_T = 2 - I/60 \quad \dots \quad (1.2)$$

avec : P_T probabilité globale en (%)

I crête du courant en [kA]

b) Selon Popolansky [5,9] :

La probabilité s'exprime par :-

$$P(I) = \frac{I}{5. \text{Log } I. \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Log } I} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{Log } I - \text{Log } \bar{I}}{\text{Log } I}\right)^2\right) d. \text{Log } I \dots (43)$$

avec $P(I)$: probabilité globale

I crête du courant en [kA]

$$\bar{I} = 25 \text{ kA}$$

$$5 \log I = 0,39$$

Remarque: On distingue 2 catégories de courants et ce suivant leur polarité.

a) Courants négatifs: Ils offrent une grande variété de combinaisons de courants impulsionnels et de courants continus [1,2A]. La valeur de crête de la première décharge est supérieure à celles des décharges secondaires (fig 1.8.6 et 1.8.c).

b) Courants positifs: Ils sont constitués d'une seule décharge assez longue (0,1 + 0,2 s). La valeur de crête, dans ce cas, peut atteindre de très fortes valeurs allant jusqu'à environ 250 kA. (fig 1.8.a).

1.7.2 - RAIDEUR DU COURANT DE Foudre:

C'est la vitesse de montée du courant de foudre qui sera représentée par le rapport " di/dt ".

Selon K. Berger [1,4,11], les courants positifs sont moins raides et la première décharge du courant négatif a une raideur plus faible que celles des décharges suivantes.

1.7.3 - CHARGE ELECTRIQUE DE LA Foudre:

Elle équivaut à la quantité de charge totale

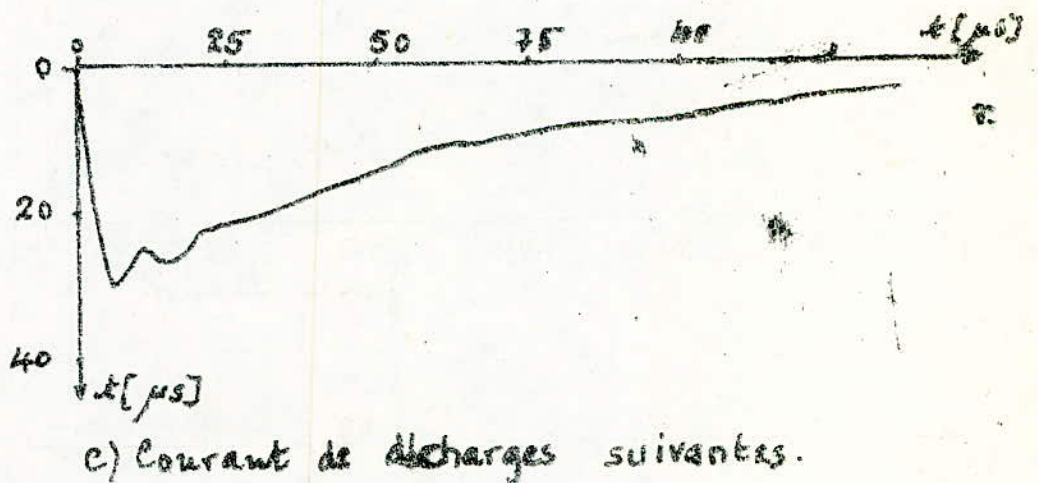
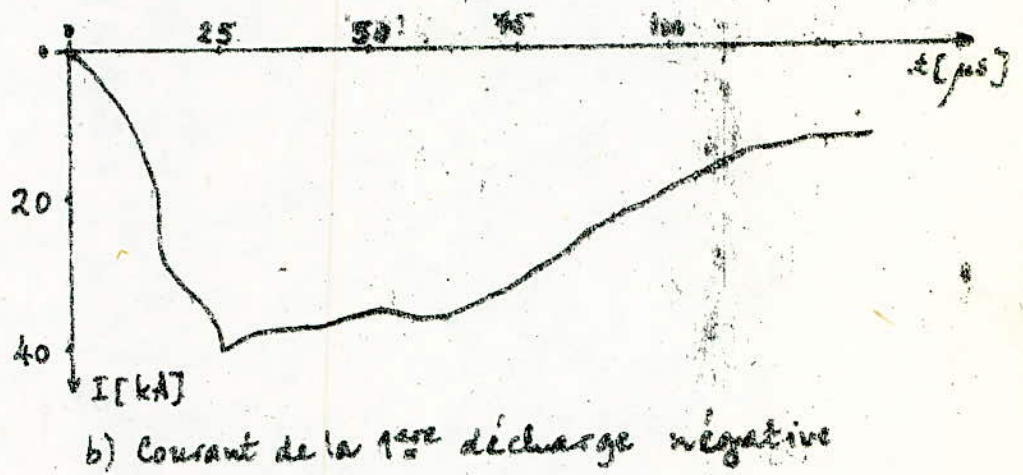
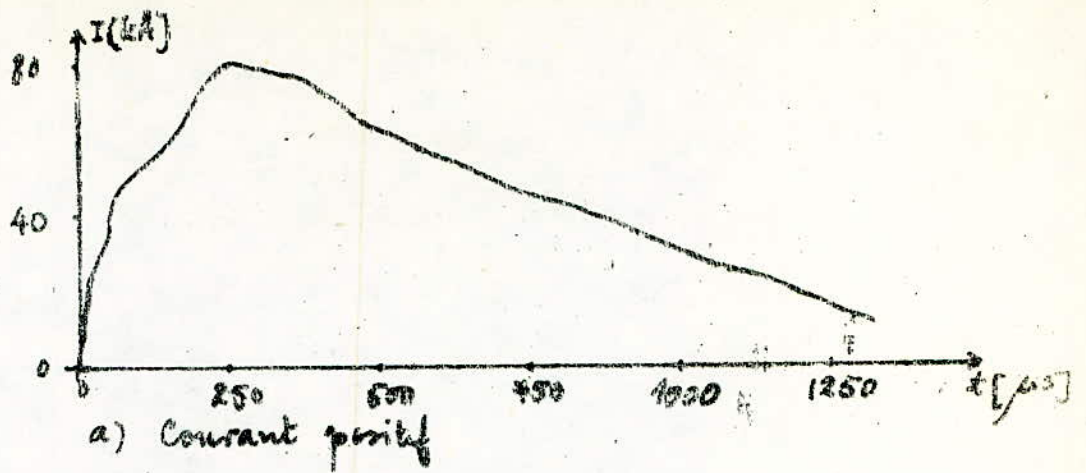


figure 1.8 : formes d'onde de courants de foudre enregistrées par K. Berger [1.2.4]

neutralisée au cours d'un coup de foudre. Celle-ci s'exprime par l'intégrale $Q = \int_0^{t_f} i dt$.

tel que t_f durée totale du courant i .

1.7.4 - IMPULSION DU CARRE DU COURANT ($\int i^2 dt$):-

Elle représente l'énergie qui aurait été dissipée à travers une résistance d'un Ohm ($R = 1\Omega$).

1.8 - LES EFFETS D'UN COUP DE Foudre :-

En tant que phénomène électrique, la foudre peut avoir les mêmes conséquences que tout autre fort courant circulant dans un conducteur électrique ou que tout autre passage de courant à travers un mauvais conducteur ou un isolant.

Ainsi, on peut s'attendre aux effets suivants:-

- thermiques, électrodynamiques, électrochimiques, dus aux amorçages secondaires, électromagnétiques, capacitifs d'induction et acoustiques.

Seuls en pratique, les effets thermiques et ceux dus aux amorçages secondaires jouent un rôle notable.

a) Les effets thermiques:-

a. 1) Les effets liés à la quantité de charge $Q = \int i dt$:-

Ce sont les effets de fusion au point d'entrée du courant de foudre dans un conducteur

électrique qu'on désigne par "traces d'impact".

Sur les installations de protection contre la foudre, on pourrait constater une fusion de l'extrémité de la pointe sur quelques millimètres et des traces de fusion qui peuvent aller jusqu'au percement dans le cas d'une tôle mince.

En supposant que la chute de tension anodique (" u ") au contact avec le métal reste constante pendant toute la durée du coup de foudre, l'énergie dissipée localement est: $W = u \int_{t_1}^{t_2} i dt = u Q. \dots (1.4)$

On constate d'après l'expression précédente que les décharges de foudre de longue durée, même si elles sont de faible courant sont accompagnées d'une énergie assez importante.

a. 2) Les effets liés à l'intégrale d'action $\int i^2 dt$:-

Quand le courant de foudre a pénétré dans un conducteur métallique, dans lequel il peut se propager, le dégagement de chaleur qui en résulterait obéit à la loi de Joule:

$$W = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt. \dots (1.5)$$

Ceci est valable dans la mesure où la résistance équivalente du conducteur reste constante lors de la décharge. Mais comme les courants de foudre

sont de haute fréquence, on observe alors le phénomène de l'effet pelliculaire et de ce fait la résistance des conducteurs est en réalité plus grande que celle mesurée en courant continu.

Des effets thermiques importants apparaissent surtout en des points de forte résistance, pour cela, dans les installations de protection, il faut veiller à ce que le raccordement des différents contacts soit très bon.

Les mauvais contacts sont des points particulièrement dangereux sur le parcours d'un courant de fondre. Une faible résistance de contact peut provoquer des dégagements de chaleur assez importants qui engendreraient la fusion de quantités de métal appréciables et les jicler sous forme d'étincelles. Celles-ci peuvent provoquer un incendie si des matières inflammables se trouvent aux alentours ou une explosion en cas de matières explosibles.

Des effets explosifs sont constatés aux endroits où s'accumule l'humidité. En effet, dans les mauvais conducteurs, beaucoup d'énergie est libérée sous forme de chaleur par le passage du courant, ainsi l'eau qu'il contiennent se trouve chauffée et vaporisée. Vu la brièveté du phénomène et comme conséquence de la

suppression qui en résulte, il se produit des éclatements d'allure explosive (dans les arbres, mats en bois, poutres, murailles). Ainsi, les conducteurs de paratonnerre doivent avoir une bonne conductibilité et être de sections suffisamment grandes afin d'obtenir un coup de foudre "froid".

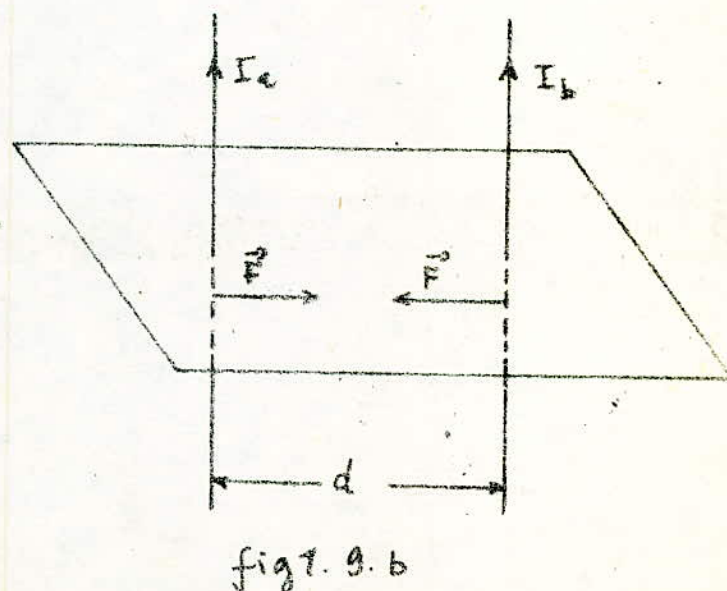
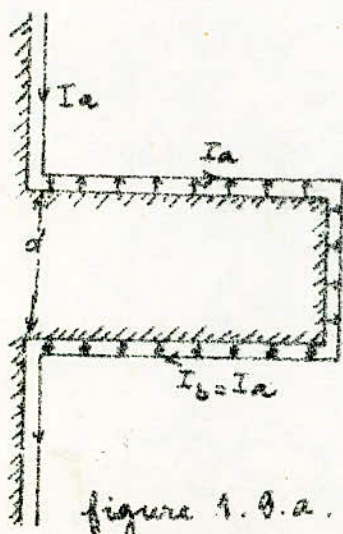
b) les effets électrodynamiques :-

Si un conducteur canalisant un courant de foudre I_a contourne un obstacle (fig 1.9.a) ou se trouve à proximité d'un autre conducteur traversé par un courant I_b (fig 1.9.b), des efforts mécaniques importants apparaissent. Les conducteurs, dans ce cas, peuvent être arrachés ou être amenés à s'entrechoquer.

L'effort mécanique s'exprime par la relation :-

$$F = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_a \cdot I_b}{d} \quad [N/m]. \quad \dots (1.6)$$

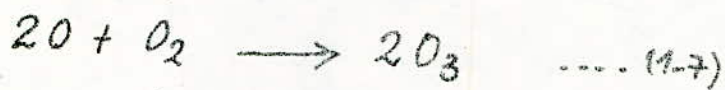
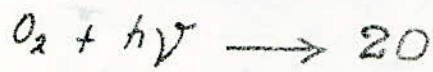
avec I en [A], d [m]



c) Les effets électrochimiques:-

Bien que la foudre transporte une assez grande quantité d'électricité, la décomposition électrolytique qui s'en suit dans les conducteurs est très faible. Par contre, une action de corrosion assez importante peut avoir lieu dans les conducteurs enterrés de la prise de terre.

Dans l'air, la décharge de foudre apporte une énergie suffisante pour que, à partir de l'oxygène contenu dans l'espace terre-nuage, la réaction chimique suivante ait lieu:-



avec: h constante de Planck.

ν fréquence de l'onde lumineuse.

On constate alors l'apparition d'ozone (O_3) dont l'odeur piquante caractéristique accompagne toute décharge électrique.

d) Les effets dus aux amorçages secondaires:-

Lors du coup de foudre, et suite à la montée en potentiel des prises de terre, des amorçages qui, parfois sont dangereux, peuvent se produire entre l'une des descentes des paratonnerre et une partie

conductrice, du bâtiment, reliée à la terre si celle-ci se trouve à proximité de la descente.

e) les effets électromagnétiques :-

La foudre génère des ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence (kHz = MHz) provoquant ainsi des perturbations radioélectriques.

Ce principe est utilisé dans le mécanisme du compteur de coups de foudre mis au point par la C.I.G.R.E. [11, 7, 8]. Il traduit par l'intermédiaire d'une antenne, le rayonnement électromagnétique des éclairs sous formes d'impulsions de comptage.

f) Les effets capacitifs :-

Si un objet métallique, isolé par rapport à la terre, se trouve à proximité du canal de foudre une tension due au système de capacités peut provoquer une décharge dite "décharge induite".

Afin d'illustrer cet effet, nous citons comme exemple le cas d'un abri comprenant une toiture métallique isolée de la terre par ses supports. (fig 7. 10)

Cette toiture se comporte comme un condensateur de capacité C_1 par rapport au canal de foudre qui vient "frapper" à proximité, et de capacité C_2 par rapport au sol.

Le potentiel V_1 engendré par la foudre porte alors le toit

au potentiel V_2 qui s'exprime par :-

$$V_2 = V_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \dots (1-8)$$

Ce potentiel V_2 pourrait être suffisant pour qu'une décharge induite frappe la personne, abritée sous le toit, sans que le dernier ne soit directement foudroyé.

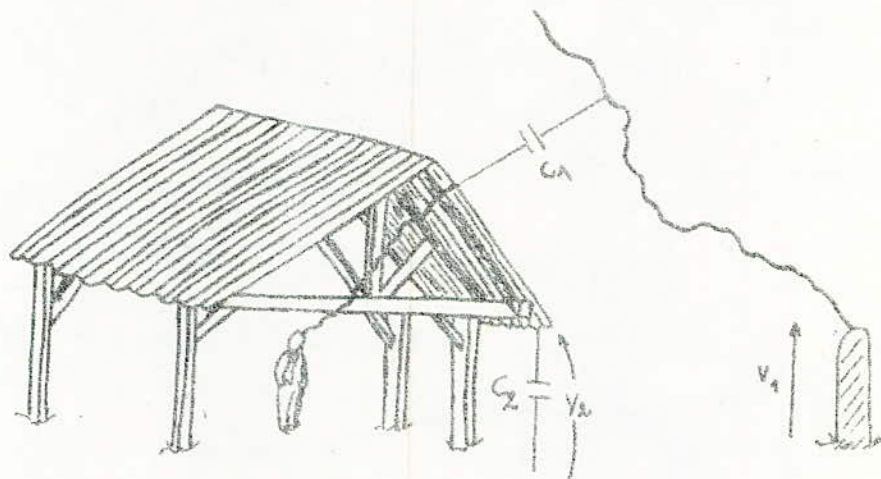


figure 1. 10.

g) Les effets d'induction :-

Dans tout circuit embrassant un flux d'induction magnétique ϕ apparaît une force - contre électromotrice qui s'exprime par : $e = - d\phi/dt$ (1.9).

Lorsque ce flux est engendré par le courant de foudre i alors $\phi = Mi$.

où M représente l'inductance mutuelle, qui en l'absence de métal magnétique, ne dépend que de la géométrie des circuits [2].

Alors la f.c.e.m. devient

$$e = -M. \frac{di}{dt} \quad (1.10)$$

Comme la vitesse de variation du courant de foudre atteint des valeurs importantes, de faibles inductances mutuelles peuvent entraîner des tensions induites élevées.

h) Les effets acoustiques (le tonnerre):-

Lors d'une décharge de foudre, le passage du courant donne naissance à un canal d'air de haute température ($\approx 30.000^{\circ}\text{C}$) et de pression élevée (10 : 100 atm.). Dès que la décharge est terminée, l'air du canal se répand dans l'atmosphère environnante en produisant une onde de choc. Cette onde, après avoir parcouru une courte distance, se transforme en onde acoustique qui caractérise le tonnerre.

La reconstitution du canal de foudre, surtout la partie qui se trouve à l'intérieur du nuage, peut être obtenue en enregistrant le bruit émis par le tonnerre. [10]

Il a été constaté, que la durée du tonnerre dépend de la longueur du canal de foudre qui l'engendre. [2, 10]

Maintenant, qu'on ait fait connaissance avec le phénomène de décharge de foudre et ses effets, on voit bien qu'il représente un danger certain. Ceci nécessite alors une protection assez efficace et qui doit être basée sur le processus de développement du coup de foudre. Ce sera l'objet du chapitre 2.

Chapitre 2:- PROTECTION CONTRE LA Foudre

2.1. GENERALITES:-

La connaissance actuelle des phénomènes physiques mis en jeu par la foudre a permis d'élaborer une méthode de détermination de la zone de protection d'une tige verticale ou de fils tendus horizontalement. Elle permet également de définir la taille maximale des mailles d'une cage. Cette méthode est basée sur une nouvelle connaissance du mécanisme d'impact de la foudre. Elle est mise en oeuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé modèle électro-géométrique. Bien que ce modèle ne soit pas parfait, il constitue néanmoins l'approche la plus cohérente de la protection contre la foudre qui ait été élaborée à ce jour.

2.2 - DISTRIBUTION ET SEVERITE ORAGEUSE:-

L'étude de systèmes de protection contre la foudre nécessite la connaissance statistique de chute de foudre sur l'installation à protéger. Pour cela on doit connaître :-

a) Le niveau kéraunique:- (N_k).

La sévérité orageuse d'une région est caractérisée généralement par son niveau kéraunique.

On entend par celui-ci, le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu au moins une fois.

Une période de 11 ans [8] est suffisante pour avoir une approximation valable du niveau kéraunique.

b) Densité de coups de foudre au sol :- (N_s)

Un que le niveau kéraunique ne peut fournir une mesure utilisable de la sévérité orageuse en un lieu précis alors on a pensé à la densité de coups de foudre au sol.

L'estimation de celle-ci pu être établie à partir de résultats fournis par des compteurs de coups de foudre :- [7, 8]

$$N_s = \frac{Y_g \cdot k}{\pi \cdot R_g^2} \text{ Coups de foudre par km}^2 \text{ par an} \dots (2.1)$$

avec :-

$$Y_g = \frac{\text{nombre de coups observés qui ont actionné le compteur}}{\text{nombre total enregistrés par le compteur}}$$

k : nombre total de coups enregistrés.

R_g : rayon d'action du compteur ; (dépend du type de compteur utilisé).

Approximativement :

- Pour des compteurs de type CIGRE 10 kHz [9] :-

$$N_s = k/1320 \text{ (coups/km}^2 \text{ an)} \dots (2.2)$$

- Pour des compteurs de type CIGRE. 500 Hz [9]

$$N_s = k/5180 \text{ (coups/km}^2 \cdot \text{an)} \text{ ---- (2.3)}$$

Mais, comme l'utilisation des compteurs de coups de coups de foudre n'est pas répandue, des formules expérimentales ont été alors proposées pour chercher la densité de coups de foudre en utilisant le niveau séismique [2, 9]:-

$$* N_s = N_k (0,7 + 0,35 \sin \alpha) (0,4 \pm 0,2) \text{ (coups/km}^2 \cdot \text{an)} \text{ -- (2.4)}$$

avec α : latitude de la région considérée.

Ainsi, cette formule montre que la densité varie en passant des régions tempérées aux régions tropicales.

$$* N_s = 0,023 \cdot N_k^{1,3} \text{ (coups/km}^2 \cdot \text{an)} \text{ ... (2.5) [9]}$$

c) Fréquence de foudroiement d'un objet au sol: - (N_g).

Maintenant qu'on connaît la densité de coups au sol on peut estimer la fréquence de foudroiement d'un objet au sol par la formule [12]:-

$$N_g = N_s (S \cdot 10^{-6} + k_1 \cdot B \cdot 10^{-3} + k_2) \text{ (coups par an)} \text{ -- (2.6)}$$

avec:

N_s : densité de coups de foudre de la région en (coups/km²·an)

S : Surface du toit de l'édifice en [m²].

B : Circonférence du toit en (m)

k_1 et k_2 : facteurs dépendants de la hauteur de l'édifice
(fig 2.1)

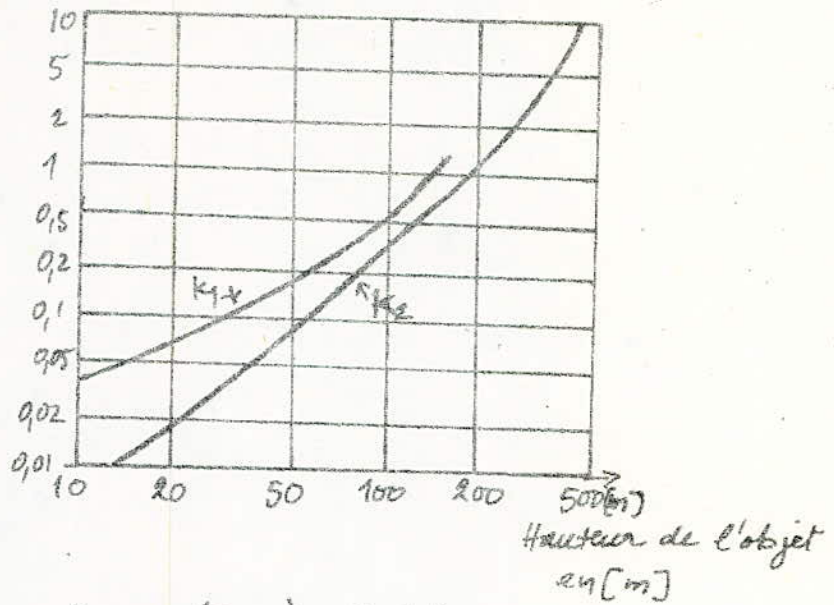


figure (2.1) : [127].

abaque donnant les valeurs k_1 et k_2
en fonction de la hauteur
de l'objet à protéger.

2.3. PARATONNERRE

2.3.1. Généralités:-

L'opportunité de munir un bâtiment d'un paratonnerre dépend de la fréquence qu'il présente d'être foudroyé et des dégâts que peut provoquer un foudroiement de ce bâtiment.

Parmi les bâtiments qui nécessitent une installation de paratonnerre, on peut citer:-

- Les bâtiments recevant du public.
- Les immeubles de grande hauteur et les constructions élevées (pylônes, châteaux d'eau, phares,.....)
- Les bâtiments et dépôts renfermant des matières dangereuses (explosibles, inflammables, toxiques, ...)
- Les bâtiments contenant des équipements ou documents vulnérables ou précieux (Laboratoire haute tension, ordinateurs, dépôts d'archives,.....).

2.3.2. Constitution d'un paratonnerre:-

Un paratonnerre est composé de trois parties essentielles.

a) Les organes capteurs: Ils sont constitués d'une ou plusieurs tiges verticales. Ils seront placés sur les points hauts du bâtiment et servent

ainsi à intercepter la foudre.

b) Les conducteurs de toiture et de descente :-

Ils sont constitués de conducteurs d'assez grande section pour supporter les forts courants de foudre et les véhiculer vers la terre.

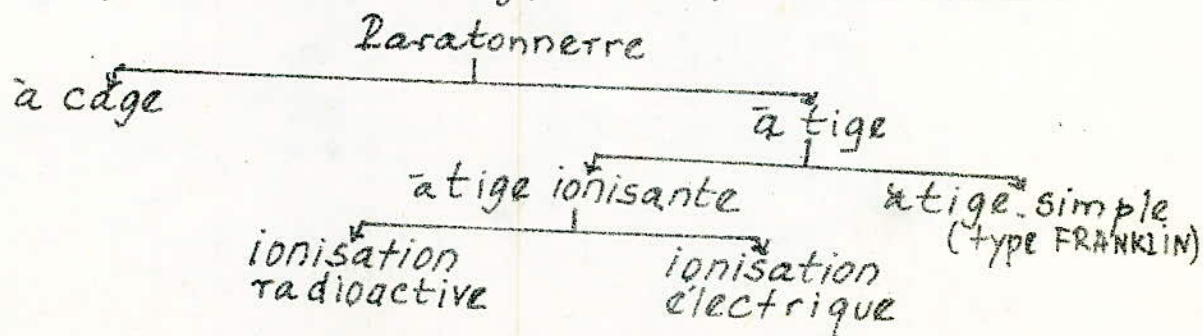
Ils doivent avoir le parcours le plus rectiligne possible pour éviter tout claquage diélectrique lors de contournement d'obstacles.

c) Les prises de terre : Elles sont constituées soit d'un grillage, soit de piquets verticaux ou de conducteurs, analogues à ceux de descentes, disposés en nappe.

L'installation d'une prise de terre doit permettre la dispersion du courant de foudre dans la terre sans présenter de danger aux personnes et matériels.

2.3.3 Différents types de paratonnerres :-

Suivant le type des organes capteurs, on distingue plusieurs types de paratonnerres.



a) Paratonnerre à tige :-

Il est constitué d'une ou plusieurs tiges effilées disposées sur la partie haute du bâtiment à protéger.

Ces tiges sont reliées à la terre. (fig 2.2.a)

Il permet la protection d'ensembles de bâtiments, de zones de terrain et d'installations de type ponctuel.

On distingue 2 types de tiges. [20]

a.1) tiges simples (type Franklin) :-

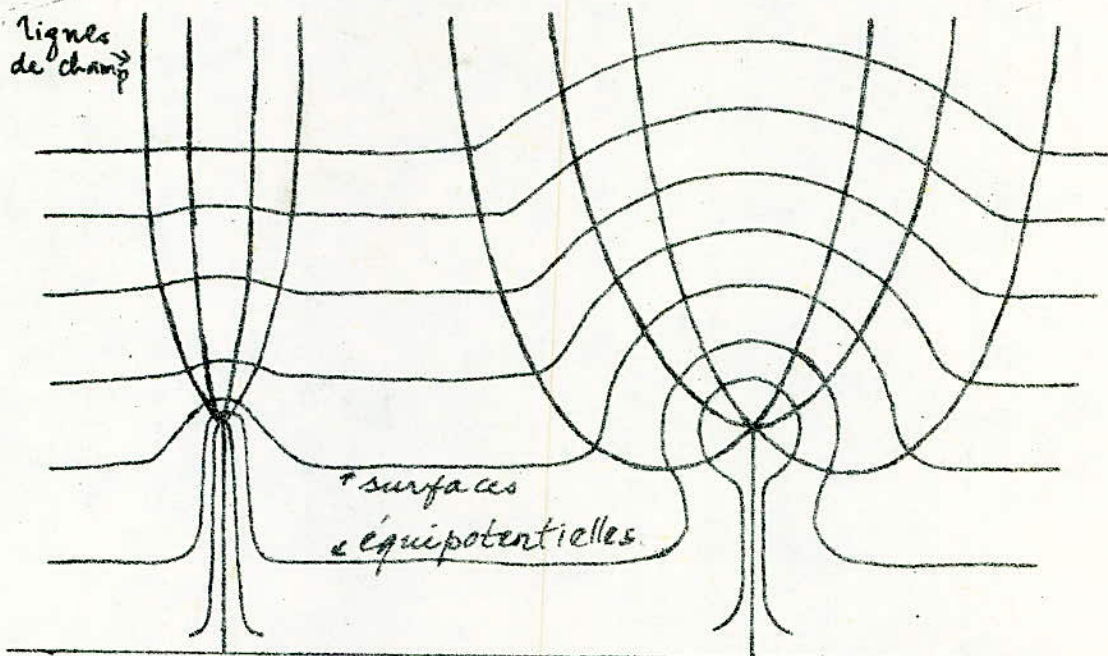
C'est le paratonnerre expérimenté en 1760 par Benjamin Franklin. Il constitue, à ce jour, la protection la plus simple particulièrement adaptée pour les bâtiments de faibles dimensions.

a.2) tiges ionisantes :-

Elles sont constituées de tiges simples équipées d'un dispositif particulier qui par un système de génération émet des ions et des électrons pour intensifier le champ électrique (fig 2.3). Elles constituent, ainsi, un point de chute "obligé" de la foudre. En effet, l'effet couronne sera déclenché prématurément et le retard à l'amorçage sera diminué.

Deux (02) procédés d'ionisations sont utilisés:

a.2.1) L'ionisation radioactive est obtenue par l'utilisation



a) Déformation du champ électrique par 1 tige simple

b) cas d'une tige ionisante

- figure 2.3 -

Les lignes du champ électrique étendent l'action du paratonnerre à des distances bien supérieures à celles de la simple tige Franklin, et ce en fonction de la puissance des sources ionisantes.

de sources radioactives tel que le Radium 222 ou, comme récemment, le radioélément artificiel "l'Américium 241". Ce dernier a la propriété de libérer un intense rayonnement de particules alpha très ionisantes et sans irradiations pour l'environnement.

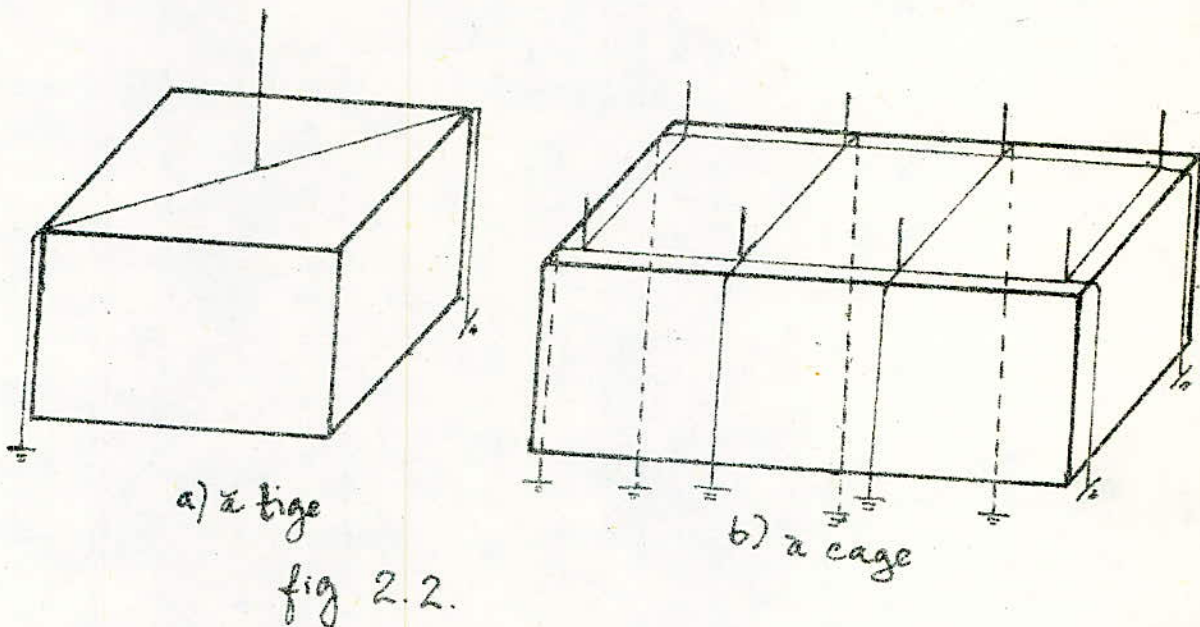
Ainsi équipé, la tige voit sa hauteur augmenter, donc la zone de protection offerte par rapport à une tige simple.

a.2.2 | L'ionisation électrique permet d'avoir les paratonnerres les plus performants connus à ce jour. Elle est obtenue par un dispositif produisant une haute tension de l'ordre de 25 kV. Ce potentiel sera transmis à la pointe de la tige et déclenchera ainsi l'effet-couronne. Un système détecteur d'orages permet la mise en route du dispositif à chaque risque de décharge.

b) Paratonnerre à cage :-

Il est réalisé par une enveloppe du bâtiment au moyen d'un maillage régulier en conducteurs reliés à la terre (fig 2.2. b). La fonction de capture est assurée par les conducteurs de la cage d'une part,

et par des pointes captrices, disposées sur les points hauts (vulnérables) du bâtiment, d'autre part.



2.4 - MECANISME D'IMPACT et MODELE ELECTROGEOMETRIQUE:

Dans un coup de foudre descendant, la progression du traceur par bonds accroît considérablement la valeur du champ électrique au sol. Au moment où la pointe du traceur arrive à une certaine distance du sol, le champ électrique atteint sa valeur critique (valeur suffisante pour le développement de décharges ascendantes). Celle-ci dépend directement de la quantité de charge portée par le traceur principal. [2], [13].

D'autre part, les modèles actuels supposent que la première décharge du coup de foudre correspond à la neutralisation des charges portées par le traceur de sorte qu'il existerait un rapport presque constant entre ces charges et l'intensité de crête du courant.

a) Distance d'amorçage:-

En tenant compte de ce qui a précédé, une expression analytique de la distance d'amorçage, - distance à partir de laquelle la pointe du traceur choisit son point d'impact - en fonction de l'intensité de crête de la première décharge du coup de foudre a été établie [1, 2, 3, 11]

$$d = 9,4 I^{2/3} \quad \dots (2.8)$$

d : distance d'amorçage en [m].

I : intensité de crête en [kA].

Antérieurement, l'expression $d = 6,7 I^{0,8}$ est utilisée, mais la première est préférée parce qu'elle est plus rigoureuse surtout pour les forts courants.

b) Modèle électrostatique:-

Principe: Tout se passe comme si la pointe du traceur était le centre d'une sphère fictive de rayon " d " (distance d'amorçage), et comme si

cette sphère accompagnait rigidement la pointe au cours de la trajectoire a priori aléatoire du traceur.

Ainsi, pour chercher les zones que protège un dispositif de protection; on imagine que la sphère fictive de rayon "d" roule sur le sol dans toute les directions sans jamais perdre le contact avec le sol. Si au cours de ce mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection sans jamais toucher l'objet à protéger, alors la protection de celui-ci est assurée.

2.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN PARATONNERRE-

Afin de bien saisir le mode d'action d'un paratonnerre, nous allons appliquer le modèle électrogéométrique au cas simple d'une tige verticale de hauteur "h" située dans un terrain parfaitement plat. (fig 2.4) [2,11]

Traçons la parabole (P) définie par le lieu géométrique des points à égale distance de la pointe de la tige (A) et du sol.

Celle-ci a pour équation dans le système

de coordonnées (xOy).

$$h^2 - 2hy + x^2 = 0 \quad \text{--- (2.9)}$$

Remarque: - Cette construction est valable pour un demi-plan de révolution.

D'après l'hypothèse de la distance d'amorçage, tout traceur qui se présente à droite de la parabole (entre l'axe Ox et (P)) frappera le sol, par contre s'il se présente à gauche de la parabole (entre l'axe Oy et (P)) il sera capté par la pointe de la tige "A" dès que la distance AT qui sépare la pointe de la tige (A) et celle du traceur (T) est inférieure à la distance d'amorçage (d) du coup de foudre considéré.

Soit (T₁) la pointe du traceur sur la parabole (P) tel que $AT_1 \leq d$,

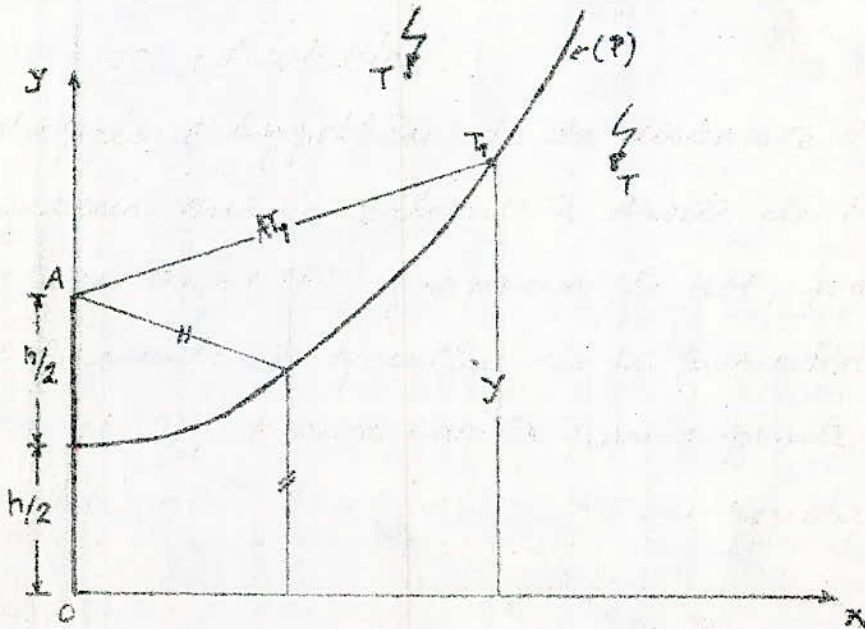


figure 2.4.

ou $AT_1 = y$ par construction de la parabole.

y étant l'ordonnée du point T_1 .

En remplaçant dans l'équation de la parabole, on obtient:

$$y = \frac{h^2 + x^2}{2h} \leq d$$

d'où l'on peut déduire:

$$x \leq h \sqrt{\frac{2d}{h} - 1} \quad \dots (2.10)$$

Alors " x " sera le rayon au sol que protège la pointe de la tige pour une distance d'amorçage " d " donnée.

Remarque:-

En admettant que la tige elle même peut jouer un rôle capteur semblable à celui de la pointe, le critère de protection sera complété par $x \leq d$ dans la zone $x \leq h$.

2.6 ANALYSE DES COMPOSANTS D'UN PARATONNERRE:-

Le choix de la protection contre la foudre d'une installation quelconque dépend de sa géométrie et de sa configuration. Pour cela, il serait nécessaire d'étudier chaque type de protection qui lui est adaptable.

1) Zones de protection des différents paratonnerres:-

On entend par zone de protection, l'espace

aux alentours de l'organe capteur de foudre où un objet s'y trouvant ne risque pas d'être foudroyé.

L'application du modèle électro géométrique permet de déterminer la zone de protection pour chaque type de paratonnerre.

a) Tige verticale :-

Supposons une sphère de rayon "d" s'approchant d'une tige verticale de hauteur "h".

Soit (XOY) le plan qui coupe la sphère en 2 parties égales tel que le cercle formé dans ce plan, par la sphère, sera tangent aux axes OX et OY (fig 2.5a)

Cette construction est valable pour un plan de révolution (fig 2.5.b)

Le cercle a pour équation :-

$$(x-d)^2 + (y-d)^2 = d^2 \dots (2.11)$$

Pour déterminer la distance protégée par la hauteur "h", on remplace dans l'équation du cercle, y par h, et on aura :-

$$x_0 = d - x$$

$$(x-d)^2 = 2dh - h^2$$

$$x = d \pm \sqrt{2dh - h^2}$$

d'où le rayon protégé au sol par la tige:

$$x_0 \leq \sqrt{2dh - h^2} \dots (2.12)$$

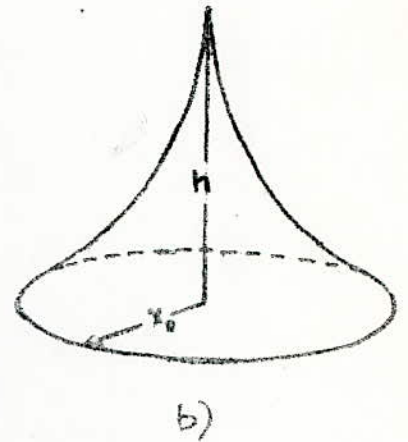
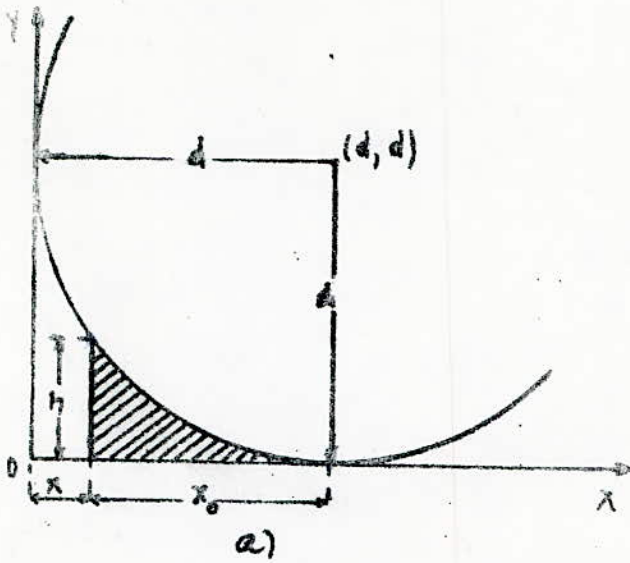


figure 2.5.

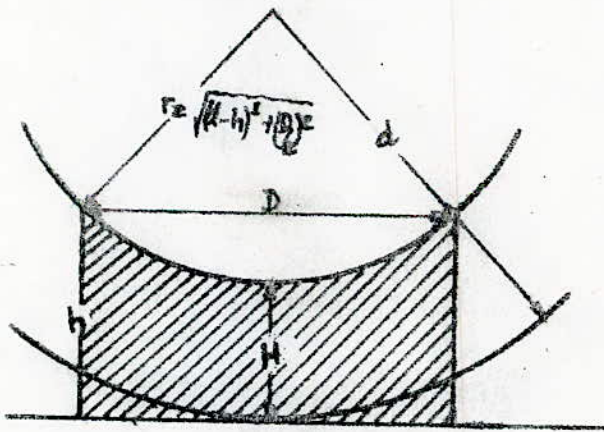


figure 2.6.a.

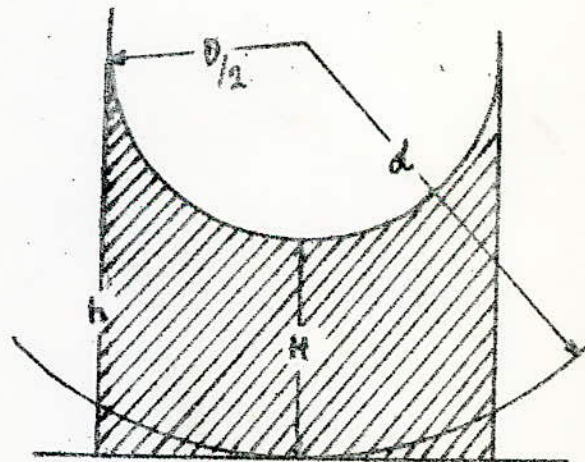


figure 2.6.d.

Remarque:- Lorsque $h > d$, la sphère sera tangente à la tige. alors $x_0 = d$.

Ainsi la hauteur de la tige n'a plus d'effet sur la zone de protection vis-à-vis des plus petits courants de foudre.

Pour qu'un objet soit correctement protégé, il faut qu'il soit entièrement inclus dans la zone de protection (Partie hachurée sur la fig 2.5.a.)

b) 2 tiges verticales:-

Soit D la distance entre les 2 tiges et h leur hauteur commune. Pour que les 2 tiges n'aient pas une action indépendante il faut que: $D < 2d$.

Deux cas sont alors à considérer.

* $d > h$ (fig 2.6.a)

Le cas le plus défavorable d'approche sera celui où le leader se présente à une distance " d " du plan formé par les 2 tiges. Quand la sphère de rayon " d " touche les 2 tiges, un cercle de rayon " r " sera formé dans le plan des 2 tiges. (fig 2.6.a)

Dans ces conditions, la hauteur protégée au centre vaut $H = d - \sqrt{(d-h)^2 + (D/2)^2} \dots (2-13)$

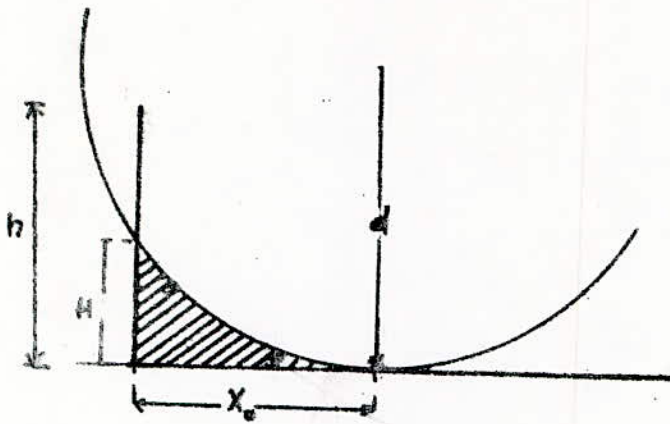


figure 2.6.b

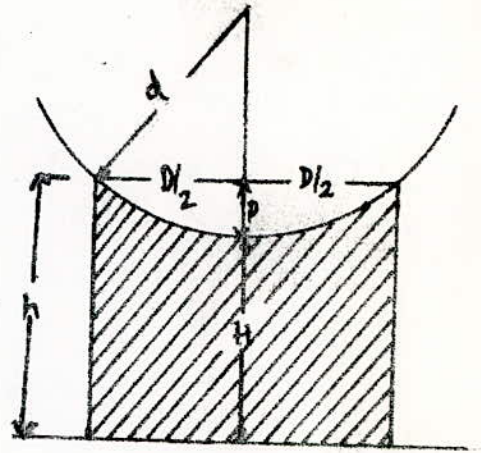
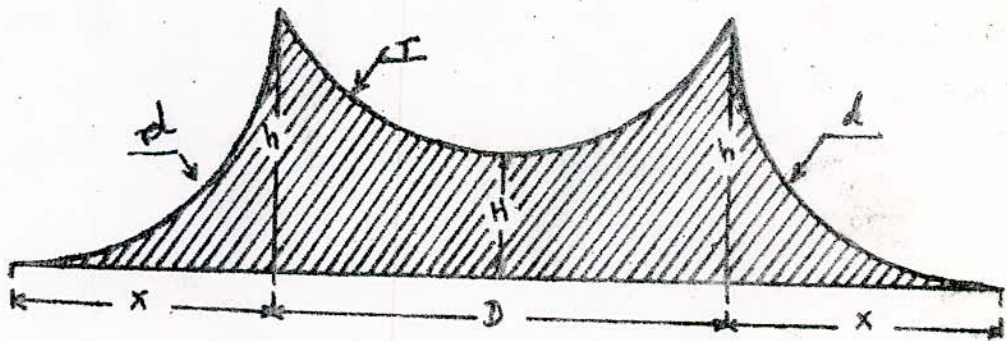


figure 2.6.c.
"approche verticale"



Cas de 2 tiges verticales en coupe

Le rayon protégé au sol sera alors :- (fig 2.6.b).

$$x_0 = \sqrt{2dH - H^2}$$

d'où $x_0 = \sqrt{(2dh - h^2) - (D/2)^2} \dots (2-14)$

* $d < h$

La hauteur protégée au centre vaut: (fig 2.6.d)
au centre $H = d - D/2 \dots (2-15)$

Le rayon protégé au sol :-

$$x_0 = \sqrt{2dH - H^2} = \sqrt{d^2 - (D/2)^2} \dots (2-16)$$

Remarque 1:-

Lors d'une approche verticale, le centre de la sphère vient perpendiculairement à la distance "D" (fig 2.6.c)

Alors $H = h - P$

avec $P = d - \sqrt{d^2 - (D/2)^2}$

d'où $\Rightarrow H = h - d + \sqrt{d^2 - (D/2)^2}$

Cette hauteur est supérieure à celle calculée précédemment lors d'une "approche horizontale".

c). 4 tiges verticales :-

La diagonale " $\sqrt{2} D$ " doit être inférieure à " d " si les tiges forment un carré de côté D . (fig 2.7) "Cela pour que le centre du carré ne soit pas touché."

À l'approche verticale, la hauteur protégée au centre "A" sera $H = h - d + \sqrt{d^2 - 2(D/2)^2} \dots (2-17)$

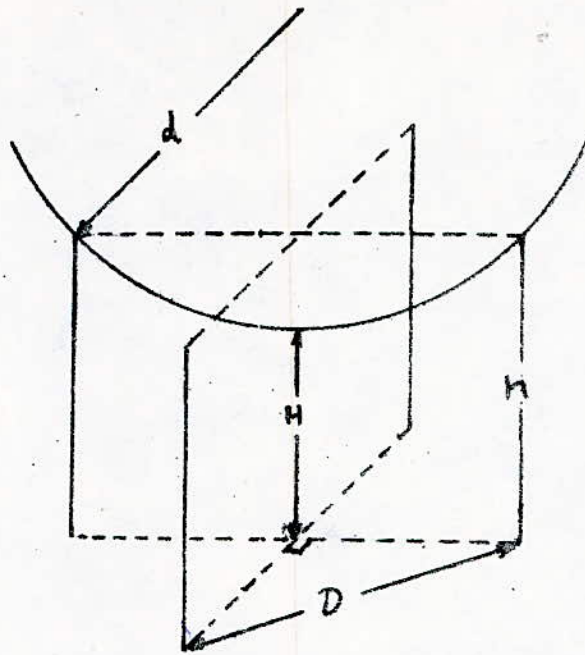


figure 2.7

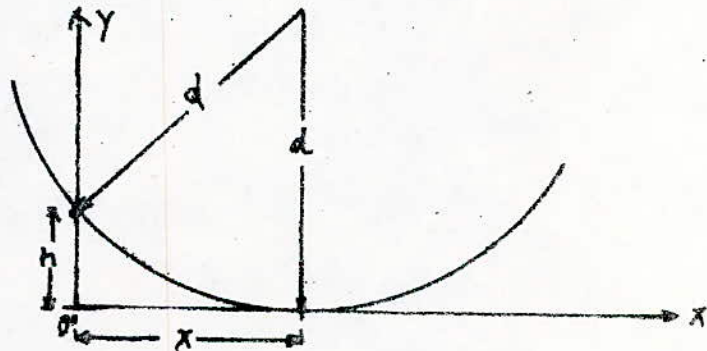


figure 2.8.a.

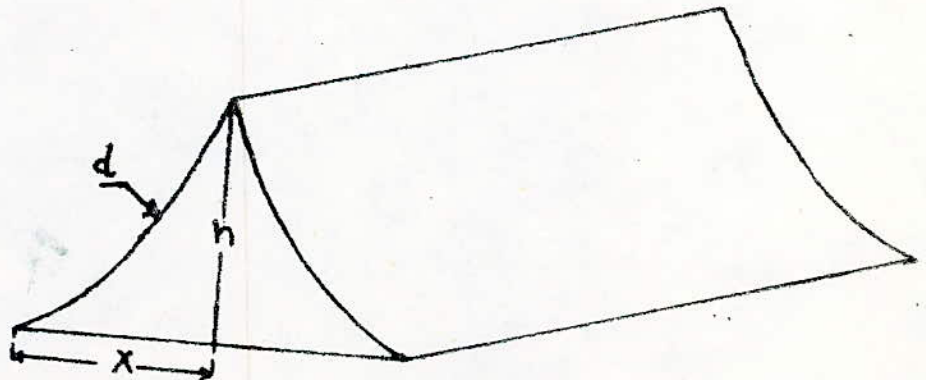


fig 2.8.b.

Pour l'approche horizontale, l'étude faite pour 2 tiges peut être reprise.

d) fil tendu horizontalement:-

Deux ^{cas} sont à considérer.

* Lorsque la hauteur "h" du fil est telle que $d \geq h$
La construction géométrique est celle présentée sur la figure (2.8.a)

La distance horizontale protégée par ce fil vaut: $x = \sqrt{2dh - h^2}$... (2.18)

Remarque:

La zone de protection a une symétrie axiale.

(fig 2.8.b)

* Si la hauteur "h" du fil est telle que $d < h < 2d$
la zone de protection se trouvera très réduite

(fig 2.8.c) - La hauteur maximale protégée sous le fil devient $H = 2d - h$... (2.19)

mais la distance protégée au sol reste toujours

$$x = \sqrt{2dh - h^2} \quad \dots (2.20)$$

e) Nappe de fils horizontaux:-

La hauteur minimale que protège la nappe de fils (fig 2.8.a et b) sera:-

$$H = h - y = h - d + \sqrt{d^2 - (D/2)^2} \quad \dots (2.21)$$

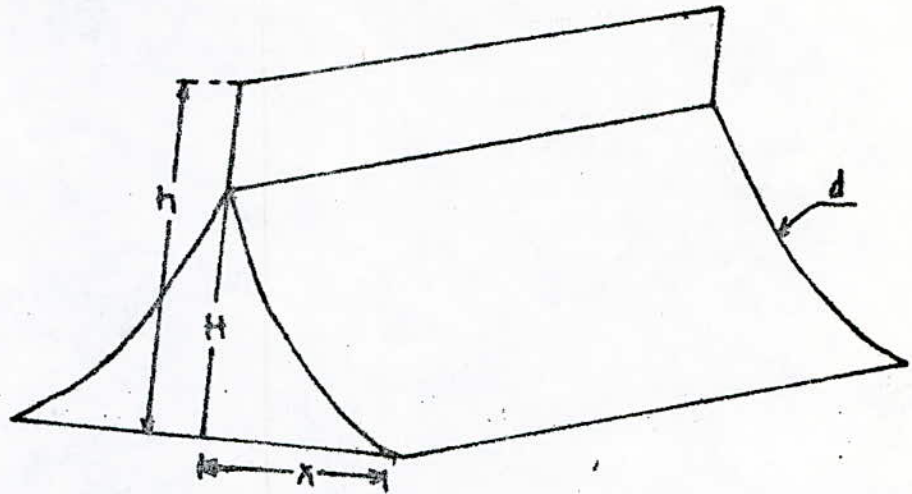


figure 2.8.c.

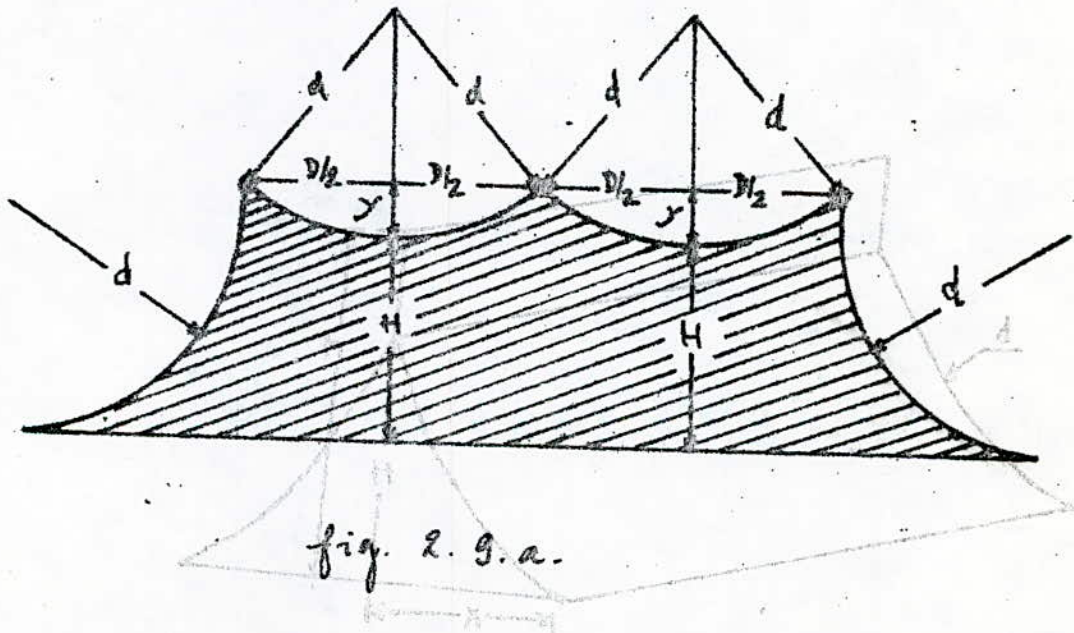


fig. 2.9.a.

figure 2.8.c

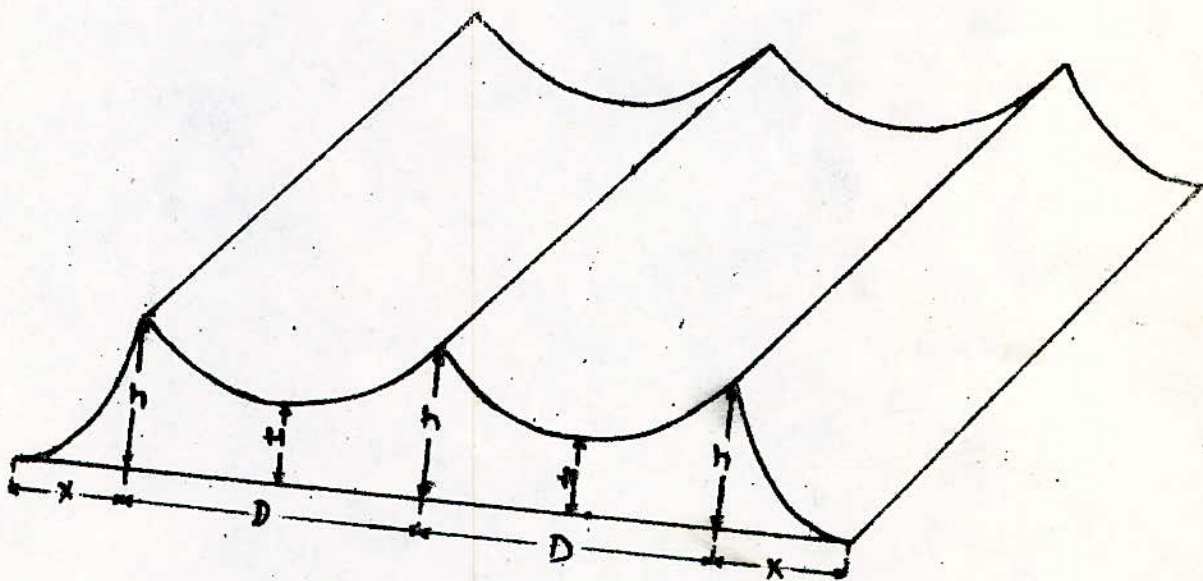


fig 2.9.b.

2. Les Conducteurs :-

Les conducteurs d'un paratonnerre doivent supporter les fortes intensités des courants de foudre. Leur section peut être estimée par la formule [16] :-

$$S = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{k} \quad (2.22)$$

avec: S : section du conducteur en $[mm^2]$

I : courant en $[A]$

t : durée d'application du courant en $[s]$

k : facteur dépendant de la nature du matériau utilisé [Tableau 2.1]

$$k = \sqrt{\frac{\rho_c \cdot (B+20)}{\rho_{20}} \ln \left(\frac{\theta_f - \theta_i}{B + \theta_i} + 1 \right)} \quad (2.23)$$

avec: θ_i : température initiale (ambiante) en $[^\circ C]$

ρ_c : capacité thermique volumique du matériau en $[J/^\circ C \cdot mm^3]$

ρ_{20} : résistivité électrique du matériau à $20^\circ C$ en $[\Omega \cdot mm]$

θ_f : température finale admissible du conducteur en $[^\circ C]$

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

Tableau 2.1: Valeurs servant pour le calcul de k :-

Matériau	B	ρ_c	ρ_{20}	θ_f
Cuivre	234,5	$3,45 \cdot 10^3$	$17,241 \cdot 10^{-6}$	200
Aluminium	228	$2,5 \cdot 10^3$	$28,264 \cdot 10^{-6}$	200
Acier	202	$3,8 \cdot 10^3$	$138 \cdot 10^{-6}$	200

3. Les prises de terre :-

La mise à la terre est la partie la plus importante et la plus délicate d'une installation de paratonnerre.

a) Conditions spéciales de l'écoulement des courants de foudre:

L'intensité de crête du courant de foudre peut, dans des cas extrêmes, dépasser les 100 kA. La raideur du front donne aux décharges de foudre les caractéristiques d'une onde de choc. Il en résulte que l'impédance du système de mise à la terre joue un rôle important dans l'écoulement de cette onde. Ainsi, les conducteurs seront le siège de potentiels considérables.

À la chute de tension inductive se superpose la chute de tension non inductive correspondant à la résistance propre de la prise de terre. En présence des différences de potentiels considérables qui prennent naissance sous les courants de forte intensité, cette résistance elle-même est assez notablement différente de celle qui peut être mesurée en courant continu.

On constate en effet que ces potentiels dépassent souvent de beaucoup la valeur de claquage du sol, de telle

sorte qu'il se produit autour de l'électrode et dans son voisinage des amorçages plus ou moins étendus dont l'effet est d'augmenter ses dimensions apparentes et donc de diminuer sa résistance. Cet effet est d'autant plus marqué que le terrain présente une résistivité plus grande; il peut dans certains cas abaisser de moitié la valeur effective de la résistance par rapport à celle relevée sous basse tension.

En regard de cette conséquence favorable, ces amorçages comportent deux risques dont il doit être tenu compte dans l'installation des prises de terre de paratonnerre. Le premier se rattache au cas général de l'élevation excessive de températures des électrodes de terre au passage du courant de foudre. Il peut aller jusqu'à produire une vitrification du sol, en constituant autour de la prise de terre une barrière isolante qui la rendra inopérante par la suite.

Le second risque est que, l'augmentation apparente et momentanée des dimensions de l'électrode s'étend jusqu'à des canalizations enfouies à proximité. Elle porte ainsi celles-ci à des potentiels très élevés.

b) Influence des prises de terre durant un choc de foudre :-

Quand la foudre touche une installation de paratonnerre, la répartition du potentiel qui en résulterait autour de l'électrode de terre n'est pas uniforme. Cette répartition décrit une courbe appelée "dôme de potentiel".

Entre 2 points voisins du sol se trouvant dans la zone d'influence de la prise de terre apparaît donc une différence de potentiel (fig 2.10). Cette d.d.p est appelée "tension de pas" (U_p) si les 2 points sont distants de 1m l'un de l'autre et dite "tension de contact" (U_c) si l'un des points se trouve sur le conducteur de descente et l'autre à 1m plus loin. [6, 17, 18], [14].

Dans l'installation des prises de terre, la tension de contact doit être réduite à une valeur non dangereuse pour les personnes. Des études [17] ont montré que la tension que supporterait l'être humain dépend de la durée de son application (fig 2.11.)

Pour un choc de foudre ayant comme durée 80 ms, une tension de 1 kV sera non dangereuse (fig 2.12).

Remarque :- Si on arrive à limiter la tension de contact, la tension de pas sera plus faible; en conséquence non dangereuse.

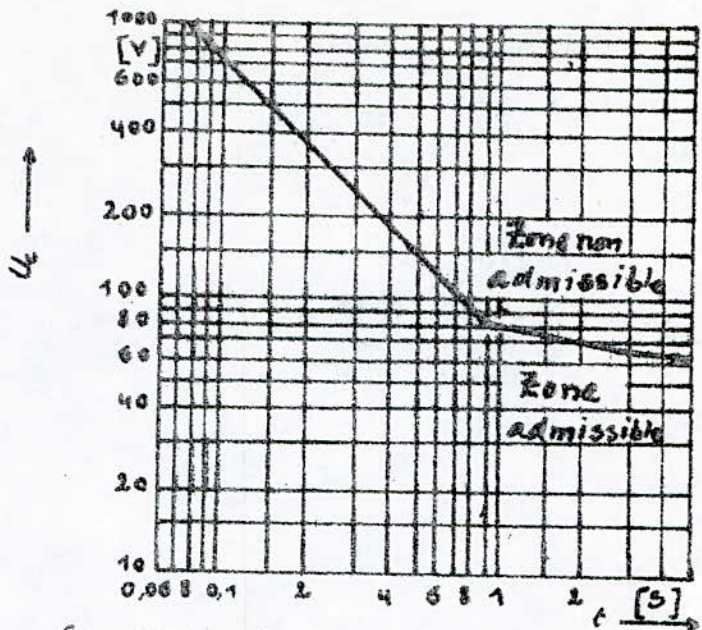


fig. 2.11 - Tension de contact en fonction de la durée de son application.

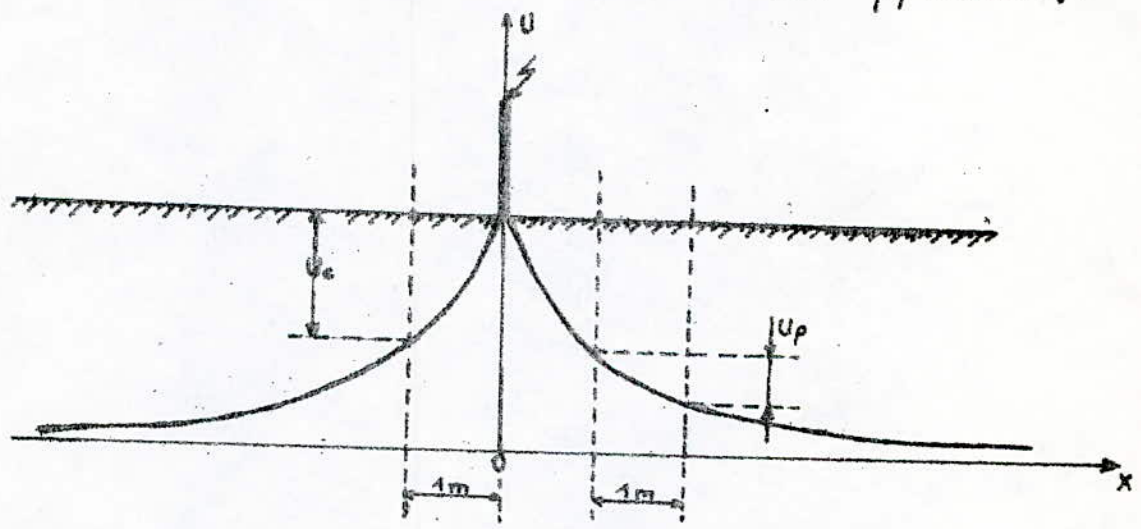


figure 2.10.: dôme de potentiel

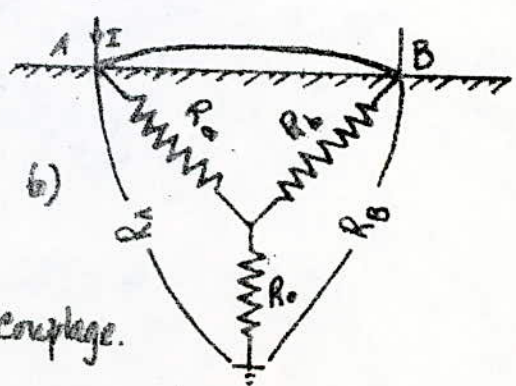
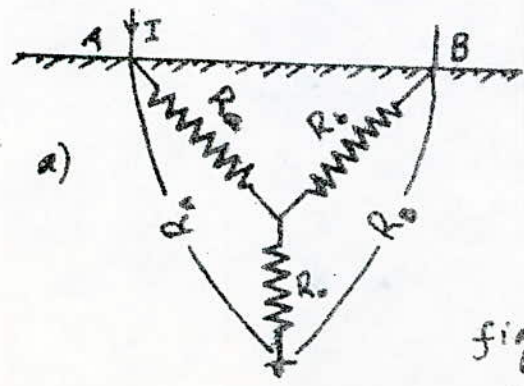


fig 2.12: Couplage.

c) Calcul de la prise de terre:-

Le "dôme de potentiel" autour d'un conducteur enfoncé verticalement dans le sol est donné par l'expression [18]:-

$$V(x) = \frac{\rho I}{2\pi L} \cdot \ln \left[\frac{(L+e) + \sqrt{(L+e)^2 + x^2}}{e + \sqrt{e^2 + x^2}} \right] \quad (2.24)$$

avec: ρ : résistivité du sol en $[\Omega \cdot m]$.

I : Courant de crête en $[A]$

L : longueur du conducteur en $[m]$

e : profondeur d'enfoncement en $[m]$

x : distance entre le conducteur et un point du sol voisin en $[m]$.

La résistance de la prise de terre s'exprime par la relation: $R = V(0)/I$ en ayant comme condition la tension de contact inférieure à 1000V.

$$U_c = V(0) - V(1) \leq 1000$$

$$\Rightarrow \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{1 + \sqrt{1+e^2}}{1 + \sqrt{1+(L+e)^2}} \leq 1000 \quad (2.25)$$

d'où l'on peut choisir les couples (L, e) .

et la résistance de terre a pour expression finale:-

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(1 + \frac{L}{e} \right). \quad (2.26)$$

d) Problème de la séparation ou de la connexion des différentes mises à la terre en cas de choc de foudre:-
Dans les bâtiments équipés d'appareillages électriques, les différentes mises à la terre ont des effets:

l'une sur l'autre même si elles sont apparemment indépendantes.

En effet, si deux ou plusieurs électrodes sont implantées, il se produira une interpénétration des surfaces équipotentiels entre lesquelles peuvent se manifester des chutes de tension. Ces électrodes exerceront les unes sur les autres une influence mutuelle. Les conséquences ne seront pas identiques selon qu'elles soient reliées entre elles ou qu'elles soient au contraire reliées à des systèmes électriques différents.

Si, ces électrodes sont reliées à des systèmes électriques différents, elles présenteront entre elles un effet de couplage, c'est à dire que l'écoulement d'un courant à travers l'une d'elle dite alors active provoquera une élévation du potentiel des autres dites passives. Sa valeur de ce potentiel sera égale au produit de la résistance de la zone commune (R_0) par l'intensité du courant écoulé. Donc, c'est la résistance (R_0) qui fixe le potentiel de l'une quand l'autre écoule un courant "I". (fig 2.12. a)

Si l'électrode "A" écoule un courant "I", "B" se trouvera portée à un potentiel " $R_0 I$ ", autrement dit à une fraction R_0/R_A du potentiel de "A". (fig 2.12. a).

Dans le cas où "A" et "B" sont connectées (fig 2.12. b),

le potentiel de "A" sera directement transmis à "B" et il n'y aura plus d'interpénétration entre "A" et "B".

Il résulte de ce qui précède qu'il faut réduire au minimum la résistance de la prise de terre et il faut qu'il y ait un écartement suffisant entre les parties métalliques reliées indépendamment à la terre et la descente de foudre. Si cela n'est pas possible à réaliser, le seul moyen d'empêcher les claquages est de relier électriquement par conducteurs, la descente de foudre avec les parties mises à la terre indépendamment.

Connaissant à présent la méthode de calcul d'une protection par paratonnerres, on peut alors procéder à l'étude de la protection du laboratoire à haute tension de l'E.N.P. Ce sera le contenu du chapitre 3.

Chapitre 3 : PROTECTION CONTRE LA Foudre DU LABORATOIRE A HAUTE TENSION DE L'E.N.P.A.

3.1 :- Configuration du bâtiment :-

Comme le laboratoire à haute tension de l'école ne se trouve pas isolé (fig 3.1), on propose la protection de tout le bâtiment à l'intérieur duquel il se trouve, y compris la partie qui abrite l'atelier du bois et le département de génie civil.

Avant d'aborder les calculs de protection nous allons estimer les risques de foudroiement et d'échec de protection du bâtiment.

a / Sévérité tragique :-

Afin de déterminer le risque d'échec d'une protection dont les calculs sont basés sur ^{une} certaine crête de courant, il est nécessaire de connaître la fréquence de foudroiement du bâtiment [2].

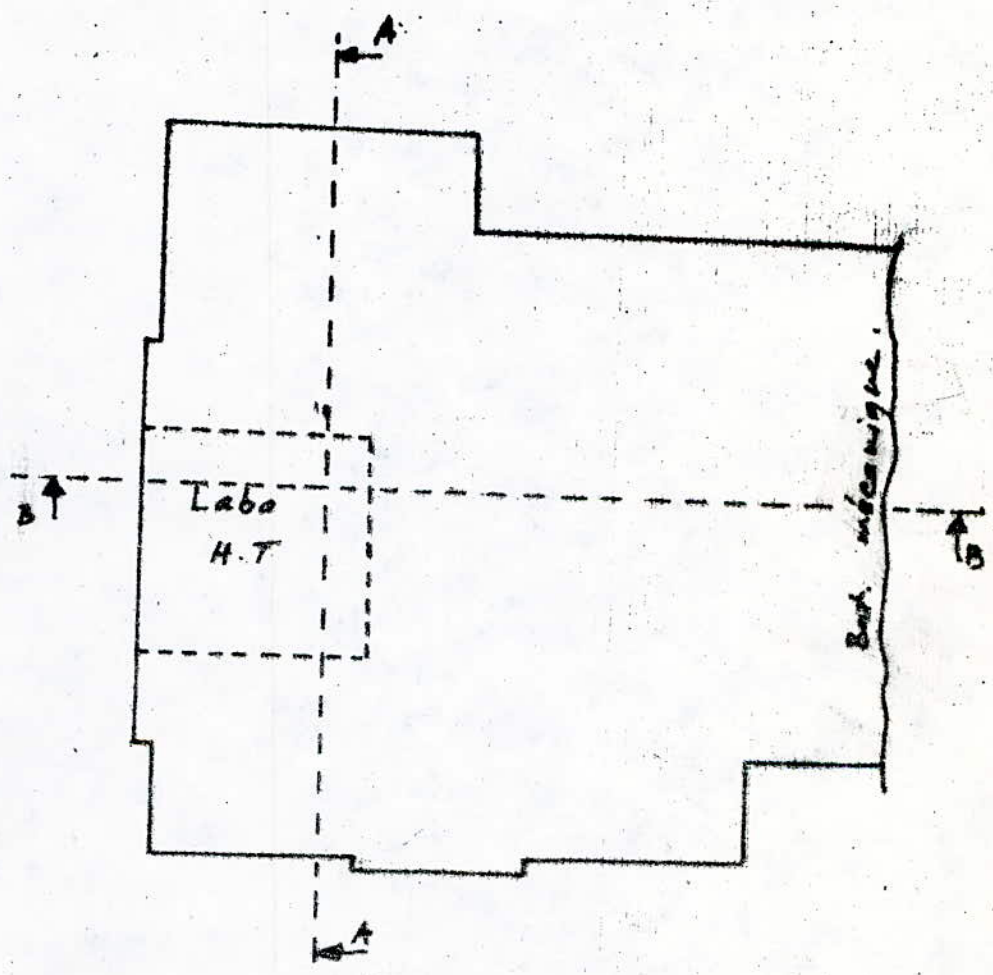
- Niveau céraunique :- En se basant sur les données, s'étalant sur une période de 23 ans (1961 à 1984), fournies par la station météorologique de Der-El-Beida, on a trouvé un niveau céraunique moyen de la région d'Alger

$$N_k = 43 \text{ jours orageux par an.}$$

- Densité de coups de foudre au sol :

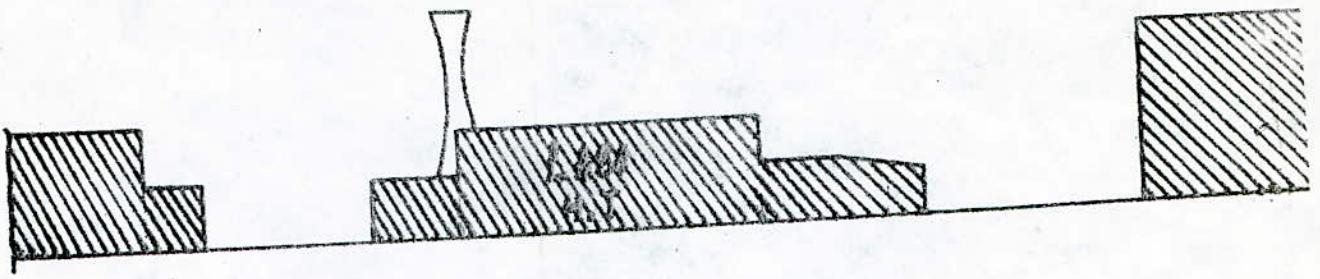
Et application de l'expression $N_g = 0,023 N_k^{1,3}$ donne :-

Bat. Sciences
fondamentales.

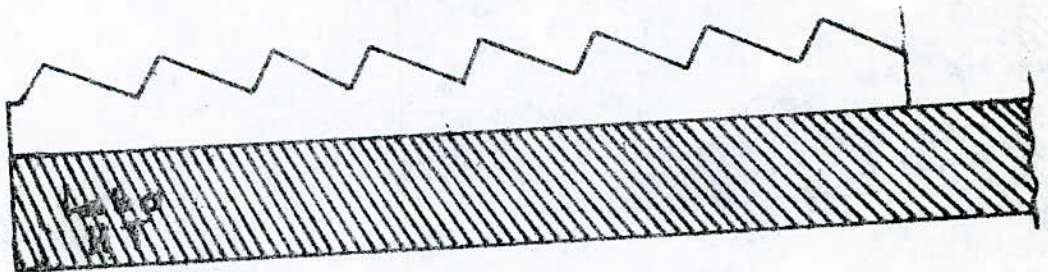


Bat. Hydraulique.

fig 3.1 Plan de masse (échelle 1/500)



a) Coupe A-A



b) Coupe B-B

fig 3.2.

$N_5 = 3$ coups par km² et par an.

- Fréquence de foudroiement :-

La formule: $N_f = N_5 (5 \cdot 10^{-6} + k_1 \cdot B + k_2)$ donne $N_f \approx 0,05$ coups par an
ce qui équivaut à un coup de foudre tout les 20 ans.

b) Le risque d'échec d'une protection :-

La probabilité globale qu'a une crête de courant de foudre d'être inférieure à une certaine valeur est égale à :

$$100 - \varphi_T = 100 - 10^{(2 - I/60)} \text{ en } [\%].$$

Le risque d'échec sera alors :-

$$R = N_f \cdot \frac{1}{100} (100 - \varphi_T) \text{ échecs par an. [Tabl. 3.1].}$$

Tableau 3.1 : Risque d'échec d'une protection en fonction de la crête de courant

$I [kA]$	2	5	14	105
$R [\text{ech/an}]$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$

Notons que les risques calculés ne sont pas rigoureux mais permettent toutefois de se fixer sur la protection à adopter en fonction de l'importance de l'objet à protéger.

En tenant compte de ce qui a précédé c'est à dire la fréquence de foudroiement du bâtiment (1 coup tous les 20 ans) et le risque d'échec, il se dégage alors la nécessité de la protection du laboratoire qui contient

un matériel très important. Cette protection doit être efficace.

Vu la configuration du bâtiment et ses alentours, on peut songer à plusieurs modes de protection (fig 3.1 et 3.2)

2.2 : Protection à tige -

a) à l'aide de tiges placées sur les points hauts des bâtiments qui l'entourent: On sait, d'après le modèle électro-géométrique, que le rayon, au sol, protégé par une tige de hauteur h est $x_0 = \sqrt{2dh - h^2}$.

Soit le sol - dans notre cas - le plan, parallèle à l'horizontale, reposant sur la toiture du bâtiment à protéger. Sa hauteur à considérer, pour calculer le rayon de la zone protégée à ce niveau, serait égale à la hauteur de la tige mise en place plus la différence de hauteur entre le bâtiment voisin (sur lequel la tige est placée) et le plan (fig 3.3)

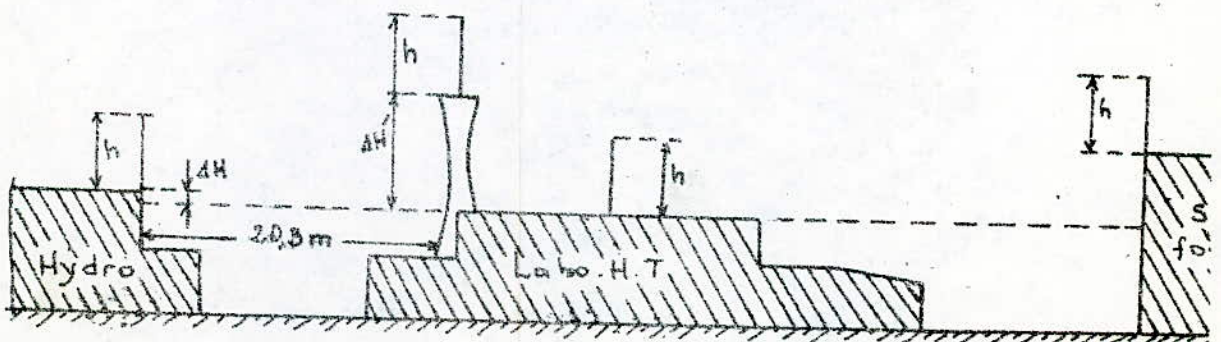
$$H = \Delta H + h \rightarrow x = \sqrt{2dH - H^2}$$

En supposant des tiges de 2m, le calcul des différents rayons offerts (Tableau 3.2) montre que la protection ne sera assurée que pour les très forts courants ($I > 80 \text{ kA}$). Ceci est dû au fait que la distance qui sépare chaque bâtiment du laboratoire est trop grande devant la distance d'amorçage des faibles courants.

Remarque: Même à l'aide de hautes tiges, la protection ne pourrait avoir lieu pour le cas de coups de foudre à faibles courants.

Tableau 3.2 : différents x 'offerts par des tiges de 2 m placées sur les bâtiments voisins.

I (kA)	2	5	14	30	50	80
d (m)	15	27	54	90	127	174
x_1 [m] (hydraulique)	9	13	18	24	28	33
x_2 [m] (S.C. Fondamentale)	13	20	29	39	46	54
x_3 [m] (chât. d'eau)	15	23	35	46	55	65
x_4 [m] (mécanique)	11	15	22	29	34	40
x_5 [m] (Labo. H.T)	7	10	14	19	22	26



b) A l'aide de tiges placées sur la toiture du bâtiment protéger : On sait que la hauteur protégée, par 4 tiges, au centre du carré (fig 3.4) vaut $(h-P)$

avec $P = d - \sqrt{d^2 - r^2}$.

Cette hauteur doit être, toujours telle que $h - P > 0$ ($h > P$) pour que la protection soit garantie.

$$P = d - \sqrt{d^2 - r^2} < h$$

$$(d-h)^2 < d^2 - r^2$$

$$\Rightarrow r < \sqrt{2dh - h^2}$$

or $r = \sqrt{2 \left(\frac{x}{2}\right)^2} = x/\sqrt{2}$ avec x distance entre les tiges

ceci donne : $x < \sqrt{4dh - 2h^2}$

Ainsi on pourra chercher le nombre de tiges de hauteur donnée nécessaires pour protéger une surface S , ayant pour longueur A et largeur B , d'une décharge de foudre d'intensité quelconque.

soit N le nombre de tiges le long de la longueur

$$N = 2 + [A/x] \text{ avec } [A/x] \text{ partie entière de } A/x.$$

et M le nombre de tiges le long de la largeur :

$$M = 2 + [B/x] \text{ avec } [B/x] \text{ partie entière de } B/x.$$

D'où le nombre totale de tiges qu'il faut prévoir pour protéger toute la surface S : $L = M \cdot N$.

Ce calcul sera appliqué pour la protection du niveau

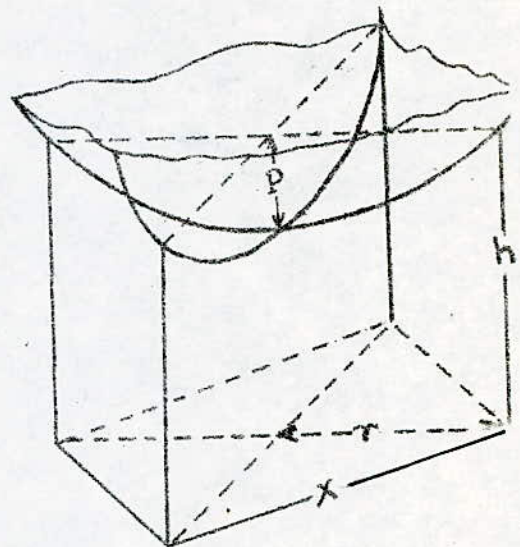


fig 3.4.

haut de la toiture (Tableau 3.32b). Par contre la protection des côtés et du niveau bas de la toiture doit être considérée séparément

1) Côté hydraulique:-

Pour que la protection soit efficace sans mettre de tiges sur le niveau bas, il faut que le rayon qu'offrirait $(h+4,1)$ avec $\left\{ \begin{array}{l} h \text{ hauteur de la tige installée sur le niveau haut} \\ 4,1: \text{ différence de hauteur entre les 2 niveaux.} \end{array} \right.$ soit supérieure à 15 m. Dans le cas contraire, il faut chercher le nombre de tiges qu'on doit placer sur le bord du niveau bas. Pour cela, soit le cas le plus défavorable d'approche - la pointe du traceur vient perpendiculairement au milieu de l'intervalle séparant les 2 bâtiments (fig 3.5.a). Alors une sphère de rayon d pénétrera de J au dessous du plan formé par les 2 bords (bat. hydraulique et celui du labo) - $J = d - \sqrt{d^2 - 7,5^2}$ (fig 3.5.b)

Supposons, à présent, 2 tiges de hauteur k chacune, sur le bord. Si celles-ci sont séparées d'une distance $2s$ (fig 3.5.c), la hauteur G qu'elles protègent au niveau du bord est:

$$G = d - \sqrt{(d - (k+J))^2 + s^2}$$

Afin de garantir la protection du bord il faut que $G > J$
d'où $s < \sqrt{k(2\sqrt{d^2 - 7,5^2} - k)}$

Ainsi le nombre de tiges sur le bord sera

$$z = 2 + \left[\frac{39}{25} \right] \left[\frac{39}{25} \right] \text{ partie entière de } \frac{39}{25}$$

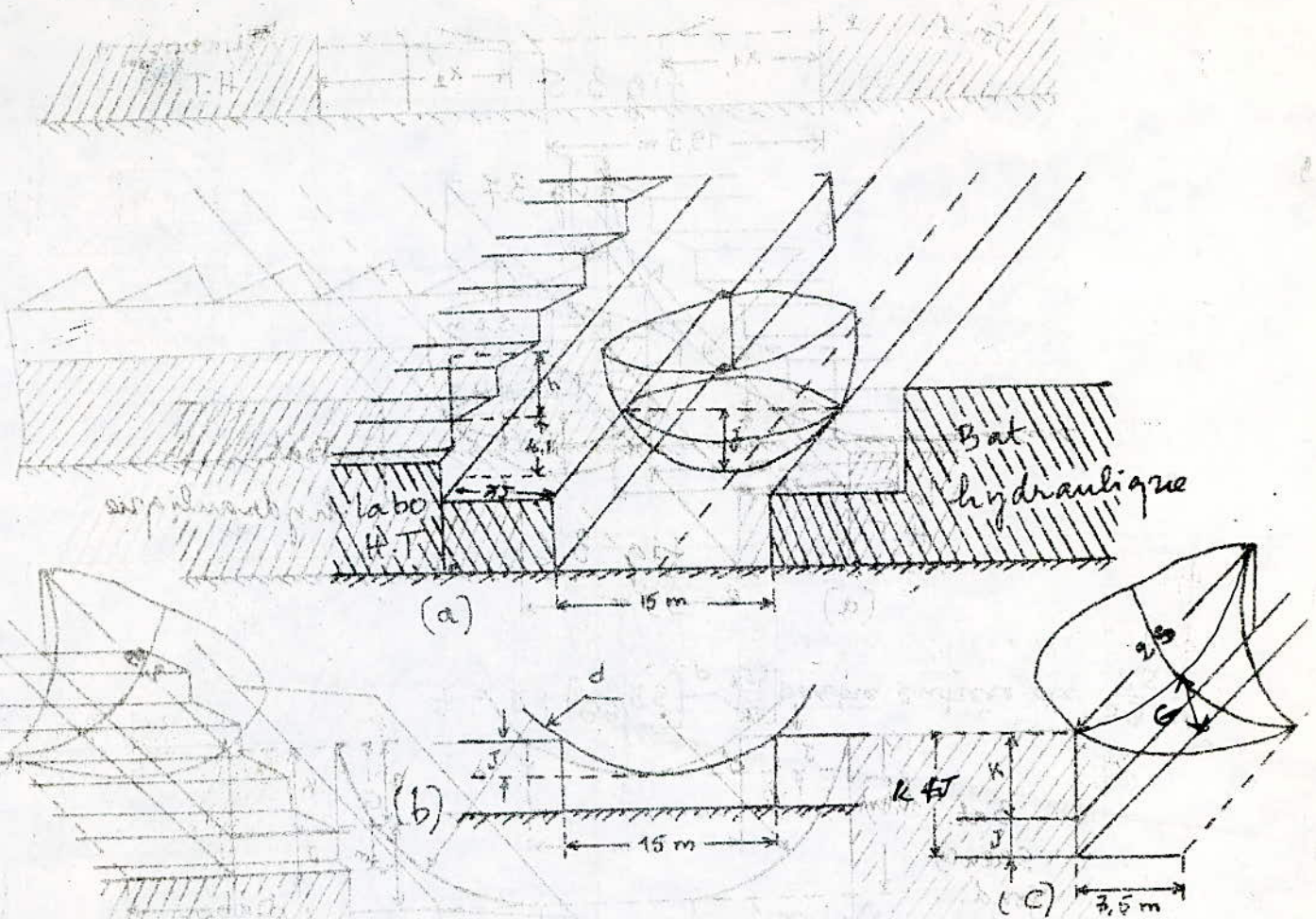


fig 3.5

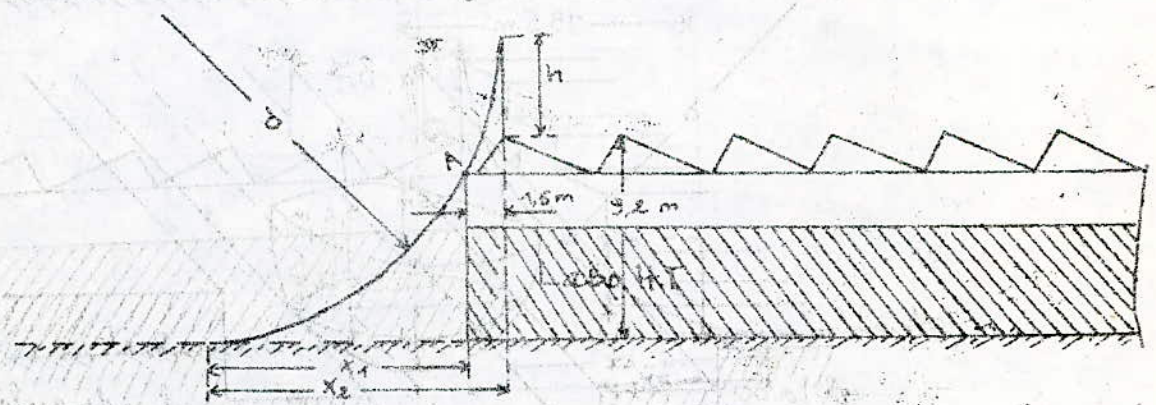
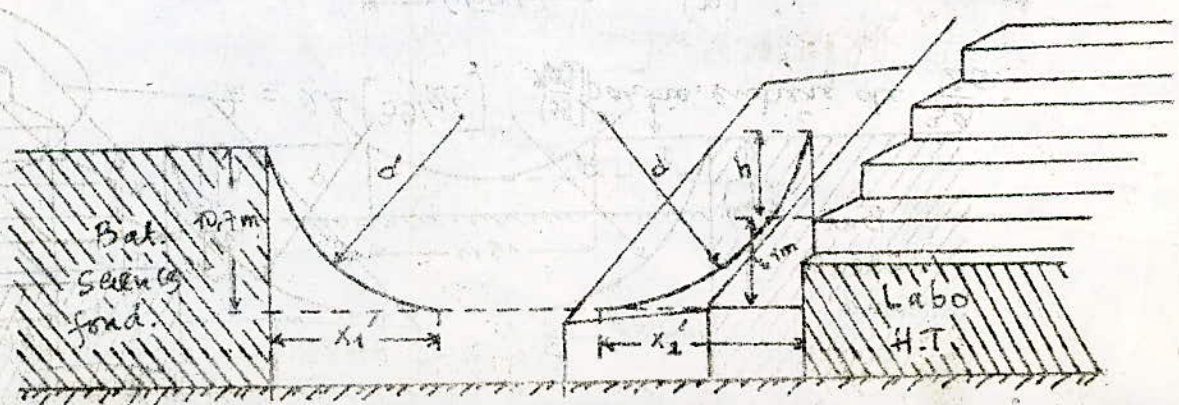


fig 3.6



2) Côté Château d'eau :-

De ce côté, on doit chercher la hauteur minimale de la tige sur le niveau haut, qui assurera la protection du bord (point A sur la (fig 3.5)) dans le cas d'approche horizontale

$$\text{alors } x_1 = \sqrt{2 \cdot d \cdot 7,4 - 7,4^2}$$

$$x_2 = \sqrt{2 \cdot d \cdot (9,2+h) - (9,2+h)^2}$$

Pour garantir la protection du bord, il faut que

$$x_1 + 1,5 \leq x_2$$

Ce qui donne :-

$$h > d - 9,2 - \sqrt{(d - 7,4)^2 - 1,5^2} - 3\sqrt{d^2 - (d - 7,4)^2}$$

Pour $I = 2 \text{ kA}$, h doit être supérieure à 1,7 m.

Remarque :- Plus le courant augmente, plus h_{min} diminue

Pour $I \geq 5 \text{ kA}$ le point ne sera jamais touché même

s'il n'y a pas de tiges sur le niveau haut.

3) Côté bâtiment des sciences fondamentales :-

Si la somme $(x'_1 + x'_2)$ [fig 3.7] pour un courant donné est inférieure à 34 m, il faut placer des tiges sur le niveau bas afin d'assurer sa protection.

$$\text{avec } x'_1 = \sqrt{2d \cdot 10,7 - 10,7^2}, \quad x'_2 = \sqrt{2d(h+4,1) - (h+4,1)^2}$$

on doit prévoir des tiges de hauteur k' séparées de $2 \cdot 5'$

$$\text{tel que } 5' < \sqrt{2k' \sqrt{d^2 - (27 - x'_1)^2}} \leq k'^2$$

d'où le nombre de tiges :

$$z' = 2 + \lceil \frac{38}{2 \cdot 5'} \rceil$$

Vu la longueur des calculs, on a établi un programme qui permet de chercher H, L, k, z en fonction de I :-

```
10 A = 39
20 B = 27
30 FOR I = 2 TO 700 step 3
40 IF I > 14 then let I = I + 10
50 FOR H = 1 TO 9 step 0,5
60 C = 2/3
70 D = 9,4 * I^C
80 X = SQR(4 * D * H - 2 * H^2)
90 N = 2 + INT(A/X)
100 M = 2 + INT(B/X)
110 L = N * M
120 IF H > 1 then 210
130 E = H + 4,1
140 F = SQR(2 * D * E - E^2)
150 FOR k = 0,25 TO 2 step 0,25
160 S = SQR(k(2 * SQR(D^2 - 7,5^2) - k))
170 Z = 2 + INT[A/(2 * S)]
180 IF F > 75 then 210
190 LPRINT I, L, H, k, Z
200 Next k
210 LPRINT I, L, H
220 NEXT H
230 NEXT I
240 LLIST
250 STOP
260 END
```

On réunit les résultats obtenus sous forme de tableaux :

Tableau 3.3 : $I = 2 \text{ kA}$.

L	h(m)
20	2
12	3,5

z	9	7	6	5	4
k(m)	0,25	0,5	0,75	1	2

z'	12	9	7	6	5
k'(m)	0,25	0,5	0,75	1,25	2

Tableau 3.4 : $I = 5 \text{ kA}$.

L	20	12	9	6
h(m)	1	2	4	8

z	2
k(m)	0,25

z'	2
k'(m)	0,25

Tableau 3.5 : $I = 14 \text{ kA}$.

L	12	9	6	4
h(m)	1	2	3,5	7,5

z	2
k(m)	0,25

z'	2
k'(m)	0,25

Tableau 3.6 : $I = 105 \text{ kA}$.

L	6	4
h(m)	1	2

z	2
k(m)	0,25

z'	2
k'(m)	0,25

3.3 - Protection à l'aide d'une cage maillée:-

Le meilleur moyen de réaliser une cage parfaite serait d'entourer (couvrir) entièrement l'objet à protéger à l'aide de tôles conductrices et de mettre celles-ci à la terre. Comme le coût d'une telle installation est très élevé, on opte pour un maillage régulier à l'aide de conducteurs électriques de sections suffisantes et l'installation de pointes captrices de faibles hauteurs au points vulnérables de l'objet à protéger.

Pour la cage du laboratoire à haute tension, nous allons chercher la hauteur (h) des conducteurs, par rapport à la toiture, en fonction de la distance (x) de ceux-ci du bord.

a) Côté bâtiment hydraulique: (fig 3.8)

$$J = d - \sqrt{d^2 - 7,5^2}$$

$$h = d - J - \sqrt{d^2 - (7,5+x)^2}$$

Pour garantir la protection du

bord il faut que $h > d - J - \sqrt{d^2 - (7,5+x)^2}$

$$\text{d'où } h > \sqrt{d^2 - 7,5^2} - \sqrt{d^2 - (7,5+x)^2}$$

ou si on veut imposer la

hauteur:

$$x < \sqrt{7,5^2 + h(2\sqrt{d^2 - 7,5^2} - h)} - 7,5.$$

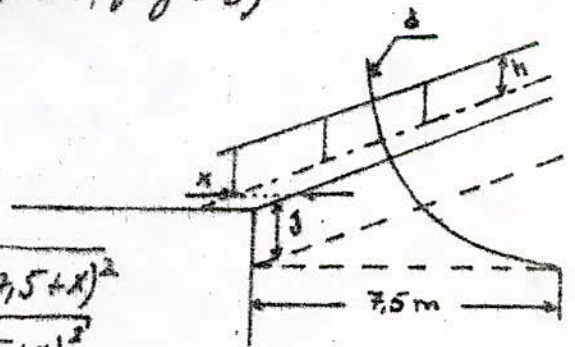


Fig (3.8)

b) Côté château d'eau: (fig 3.9)

$$x_1 = \sqrt{2Pd - P^2}$$

$$x_2 = \sqrt{2d(P+h) - (P+h)^2}$$

La Condition de protection sera:

$$x'_1 < x_2 - x_1$$

$$d'où \quad x'_1 < \sqrt{(P+h)(2d - (P+h))} - \sqrt{2dP - P^2} \quad \text{fig (3.9)}$$

P prend 2 valeurs:

$P_1 = 5,1 \text{ m}$ pour le niveau bas de la toiture.

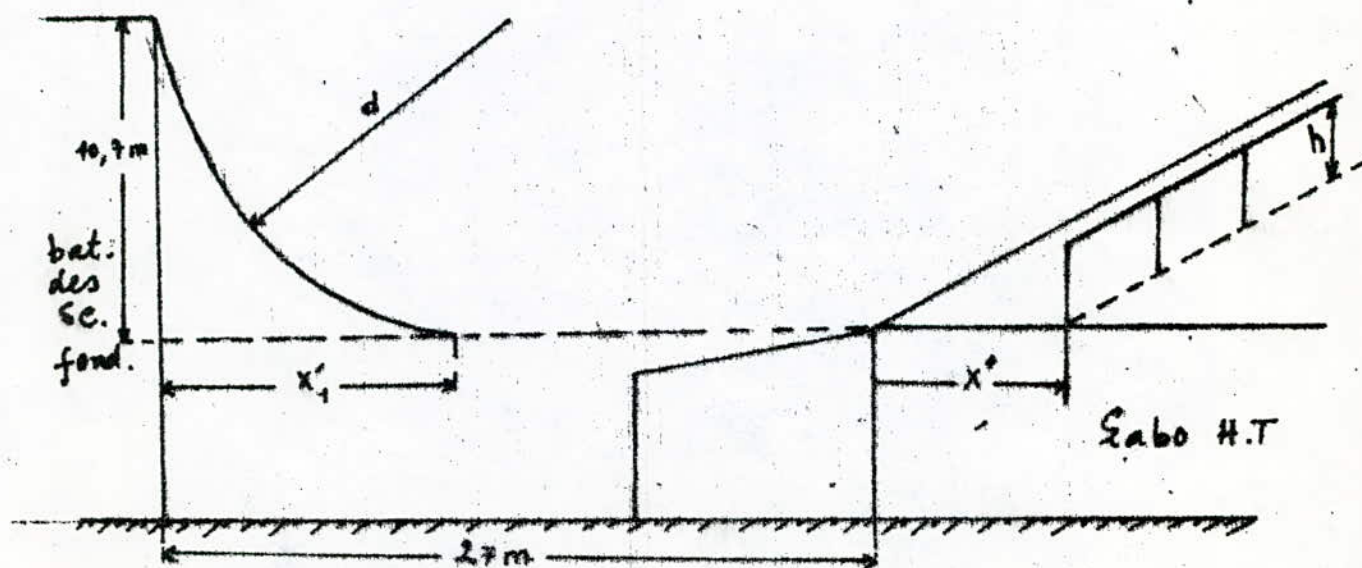
$P_2 = 7,4 \text{ m}$ pour la base des faitages. (Tabl. 3.8).

c) Côté bâtiment des sciences fondamentales: (fig 3.10)

$$x'_1 = \sqrt{2d \cdot 10,7 - 10,7^2}$$

La condition de protection:

$$x'' < \sqrt{(27 - x'_1)^2 + h(2\sqrt{d^2 - (27 - x'_1)^2} - h)} - (27 - x'_1) \quad \text{(tabl 3.9)}$$



fig(3. 10)

d) La hauteur des conducteurs sur le toit supérieur. (fig 3.11)

Pour que la protection soit assurée, dans le cas où l'on fait suivre chaque faitage par un conducteur, la hauteur des conducteurs doit être telle que:

$$h_1 > d - \sqrt{d^2 - 2,5^2}$$

mais si, on voudrait placer un conducteur tout les 10m (2 faitages) :-

$$h_2 > d - \sqrt{d^2 - 5^2}$$

pour les 10m de faitage

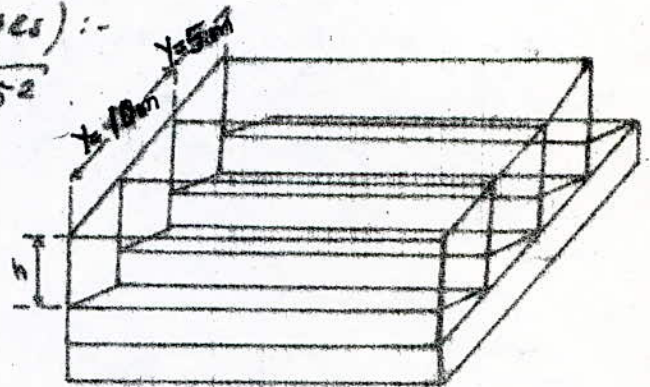


fig (3.11)

Nous présentons les résultats des calculs sous formes de tableaux:

a) Tableau 3.7 : Côté hydraulique $x = f(h, I)$

$I(kA) \backslash h[m]$	2	5	14	105
0,1	0,1	0,3	0,6	2,4
0,2	0,3	0,6	1,3	4,3
0,3	0,4	0,9	1,9	5,9
0,4	0,6	1,2	2,4	—
0,5	0,8	1,5	2,9	—

b) Côté charreau d'eau :- $X'(Y_1), X'(Y_2) = f(L, I)$

Tableau (3.8).

$I(kA)$ $h(m)$	2		5		14		105	
	$P_1=5,1$	$P_2=7,4$	$P_1=5,1$	$P_2=7,4$	$P_1=5,1$	$P_2=7,4$	$P_1=5,1$	$P_2=7,4$
0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,15	0,4	0,35
0,2	0,15	0,1	0,25	0,2	0,4	0,3	0,85	/
0,3	0,25	0,15	0,4	0,3	0,6	0,5	1,3	/
0,4	0,3	0,2	0,5	0,4	0,8	/	1,9	/
0,5	0,4	0,25		0,5	1	/	2,15	/

c) Côté sciences fondamentales :- valeurs de $X' = f(h, I)$

Tableau (3.9).

$I(kA)$ $h(m)$	2	5	14	105
0,1	0,05	0,45	3,3	6,4
0,2	0,1	0,9	4,6	/
0,3	0,15	1,3	5,7	/
0,4	0,2	1,7	/	/
0,5	0,25	2	/	/

d) Toit supérieur :- valeurs de h_1 et h_2 .

Tableau (3.10).

$I(kA)$ $Y(m)$	2	5	14	105
5 h_1 (cm)	0,2	0,1	0,1	0,1
10 h_2 (cm)	0,8	0,5	0,25	0,1

3.4: Choix de la protection:-

Après l'étude de chaque type de protection possible, nous avons préféré la protection à l'aide d'une cage maillée qui est plus facile à réaliser. En effet, la répartition des tiges sur le toit n'est pas aisée puisque celui-ci n'est pas plat. Sur la longueur du bâtiment, il n'existe que huit (08) faitages sur lesquels il est difficile de fixer les tiges et de les répartir uniformément. Cette configuration particulière pourrait nous amener à surdimensionner l'installation car on doit ajouter des tiges supplémentaires afin d'assurer la protection totale du bâtiment.

En plus de cela, les tiges doivent être reliées entre elles pour répartir le courant de foudre sur les différentes descentes ce qui constituera une cage supplémentaire.

a) dimensionnement de la cage:-

En se basant sur le risque d'échec de la protection que présente chaque crête de courant et la quantité de matériel nécessaire pour réaliser la cage qui lui correspond, on a retenu la valeur de 2 kA qui est d'ailleurs la plus faible crête de courant, pratiquement envisageable [2]. Ceci permettra une très bonne protection.

Afin que la fixation des conducteurs de toiture ne soit pas onéreuse, on a imposé une distance minimale qui les séparerait du bord ($x_{\min} = 10 \text{ cm}$).

A partir des résultats de calculs (Tableau 3.7 à 3.10), on trouve que la hauteur des conducteurs doit être au moins égale à 20 cm.

En adoptant cette valeur pour l'exécution de toute la cage, on doit respecter alors :-

$$x = 30 \text{ cm}, x'_1 = 0,15 \text{ m}, x'_2 = 10 \text{ cm}, x^0 = 10 \text{ cm}, y = 5 \text{ m}.$$

b) section des conducteurs :-

Comme l'installation risque d'être foudroyée par des décharges très intenses, la section des conducteurs doit être dimensionnée en conséquence.

On suppose que le courant de foudre sera réparti sur les différentes descentes.

Pour une crête de 150 kA, le courant sera de l'ordre de 15 kA sur chacune des 10 descentes. En admettant que cette valeur persiste pendant 0,2 s, la section minimale d'un conducteur en cuivre sera alors

$$S = \frac{\sqrt{15^2 \cdot 10^3 \cdot 0,2}}{\sqrt{\frac{3,45 \cdot 10^{-2} (243,5 + 20)}{17,241 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln\left(\frac{200 - 20}{243,5 + 20} + 1\right)}} \approx 41 \text{ mm}^2$$

$$\text{donc } S \geq 41 \text{ mm}^2$$

La norme (UTE C 97-100) recommande l'utilisation de rubans 3×20 mm.

d) Prise de terre :

Chaque conducteur de descente sera doté d'une prise de terre. Les différentes prises de terre seront reliées par un conducteur de même section que les conducteurs de descentes.

Le calcul se fera pour une descente en supposant que la crête du courant peut atteindre 45 kA.

On impose une longueur du piquet de terre égale à 2 m et on cherche la valeur de "e" [profondeur d'enfoncement] qui satisfait l'expression (2-25).

Comme nous n'avons pas pu mesurer la résistivité du sol, par manque de moyens adéquats, nous faisons les calculs pour différentes valeurs de la résistivité du sol "S". (Tableau 3.44)

S ($\Omega \cdot m$)	50	100	150	200	250	300
e (m)	4	4,5	5	6	6,5	7

Tableau 3.44 : profondeur d'enfoncement de piquet de 2 m pour différentes résistivités.

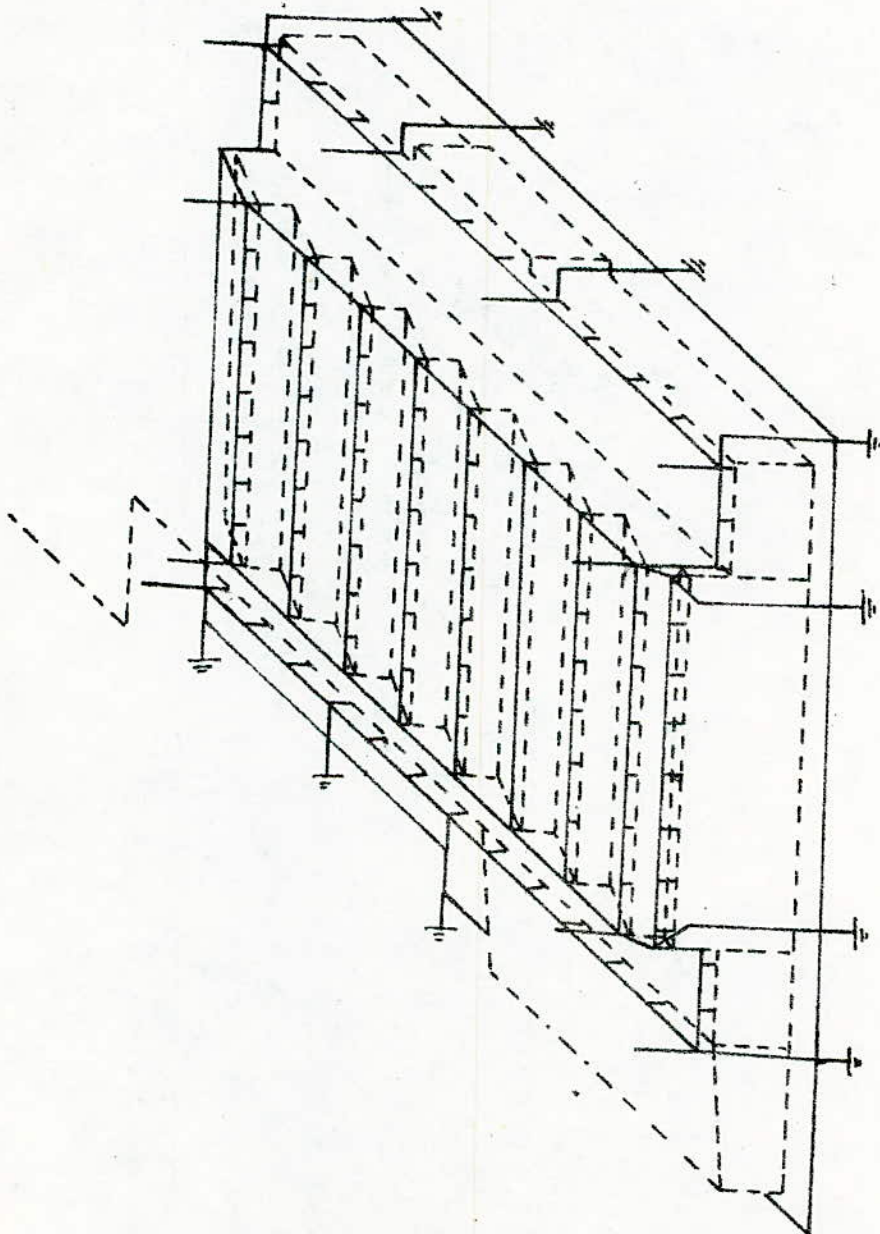


figure 3.12 : Schéma de la cage de protection.

Conclusions

Ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le phénomène de foudre et les moyens de protection contre l'atteinte de la foudre.

La protection calculée, par le modèle électro-géométrique, pour une certaine crête de courant de foudre perdra de son efficacité pour les décharges moins intenses.

Dans le cas d'une protection à tige, l'augmentation de la hauteur n'a plus d'effet sur la zone de protection dès que la distance d'amorçage est inférieure à la hauteur de la tige.

Il est vérifié que, pour les bâtiments de grandes surfaces, la protection à cage est mieux adaptée et que l'efficacité d'une protection est liée à la qualité de la prise de terre.

Les bâtiments entourant le laboratoire contribuent dans sa protection et vu la configuration de son toit, la protection à cage serait plus commode.

Comme le risque de foudroiement est élevé, il serait nécessaire de passer à la réalisation de la protection et de penser à protéger les autres bâtiments de l'école (Amphis, centre de calcul, bibliothèque, direction, ...).

Nous espérons la généralisation de la protection contre la foudre à l'échelle nationale et nous souhaitons que notre pays se dote de compteurs de coups de foudre afin de bien estimer la sévérité orageuse. Ceci permettra la protection économique des lignes de transport d'énergie et mieux situer une éventuelle station expérimentale pour l'étude approfondie de la foudre.

Bibliographie:-

- [1] - C. GARY, A. CIMADOR, R. FIEUX :- La foudre : Etude du phénomène
Application à la protection des lignes de transport.
R.G.E. Tome 84 N° 1 janvier 1975
- [2] - C. GARY : Les principes physiques guidant la protection
des bâtiments contre la foudre
R.G.E. Tome 89 N° 5 mai 1980
- [3] - E.R. WHITEHEAD : L'our d'horizon de La C.I.G.R.E
concernant les performances des lignes de
transport à haute tension vis-à-vis des coups de foudre
ELECTRA C.I.G.R.E N° 33 Mars 1974
- [4] - K. BERGER : Surtensions et foudre - Gr 33 -
C.I.G.R.E Session 1960 tome I .
- [5] - K. BERGER, R.B. Anderson: Paramètres des coups de foudre
ELECTRA C.I.G.R.E N° 41 juillet 1975
- [6] - SELJESETH, A. CAMPLING, K.H. FEIST, M. KUUSSAARI :- Mise à la
terre des poteaux nus sous les aspects de la sécurité et des
interférences Gr 28 et 36 ; ELECTRA C.I.G.R.E. N° 71 juillet 1980.
- [7] - T. TOKUOKA, T. HAYASHI: Système avertisseur d'orage utilisant le
compteur de coups de foudre. ELECTRA. N° 40 mai 1975.
- [8] - ANDERSON, VAN NIEKERT, PRENTICE et MACKERRAS : Compteurs
de coups de foudre perfectionnés. Electra. N° 66 octobre 79
- [9] - R.B. ANDERSON, A.J. ERIKSSON : Lightning parameters for engineering
application. Colloquium and study committee meeting Succeava
C.I.G.R.E. Com. 33 - ROUMANIA 25-29 June 1979

- [10] - A. FEW : Le tonnerre . Pour la science (édition Française de Scientific American) . 1^{er} trimestre 1983
- [11] - M. AGUET et M. IANOVICI : Traité d'électricité - Vol 22 - Haute tension Editions Georgi 1982.
- [12] - T. HORVATH : International lightning protection conference Part I : Common principles - BUDAPEST 1978 -
- [13] - R. H. GOLDE : Lightning protection E. ARNOLD - London 1973.
- [14] - E. KUFFEL, W.S. ZAENGL :- High voltage engineering - Fundamentals - Pergamon Press 1984.
- [15] - UTE C 17-100 : Installation de paratonnerres. Norme de l'UTE mai 1980.
- [16] - CEI 364-5-54 : Mise à la terre et conducteurs de protection. Norme CEI 1980
- [17] - L. KATTEIN : Le rôle, l'étude et l'exécution des installations de mise à la terre dans les réseaux haute tension. SONEGAZ - Conférence sur la mise à la terre - Mars 1979.
- [18] - F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR :- Optimum design of substation grounding in two layer earth structure. Part I: Analytical study IEEE Trans. PAS 94 - 1975 -
- [19] - Cours de Fen 224 : A. BOUBEKEUR - E.N.P. ALGER -
- [20] - Documentation HELITA : Paratonnerres et prises de terre .
- [21] - Documentation CATU-PARIS: Les prises de terre Fascicule E1 - septembre 1975.

