

وزارة التعليم العالي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

2ed

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

S U J E T

CONTRIBUTION A LA PROTECTION CONTRE LA
FOUDRE DANS LE CAS D'UN SOL HETEROGENE

(Application au paratonnerre horizontal)

Proposé par :

M^r A. BOUBAKEUR

Etudié par :

Y. MOUAKI DADI

A. BAKHTI

Dirigé par :

M^{me} J. FERRAS

PROMOTION : Juin 1988

DE DICACES

=====

En signe de reconnaissance,

- A la mémoire de mon Père,
- A ma mère,
- A mes Frères et Soeurs

Pour tous sacrifices consentis à mon égard et leur soutien moral, matériel et leur encouragement durant mes études.

- A mes Neveux, toute la Famille et tous mes Amis.

BAKHTI Abdelkader

الى الوالد بين الضارين
طالباً للرضا، وخفياً لجناح الذل
من الرحمة ومنهها

- A ma Famille Adoptive
- A mes Frères et Soeurs
- A C. ACHERMANN.

عوالي دادي يوسف

R E M E R C I E M E N T S

=====

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Madame J. FERRAS pour nous avoir prodigué d'utiles conseils et pour nous avoir dirigés tout le long de ce travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Monsieur A. BOUBAKEUR, pour nous avoir proposé ce travail et pour la manière dont il nous a aidés et conseillés, pour sa totale disponibilité à notre égard, pour le plaisir que nous avons eu à apprendre.

Qu'il nous soit permis de l'en remercier chaleureusement et de lui témoigner toute notre gratitude.

On ne peut oublier d'adresser des remerciements très chaleureux à Monsieur L. NEZLI pour son aide morale lors de notre formation.

SOMMAIRE.

INTRODUCTION.

CHAPITRE 1.

- ETUDE DU PHENOMENE DE DECHARGE DE FOUDRE.

- 1.1. Nuage orageux.
- 1.2. Structure des nuages orageux.
- 1.3. Aspects locaux.
 - 1.3_a - Aspect topologique.
 - 1.3_b - Aspect géologique.
- 1.4. Déroulement du phénomène de la décharge de foudre.
- 1.5. Caractéristique de la foudre.
 - 1.5_a. Classification des coups de foudre.
 - 1.5_b. Probabilité des grandeurs caractérisant la décharge.
- 1.6. Le mécanisme d'impact d'un coup de foudre descendant.

CHAPITRE 2.

- ETUDE DE FOUDROIEMENT D'UNE LIGNE SITUEE AU-DESSUS D'UN SOL HOMOGENE.

- 2.1. Le niveau isokéraunique.
- 2.2. Nombre de coups de foudre à la terre.
- 2.3. Généralité sur la protection contre la foudre.
- 2.4. La distance d'amorçage.
- 2.5. Modèle électrogéométrique.
 - 2.5.1. Principe du modèle électrogéométrique
 - 2.5.2. Principe de fonctionnement d'un paratonnerre horizontal.
 - 2.5.3. Zone de protection d'une nappe de fils horizontaux.

CHAPITRE 3.

- CALCUL DE FOUDROIEMENT D'UNE LIGNE SITUEE AU-DESSUS D'UN SOL :

- PLAT ET HOMOGENE
- PLAT ET HETEROGENE

3.1. Principe de calcul

3.2. 3.1.1. Distance d'amorçage.

3.1.2. L'espace d'attraction.

3.2. Fréquence de décharge sur le conducteur.

3.3. Procédé de calcul.

3.3.1. Conducteur situé au-dessus d'un sol plat et homogène.

3.3.2. Résultats obtenus.

CONCLUSION.

3.3.3. Conducteur situé au-dessus d'un sol plat et hétérogène.

3.3.3₁. Modèle expérimental.

3.3.3₂. Méthode de travail.

3.4. Procédé de calcul de foudroiement sur un sol hétérogène.

INTERPRETATION.

CONCLUSION.

INTRODUCTION.

Depuis l'antiquité, l'Homme voyait la foudre, comme une manifestation de la colère divine. Il fallut attendre le VIIIème Siècle pour enregistrer les premières tentatives de connaissance de la foudre. la science des phénomènes orageux ne s'est véritablement instaurée qu'au début du XXème Siècle.

Malgré le grand nombre de travaux consacrés à la foudre par des Chercheurs de nombreux pays, depuis plusieurs décennies, ce phénomène reste encore assez mal connu.

Cette situation provient en grande partie de la nature insaisissable de la foudre, qui frappe où elle veut et quand elle veut.

Le plus récent espoir réside dans une nouvelle interprétation, qualitative certainement, et peut-être même quantitative, du mécanisme d'impact, c'est-à-dire le mécanisme par lequel se détermine le point exact qui va être frappé par la foudre.

Dans notre projet, nous nous intéressons essentiellement à la zone d'attraction (des décharges de foudre) d'un conducteur horizontal mis à la terre et situé au-dessus d'un sol hétérogène.

Dans cette étude, nous nous baserons sur des résultats expérimentaux obtenus par d'autres auteurs [1] au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. A cet effet, nous avons aussi choisi le même système d'électrodes constitué d'une tige sous haute tension et d'un plan hétérogène ayant deux parties composées de matériaux différents : acier et sable. Le conducteur horizontal mis à la terre est situé au dessus du sable à différentes positions par rapport à l'interface des deux milieux choisis.

Les principaux paramètres que nous changeons sont les positions de la tige et du conducteur horizontal, au dessus du sol hétérogène.

Avant d'étudier le cas du paratonnerre dans le cas d'un sol hétérogène, nous nous sommes d'abord intéressés au cas du sol homogène, plus particulièrement à la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal en fonction de la hauteur de ce dernier.

CHAPITRE 1.

" ETUDE DU PHENOMENE DE DECHARGE DE FOUDRE ."

1.1. - NUAGES ORAGEUX :

La formation des nuages orageux est due à l'instabilité de l'atmosphère /17/. Ces nuages se développent quand l'air chaud et humide près de la surface de la terre s'élève et remplace l'air dense se trouvant au-dessus. L'apparition de ces nuages dépend aussi de la structure géographique de la terre. Elle est plus fréquente aux endroits et aux temps pour lesquels un grand volume d'air intervient dans une forte convection verticale.

1.2. - STRUCTURE DES NUAGES ORAGEUX :

Généralement, les nuages orageux sont formés d'un ensemble de plusieurs cellules de nuage. Un tel système s'étend horizontalement sur une surface ayant un diamètre de 4 Km au minimum et une épaisseur à peu près égale à 15km.

La plupart des nuages orageux chargés électriquement contiennent des charges positives dans leur partie supérieure et une grande quantité de charges négatives dans leur partie inférieure. C'est pourquoi, le plus souvent ils sont représentés par un dipôle électrique. Cependant la distribution réelle des charges dans les nuages orageux est beaucoup plus complexe. Les résultats des observations mettent l'existence de domaine contenant une faible quantité de charges positives dans leurs régions inférieures.

Un modèle du nuage orageux (figure 1.a.) contenant ces trois centres de nuage a été représenté par plusieurs auteurs /3, 2, 15, 4/. Cependant les grandeurs de ces charges varient selon l'auteur. Une valeur moyenne /2/ de la grandeur de ces concentrations de charges est mentionnée à la figure 1.a. /6/.

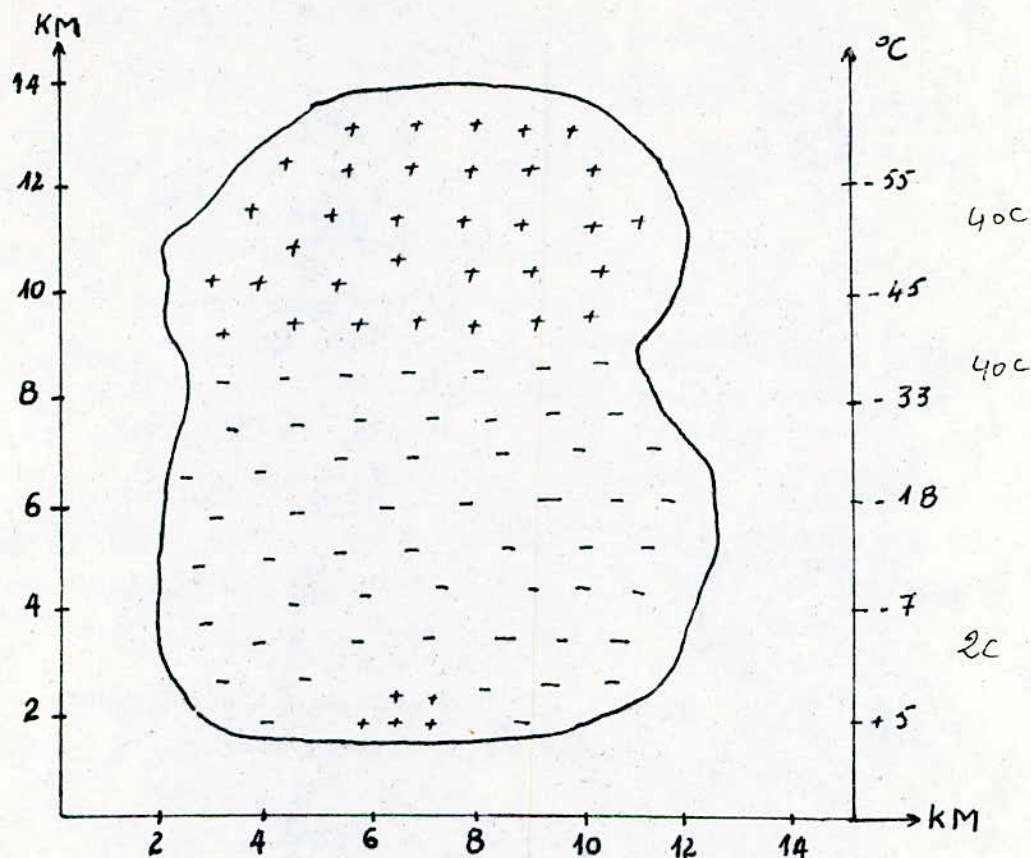


Figure 1.2. *schema du nuage orageux*

1.3. - ASPECTS LOCAUX.

1.3. a - ASPECT TOPOLOGIQUE :

Des zones préférentielles peuvent exister du simple fait de conditions privilégiées de formation de nuages orageux, sous l'effet combiné de l'humidité du sol et d'un réchauffement local, il y a alors formation puis ascension d'une masse d'air chaud et humide. Comme l'air transmet très mal la chaleur, cette bulle chaude s'élève, pratiquement isolée thermiquement de l'air environnant, et formera un nuage orageux aux altitudes où la condensation commencera. C'est l'orage de chaleur, souvent très localisé.

Par ailleurs, des mouvements d'air, canalisés par des vallées ou des fleuves, et qui entraînent les nuages orageux. /5/.

1.3.b - ASPECT GEOLOGIQUE :

La foudre a une préférence pour tomber plus fréquemment dans une région que dans une autre. Ces régions sont appelées "nids d'orages". Ainsi par exemple, ce ne sont pas toujours les points les plus élevés, qui sont les plus frappés par la foudre. En certaines montagnes, les versants des vallées sont souvent les plus foudroyés que les sommets /5/.

En effet, à la suite de nombreuses études effectuées et par un **pointage** méticuleux des points d'impact de la décharge de foudre, on constate qu'il existe un rapport entre la nature géologique du sol et l'impact de décharge de foudre /7/. D'où la conductivité du sol pourrait être un autre facteur important. Cette hypothèse repose sur un certain nombre d'observations concernant le foudroiement des lignes à haute tension, ainsi que sur les résultats de recherche de laboratoire. Ces résultats permettraient d'allouer aux failles humides, aux nappes d'eau, à des terrains marécageux, une certaine attirance préférentielle pour la foudre ; leur zone d'action ne saurait toujours excéder la centaine de mètres /5/.

1.4. - DEROULEMENT DU PHENOMENE DE LA DECHARGE DE Foudre :

Les décharges atmosphériques peuvent avoir lieu, soit à l'intérieur du nuage, entre deux centres de charge de polarités opposées, soit entre le nuage et la terre /6/. D'après leur déroulement, les décharges vers la terre, peuvent être séparées en deux parties qui évoluent et se propagent de manières différentes. La première est la prédécharge, appelée "traceur" qui établit la liaison entre le nuage et le sol, la deuxième est la décharge principale qui neutralise les charges du nuage ou une partie d'entre-elles, en suivant le chemin tracé par la prédécharge.

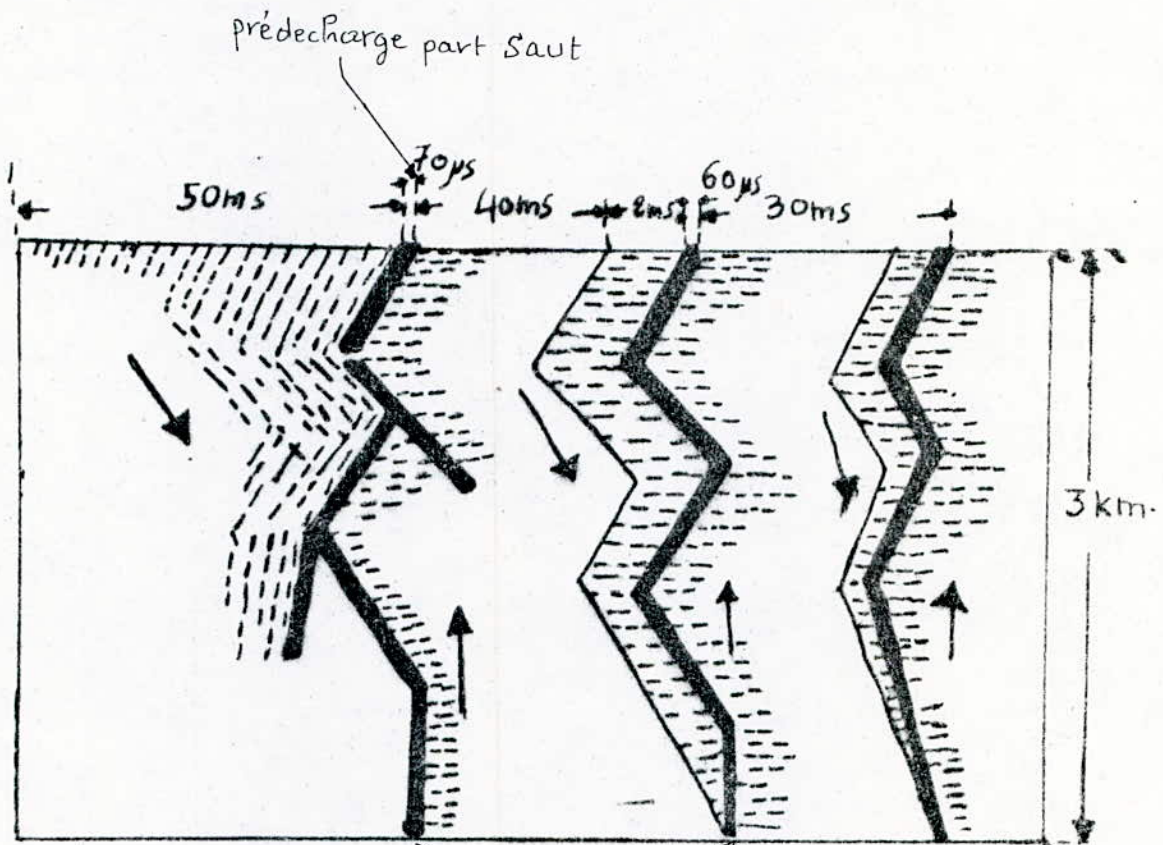
La prédécharge descendante peut avoir lieu lorsque le champ

électrique est suffisamment intense à la base du nuage pour enclencher une décharge électrique vers la terre. Cette décharge se propage par les sauts qui s'effectuent en un temps d'environ 10^{-6} s et dont la longueur varie de 10 m à 200 m /9.8/. Chaque saut orienté vers la zone où ce champ électrique est le plus intense devant la tête du traceur /12/. Comme dans cette étape d'évolution de la décharge le champ électrique devant la tête de la prédécharge est surtout déterminé par les charges d'espace flottant dans l'atmosphère. La prédécharge se propage en zig-zag et par saut.

Entre deux sauts successifs, il y a une pause d'environ 10^{-5} à 10^{-4} s. La vitesse moyenne de la propagation de la prédécharge peut être obtenue en divisant la longueur du chemin total parcouru par la durée de parcours. Les résultats obtenus en photographiant les prédécharges donnent une vitesse moyenne d'environ 10 à 130 cm/ps /9/.

Le plus souvent, avant que la prédécharge descendante n'établisse une liaison entre le nuage et la terre, il y a une décharge ascendante, appelée décharge de connexion, qui démarre vers la prédécharge descendante à partir du point à la terre où l'intensité du champ électrique atteint la valeur critique. Le point dans l'espace où se trouve la tête du traceur à cet instant est appelé "point critique ou point d'orientation" et la distance entre ce point et la terre est appelée "distance d'amorçage". Ainsi le dernier saut du traceur est exécuté à partir du point critique et il parcourt la distance d'amorçage /10, 11/ /6/.

La distance d'amorçage dépend de la quantité de charge répartie le long du canal de leader descendant, car c'est ce qui produit le champ engendrant l'apparition du leader de connexion. Autrement dit, la valeur de Crête du courant de la première décharge dépendra de la charge du leader descendant, et de ce fait, la distance d'orientation dépendra aussi du courant de la première décharge de foudre. Une plus grande distance d'orientation correspondra à un plus grand courant dès qu'une liaison entre le nuage et la terre est établie /10/,



précharge part saut
70µs
40ms
60µs
30ms
3 km
décharge principale
déroulement d'un coup de foudre descendant négatif
fig. 1.6

La décharge principale véhicule des charges positives qui neutralise les charges négatives se trouvant le long du canal ionisé de la prédécharge. Elle peut être suivie de plusieurs autres décharges successives suivant le même canal ionisé /14/. Le nombre de ces décharges successives est en moyenne égal à 3, mais peut être aussi égal à 10 ou plus /15/(figure 1.6.).

1.5. - CARACTERISTIQUES DE LA Foudre :

1.5. a - CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre :

On classe tout d'abord selon le sens de développement du traceur (ou premier 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 second lieu, on classe les coups de foudre selon leur polarité :

- Les coups de foudre négatifs (décharge d'un nuage chargé négativement).

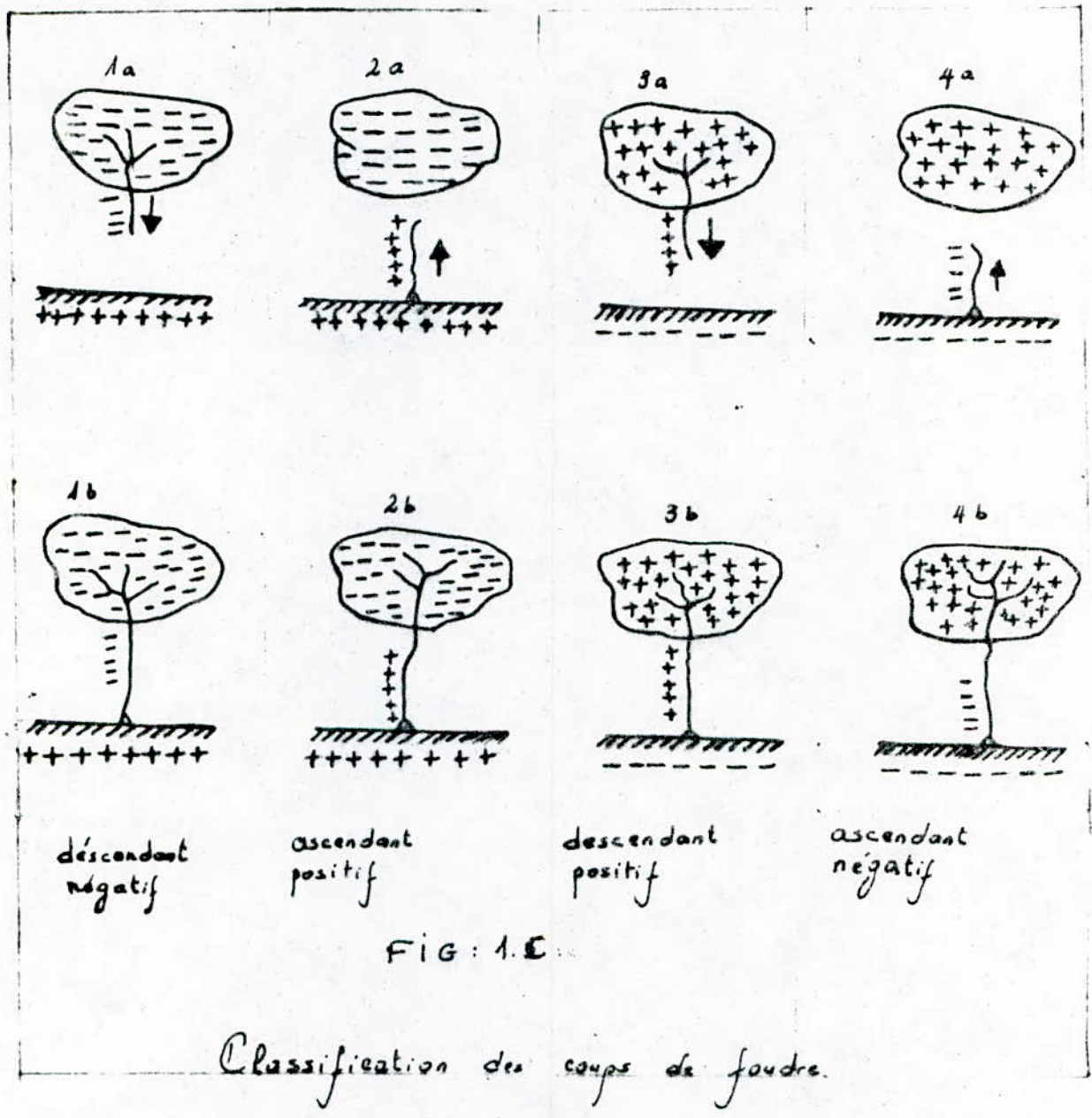
- Les coups de foudre positifs (décharge d'un nuage chargé positivement).

Chacun de ces types de décharge de foudre peut être suivi par une décharge principale ou non (figure 1.6.).

C'est la prédécharge de foudre négative descendante (type 1.b) de la figure 1.6 qui apparaît le plus fréquemment /6/.

1.5.b- PROBABILITE DES GRANDEURS CARACTERISANT LA DECHARGE :

La figure 1.4. représente la distribution globale des amplitudes des courants de coups de foudre obtenue



à partir de toutes les données mondiales actuellement disponibles. On y a représenté, séparément, les distributions des amplitudes des courants de foudre négatifs et positifs. Ces distributions obéissent à une loi de probabilité de type log-normale ; en effet, si l'on porte en abscisse le logarithme de l'intensité donnée (en échelle gaussienne), on obtient sensiblement des droites (figure 1.d.).

Pour exprimer la probabilité globale φ_1 qui correspond au courant total, est celui de la première décharge plus les décharges successives (la formule approximative suivante a été proposée).

$$\text{Log } \varphi_1 = 2 - \frac{I(\text{KA})}{60} \quad /5/$$

Les conséquences les plus importantes que l'on peut retenir de ces courbes de la distribution sont :

- que l'amplitude des courants de foudre positifs peut atteindre de très fortes valeurs, supérieures à 150 KA dans 10% des cas.

- Que l'amplitude des courants de foudre négatifs est, en général, plus faible, la valeur à 10% étant de l'ordre de 50 KA.

- Que la valeur médiane de l'intensité (valeur 50% de la distribution globale pour polarité négative) se situe autour de 25 KA.

1.6. - LE MECANISME D'IMPACT D'UN COUP DESCENDANT :

Sous l'effet du champ électrique produit par le leader descendant, des intensités de champ élevées apparaissent au niveau des plus hautes parties des objets à la terre. Ces gradients engendront l'apparition d'une décharge descendante (ou leader de connexion) qui se propage vers le leader des-

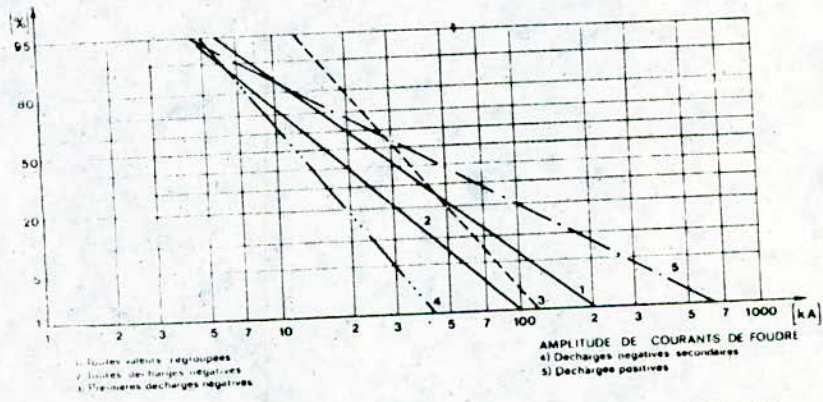


Fig 1do — Distribution statistique des amplitudes de courants de foudre.

endant. Etant donné que ces deux leaders (ascendant et descendant) rendent le canal de foudre complet entre le nuage et la terre, le point d'impact de foudre est déterminé à partir du point d'amorçage du leader de connexion. En ce moment, la tête du leader descendant peut être appelée "point d'orientation".

CHAPITRE 2.

" ETUDE DE FOUDROIEMENT D'UNE LIGNE SITUEE
AU-DESSUS D'UN SOL HOMOGENE. "

Comme on l'a vu dans le paragraphe **1.3.a**, il y a des endroits où la création des nuages orageux est favorisée, pour cela on est conduit de définir les paramètres importants caractérisant le foudroiement d'un lieu quelconque.

2.1. - LE NIVEAU ISOKERAUNIQUE :

Caractérise la sévérité orageuse d'une région donnée, il représente le nombre de jours par an lorsque le tonnerre a été entendu. Les cartes isokérauniques ont été établies suivant les données statistiques de plusieurs années [16].

Pour ce qui est de l'Algérie, on se contentera de la carte isokéraunique de la partie du sud du pays, car la carte totale du pays n'est pas disponible (figure **2.a**) [16].

2.2. - NOMBRE DE COUPS DE FOUDRE A LA TERRE :

A partir des résultats fournis par divers dispositifs de mesure de coups de foudre au sol, plusieurs Chercheurs ont annoncé les relations entre la densité de coup de foudre au sol et le niveau isokéraunique des régions en question. Ces relations ont la forme :

$$N = K T^n$$

avec les constantes empiriques n , K qui diffèrent selon l'auteur où :

N : est la densité de coup de foudre au sol exprimé en Km^2/an [16].

T : est le niveau isokéraunique.

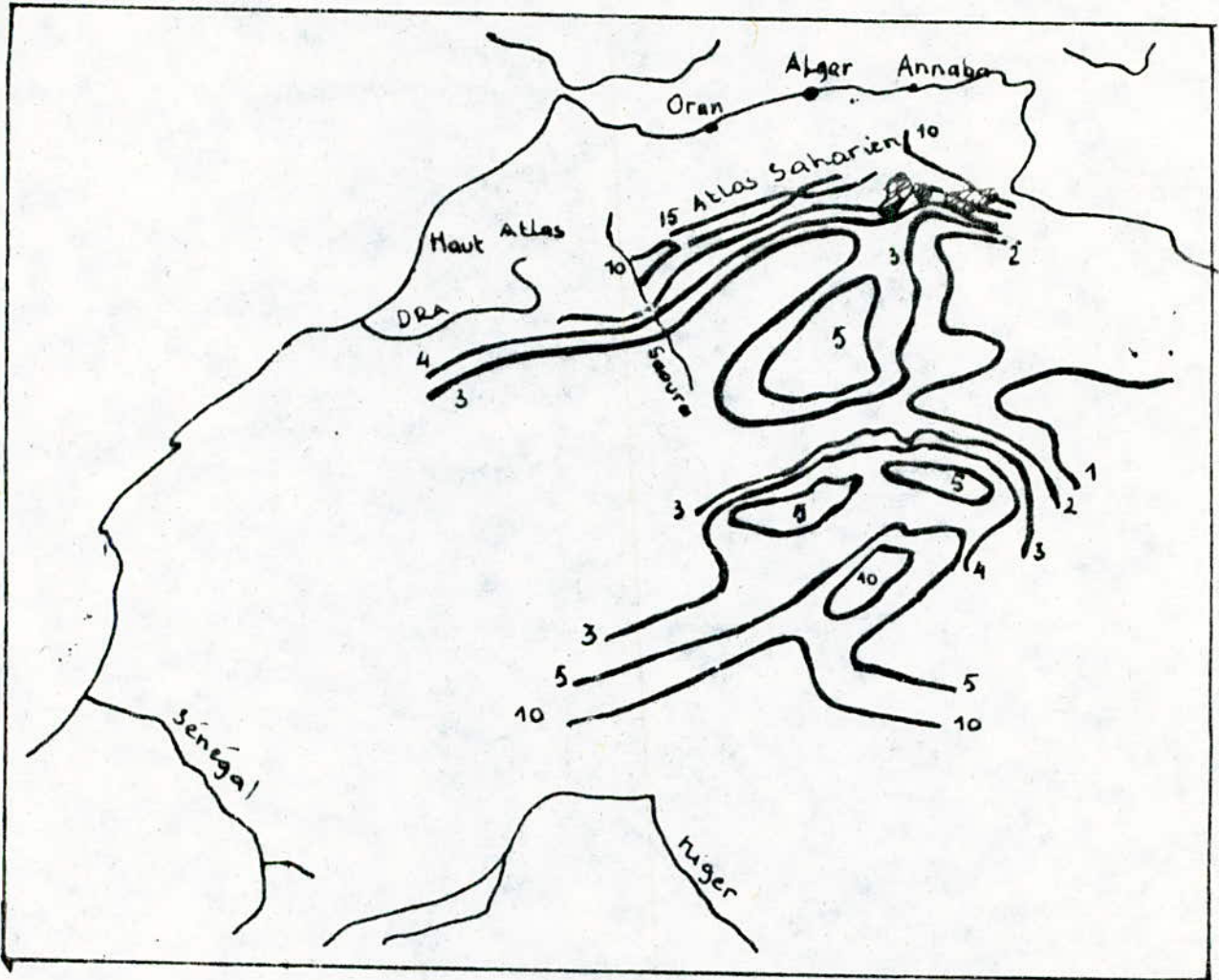


fig: 2.11 Carte isokéraunique du Sud Algérien.

Le tableau suivant nous donne différentes relations déjà établies.

Tableau 1.

LIEU	REFERENCE	Densité de foudroiement.
Rhodésie	Anderson et Jenner 1954	0,14 T
Afrique du Sud	Anderson/Erikson 1981	0,023T ^{1,3}
Suède	Mullur - Hille brand 1964	0,004T ²
GBR	Stringfellow 1974	aT ⁵
U.S.A. (Nord)	Horn et Ramsey 1951 Horn et Ramsey 1951	0,11 T
U.S.A. (Sud)	Anderson et autres 1968	0,17 T
U.S.A.	Brown et Whiterhead 1969	0,1 T
U.S.A.	Kolokov et Pavlova 1972	0,15 T
U.R.S.S.	Brooks 1950	0,036T ^{1,3}
Monde (climat tempéré)		0,19 T
Monde (climat tempéré)	Gold 1966	0,15 T

En ne considérant que les relations concernant les régions tempérées (cas de l'Algérie), on obtiendra $N = 0,14 T |16|$.

2.3. - GENERALITE SUR LA PROTECTION CONTRE LA FOUDRE :

La façon d'expliquer le rôle protecteur des paratonnerres consiste à considérer leur "pouvoir d'attraction" sur la foudre. Cependant, on a assez rapidement

reconnu que ce pouvoir a été limité à un volume relativement réduit, ce qui permet néanmoins d'assurer une certaine "zone de protection" autour du paratonnerre. Diverses définitions de cette zone, toutes empiriques, ont été données, généralement sous forme de modèle de protection [5].

Malheureusement ces divers modèles de protection ont été maintes fois infirmés par l'expérience.

La connaissance actuelle des phénomènes physiques mis en jeu par la foudre a permis d'élaborer une nouvelle méthode de détermination de la zone de protection d'un paratonnerre.

Cette méthode est basée sur une nouvelle connaissance du mécanisme d'impact de la foudre, et est mise en oeuvre au moyen d'un modèle mathématique appelé modèle électrogéométrique, autrement dit que c'est l'intensité du champ électrique qui détermine l'impact probable [6].

Le modèle électrogéométrique, basé sur la distance d'amorçage du traceur montre que des courants de foudre :

- élevés et moyens, la protection est très bonne
- faibles, la protection est moins bonne car le dernier trajet du traceur est très court [17].

2.4. - LA DISTANCE D'AMORCAGE :

Est la distance à partir de laquelle la pointe du traceur choisit son point d'impact. Cette distance (d) dépend de l'intensité du courant de la première décharge du coup de foudre. Plusieurs Chercheurs ont établi les équations empiriques exprimant cette dépendance :

$$d = 9,4 I^{2/3} \quad /2/ \quad \text{équation (1)}$$

$$d = 6,7 I^{0,8} \quad /2/ \quad \text{équation (2)}$$

où d : distance d'amorçage en [m]

I : intensité de crête de la première décharge en [KA]
l'équation (2) est plus utilisée, mais la première est préférée pour les forts courants.

2.5. - MODELE ELECTROGEOMETRIQUE :

La théorie électrogéométrique, aussi bien que les constructions géographiques, maintient clairement que les zones de protection dépendant étroitement du choix de la distance d'amorçage d . Si l'étude de la protection a été faite avec une certaine distance d_c , que nous désignerons par "distance d'amorçage critique", il est aisé de voir que la protection sera bonne vis-à-vis des courants tels que $d > d_c$, mais par contre ne sera plus entièrement efficace pour les courants $d < d_c$. Cela correspond au phénomène déjà évoqué plus haut, de non-protection vis-à-vis des corps de foudre à faible courant. Par ailleurs, il apparaît clairement que, plus la protection souhaitée doit être complète, plus resserrés devront être le réseau de descentes ou de fils horizontaux, plus petites devront être les mailles d'une cage de Faraday. Il y a donc un optimum à rechercher, qui dépend du coût de l'installation de protection et du taux de sécurité que l'on s'imposera.

Si une protection absolue est nécessaire, la distance d'amorçage critique d_c devra correspondre au plus faible courant de foudre pratiquement envisageable, c'est-à-dire, 2KA. A ce moment, $d_c = 15$ mètres. [5].

Si un certain risque de foudroiement de l'objet à protéger peut être accepté, voici comment l'on peut calculer le taux de défaillance. Supposons que nous nous limitons à la protection des courants $I > 5$ KA dans ce cas, la protection restera garantie à 95% (figure 1.6) c'est-à-dire que seule dans 5% de l'ensemble de foudroiement prévisible, une défaillance de la protection pourra se produire [5].

2.5.1. Principe du modèle électrogéométrique.

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 à priori aléatoire du traceur. Ainsi pour chercher les zones que protège un dispositif, on imagine que la sphère fictive de rayon "d" roule sur le sol dans toutes 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 protections sans jamais toucher l'objet à protéger, alors la protection de celui-ci est assurée. [3].

2.5.2. Principe de fonctionnement d'un paratonnerre horizontal.

Nous allons appliquer le modèle électrogéométrique d'un fil tendu horizontalement de hauteur (h_c) situé dans un terrain parfaitement plat et homogène.

La parabole (P) figure 2.b., définie par le lieu géométrique des points à distance égale du conducteur et du sol. Celle-ci a pour équation dans le système de coordonnées (X O Y) :

$$h_c^2 - 2h_c y + x^2 = 0 \quad /2/ \text{ équation (3)}$$

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 le conducteur dès que la distance AT qui sépare le conducteur A et le traceur (T) est inférieure à la distance d'amorçage (d) du coup de foudre considéré.

Soit (T_1) la pointe du traceur sur la parabole (P) tel que

$$AT_1 \leq d.$$

Soit un objet placé sous une nappe de fils horizontaux distant l'un de l'autre de $2D$, sera correctement protégé si sa hauteur n'excède pas : (figure 2.d)

$$p = h_c - d + \sqrt{d^2 - D^2} \quad /5/$$

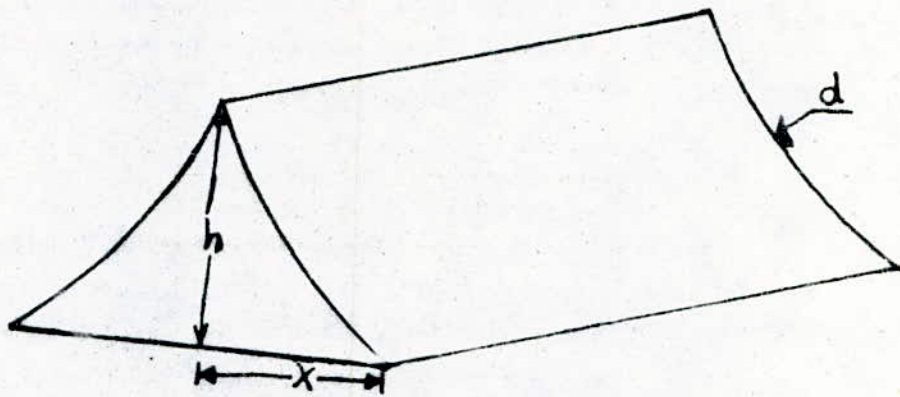


FIG: 2.C

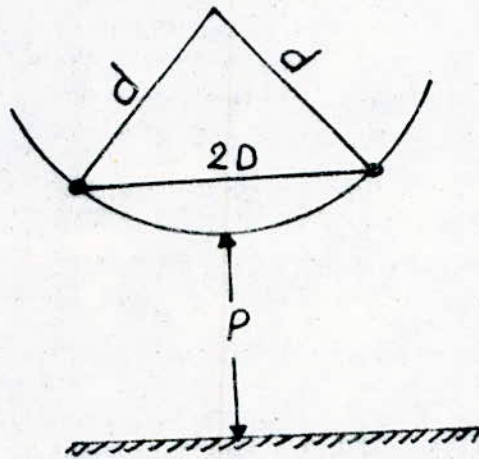


FIG: 2.C (vue de face)

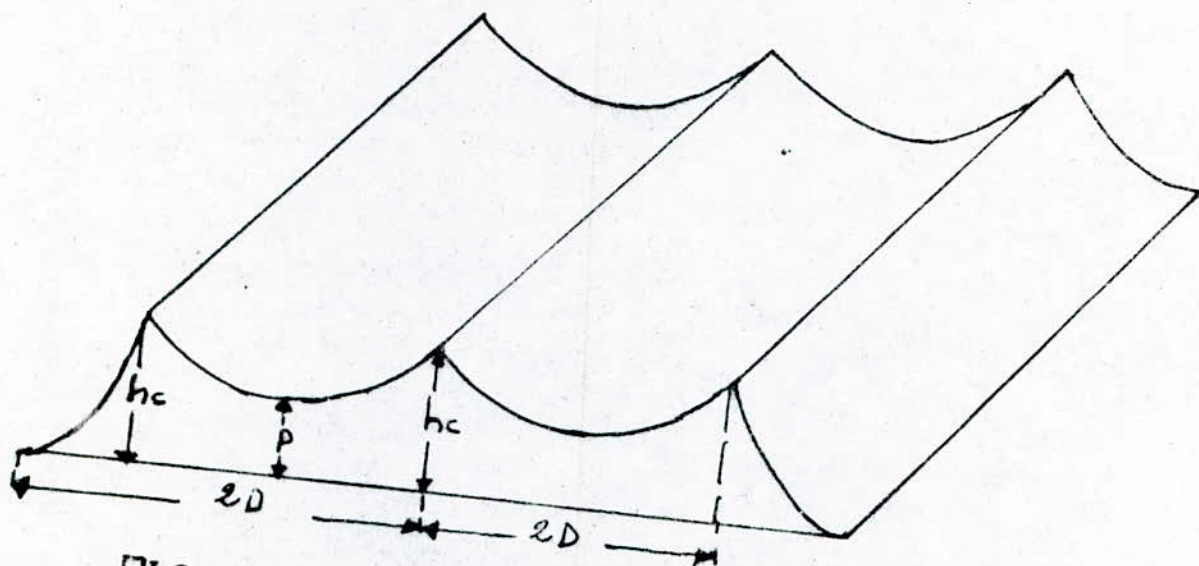


FIG: 2. C (vu de profil)

CHAPITRE 3.

" CALCUL DE FOUROIEMENT D'UNE LIGNE
SITUEE AU-DESSUS D'UN SOL

- PLAT ET HOMOGENE
- PLAT ET HETEROGENE."

On comprend sur le foudroiement d'une ligne, le nombre de coups de foudre atteignant la ligne par an.

3.1. - PRINCIPE DE CALCUL :

Nous examinons le foudroiement d'un fil conducteur se trouvant dans un lieu donné caractérisé par son niveau isokéraunique. Pour cela, nous déterminons d'abord la répartition de distance d'amorçage ensuite la zone d'attraction du conducteur.

3.1.1. Distance d'amorçage.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre (I) la distance d'amorçage dans le cas du sol plat et homogène dépend de la charge contenue dans le traceur et ainsi du courant de cette décharge. La fréquence de la valeur de crête de ce courant suit une distribution log-normale (figure 1d). La fonction de répartition W_d est donnée par l'équation suivante empirique suivante : (19)

$$W_d = f_d (k \cdot \ln (I/I_m)) \quad (4)$$

où :

- f_d est l'intégrale d'erreur de Gauss.
- k est une constante caractérisant l'écart type de la distribution.
- I est la valeur de Crête du courant de la première décharge de foudre.
- I_m est sa valeur moyenne.

La liaison entre la distance d'amorçage et la valeur de crête de foudre est donnée par l'expression empirique suivante

$$(I/I_m) = (r/r_m)^p \quad (5)$$

où :

- r est la distance d'amorçage pour le courant de Crête I.
- r_m est la distance d'amorçage moyenne pour le courant de Crête I_m dont la probabilité est 50%.
- P est un coefficient empirique.

Dans le cas de la prédécharge négative on a :

$$\begin{aligned} I_m &= 50 \text{ KA} ; \\ r_m &= 25 \text{ m} ; \\ K &= 1,658 ; \\ P &= 1,85 . \end{aligned}$$

La fonction de distribution des distances d'amorçage est donnée par la dérivée de l'expression (4). En remplaçant l'expression (5) dans l'expression (4) on obtient :

$$\frac{dW_d}{dr} = \frac{K.P}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot K^2 \cdot P^2 \left(\ln\left(\frac{r}{r_m}\right)\right)^2\right) \quad (6)$$

3.1.2. L'espace d'attraction.

En se basant sur le modèle électrogéométrique, l'espace d'attraction du conducteur étudié est limité par l'espace se trouvant à gauche de la parabole (P) et l'axe (OY) (figure 2. b). Si le point critique du traceur se trouve dans cet espace, l'impact est au conducteur.

3.2. - FREQUENCE DE DECHARGE SUR LE CONDUCTEUR :

Pour connaître cette fréquence, on doit d'abord déterminer la fréquence avec laquelle le point critique se trouve dans cette zone d'attraction du conducteur. En prenant l'élément volumique désigné par dV (figure 3. a) appartenant à la zone d'attraction, la probabilité P critique

que le point critique se trouve dans cet élément dépend des facteurs suivants :

- du volume dV ,
- de la valeur de densité de foudre/ Km^2 par an :
B qui caractérise le foudroiement de l'endroit en question,
- de la distribution $\frac{dWd}{dr}$ de distance d'amorçage.

La probabilité P critique peut être obtenue par la multiplication de ces 3 facteurs :

$$P_{\text{critique}} = B \cdot \left(\frac{dWd}{dr} \right) \cdot dV \quad (7)$$

En multipliant cette probabilité par P_{cond} , de décharge au conducteur et en intégrant le produit pour tout l'espace, nous obtiendrons :

$$V_c = B \cdot \int_V \frac{dWd}{dr} \cdot P_{\text{cond}} \cdot dV \quad [\text{foudre/an}] \quad (8) \quad /19/$$

où :

P_{cond} est la probabilité de décharge au conducteur à partir d'un point critique selon le modèle électrogéométrique ;

$P_{\text{cond}} = 1$ pour un point critique à l'intérieur de l'espace d'attraction et

$P_{\text{cond}} = 0$ ailleurs.

En remplaçant l'expression (6) dans (8) on a :

$$V_c = B \cdot \int_V \frac{k \cdot P}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot k^2 \cdot P^2 \left(\ln \left(r/r_m \right) \right)^2 \right] \cdot dV \quad (9)$$

3.3. - PROCEDE DE CALCUL :

Pour nos calculs, on choisit le système de coordonnées cylindriques lié au conducteur, d'où l'élément volumique par unité de longueur (figure 3.a).

$$dV = 1.r .d\varphi . dr.$$

On effectue le même procédé de calcul pour les deux cas principaux, le sol homogène et le sol hétérogène.

On résoud l'équation (9) avec les différentes limites d'intégration déterminées par les zones d'attractions des cas différents.

3.3.1. Conducteur situé au-dessus d'un sol plat et homogène.

On calcule le foudroiement d'un conducteur ayant la hauteur h_c , d'une région donnée B. Dans ce cas, la

zone d'attraction est limitée par une parabole.

Lorsque la distance d'amorçage varie $0 \leq r \leq \frac{h_c}{2}$ l'angle

varie $0 \leq \varphi \leq \pi$ et lorsque la distance d'amorçage varie

$\frac{h_c}{2} \leq r < \infty$, l'angle φ varie en fonction de r (Annexe 1)

$$\varphi_0 \leq \varphi \leq \pi \quad \text{avec} \quad \varphi_0 = \text{Arc cos} \left(\frac{r}{h_c} - 1 \right)$$

L'équation (9) peut être séparée en deux intégrales déterminées par les limites d'intégration.

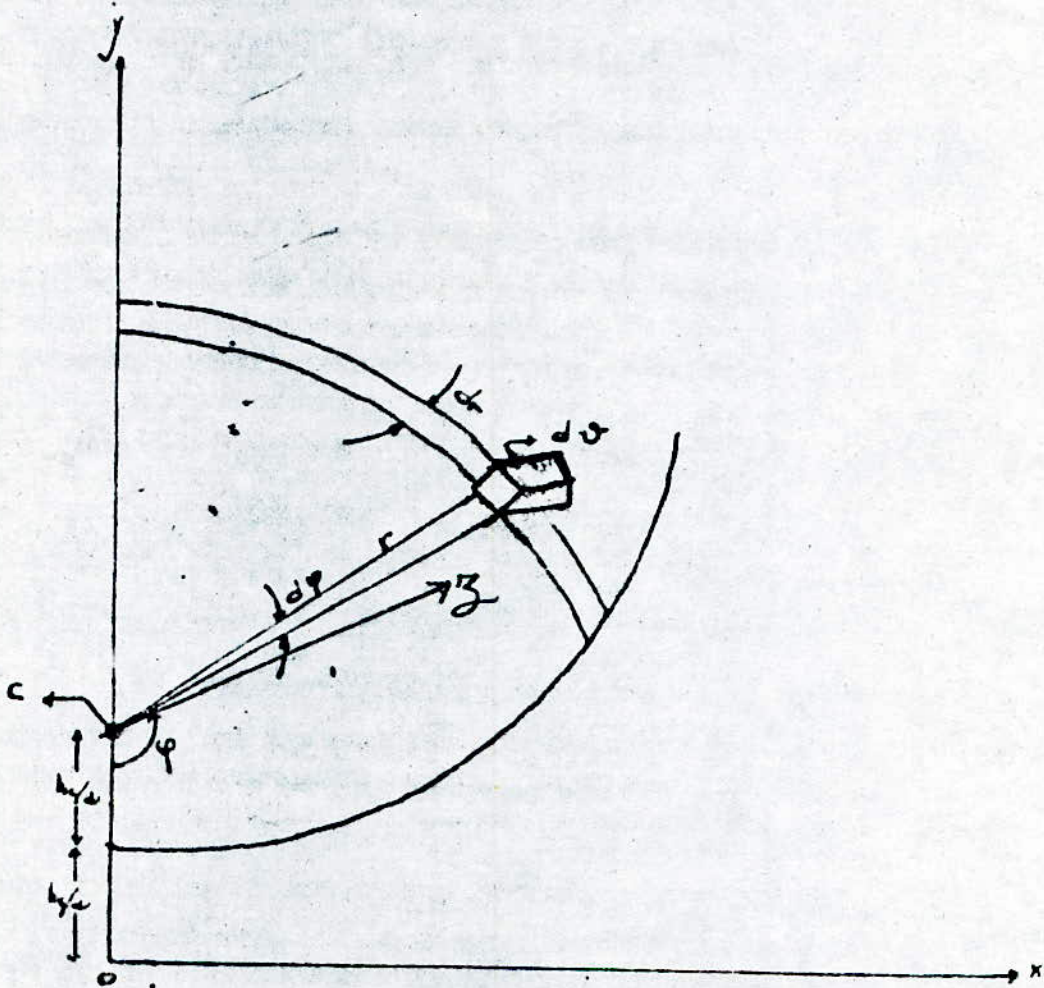
$$V_c = V_{c1} + V_{c2}$$

Tel que :

$$V_{c1} = B \int_0^{\pi} \int_0^{h_c/2} \frac{k.P}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot k^2.P^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{r}{r_m} \right) \right)^2 \right] \cdot 1.r . dr . d\varphi.$$

donc

$$V_{c1}/B = \frac{k.P}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\pi} \int_0^{h_c/2} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot k^2.P^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{r}{r_m} \right) \right)^2 \right] \cdot dr . d\varphi \quad (10)$$



c: conducteur

FIG: 3a Élément volumique dV de la zone d'attraction du conducteur

$$V_{c_2} = B \cdot \int_{\varphi_0}^{\pi} \int_{hc/2}^{\infty} \frac{k.P}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot k^2 \cdot P^2 \cdot (\ln(r/r_m))^2 \right] \cdot 1 \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi.$$

Donc

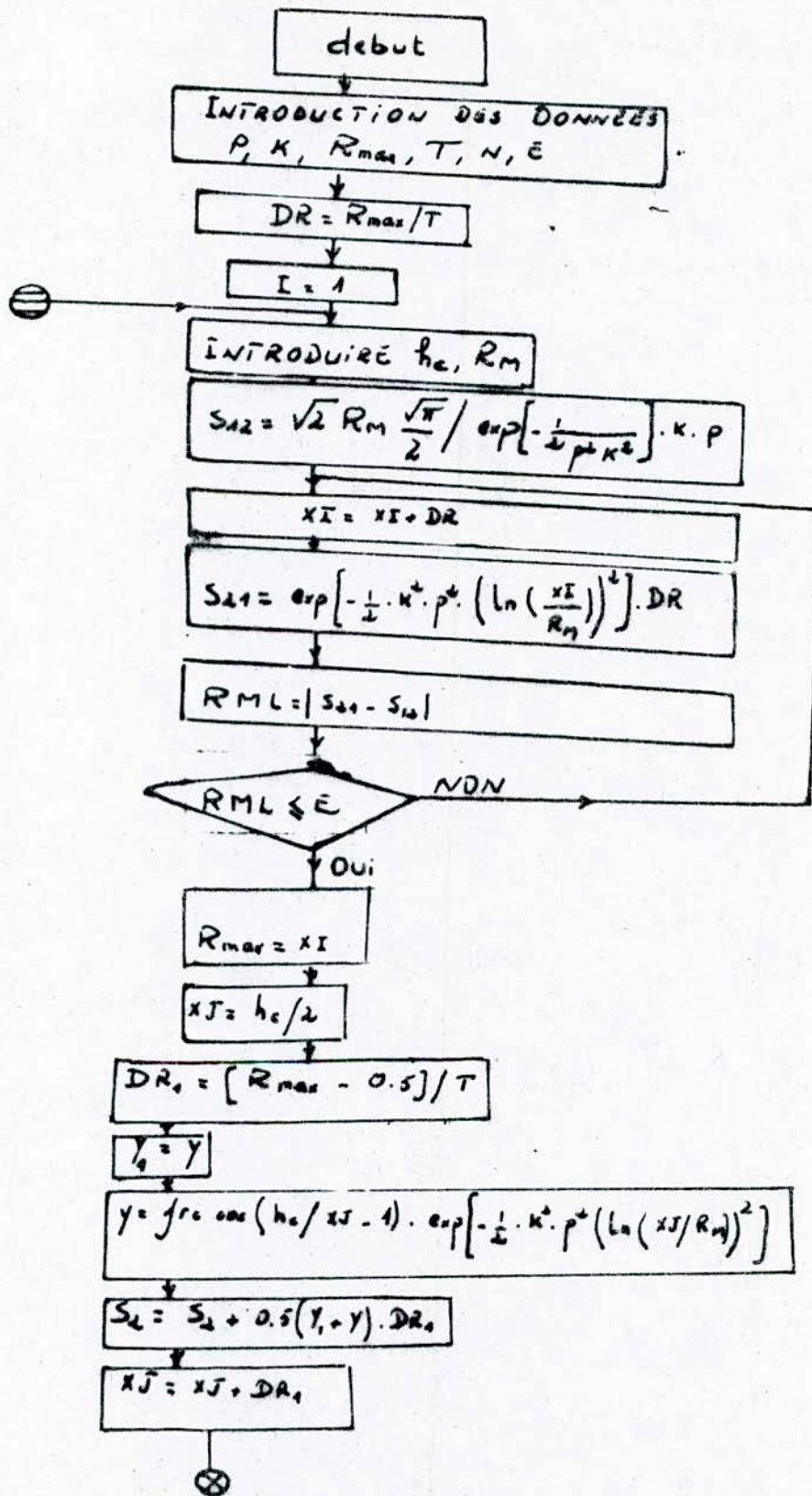
$$V_{c_2/B} = \frac{k.P}{\sqrt{2\pi}} \int_{\varphi_0}^{\pi} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot k^2 \cdot P^2 \cdot (\ln(r/r_m))^2 \right] \cdot dr \cdot d\varphi. \quad (11)$$

La somme des équations (10) et (11) donne : (Annexe 1)

$$V_{c/B} = \frac{\pi \cdot r_m}{2 \cdot \exp(-1/k^2 P^2)} - \frac{P.k}{\sqrt{2\pi}} \int_{hc/2}^{\infty} \text{Arccos}(r/h_c - 1) \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot k^2 \cdot P^2 \cdot (\ln(r/r_m))^2 \right] \cdot dr \quad (12)$$

L'intégrale (12) ne peut être résolue analytiquement, donc on passe par un calcul numérique, en faisant un programme en FORTRAN au MICROVAX du Centre de Calcul de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Le programme se base sur la méthode d'intégrale numérique de trapèze dont l'organigramme est présenté sur la figure (3.b).



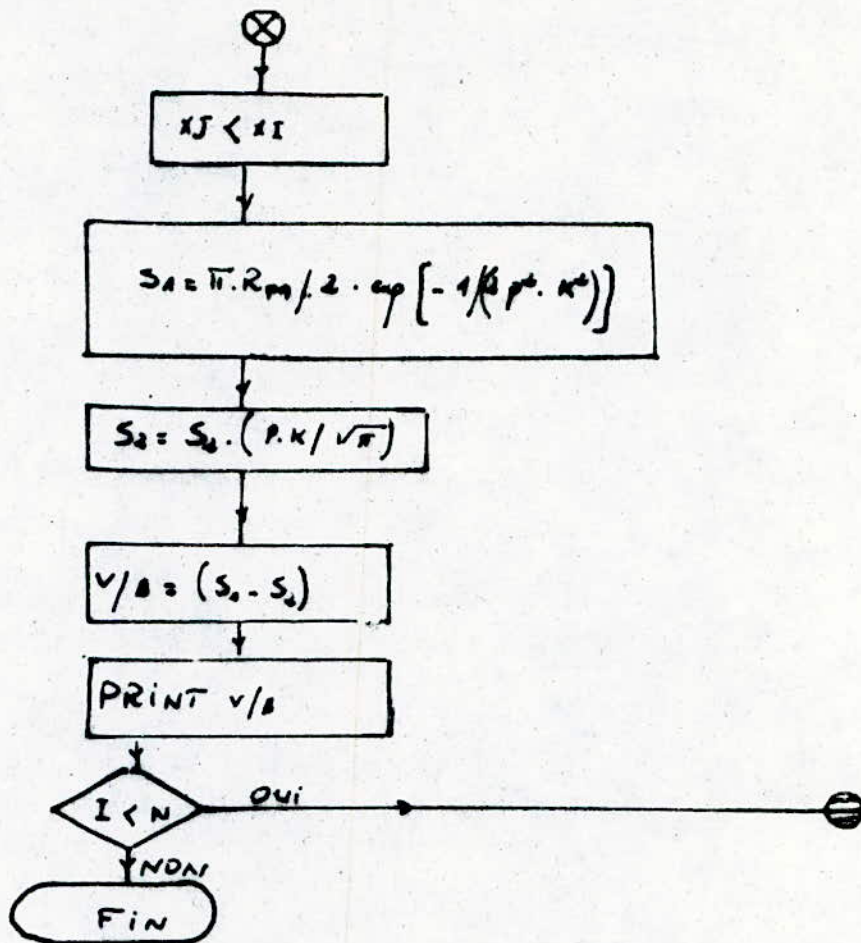


FIG: 3.6

3.3.1.2. Résultats obtenus.

A l'aide de ce programme, nous avons étudié le foudroiement d'un conducteur situé sur un sol homogène en fonction de son hauteur h_c .

h_c (m)	8	10	12	14	16	18
V_c/B (km ²)	0,052298	0,0662277	0,0794733	0,0927188	0,0993476	0,1059644
h_c (m)	20	22	24	26	28	30
V_c/B (km ²)	0,1158986	0,1291441	0,1341112	0,1407940	0,1523238	0,1606023

tableau. 2:

Les résultats du tableau 2 donnent la figure 3. c, d'après la figure 3. c le foudroiement de la ligne relative à V_c/B en fonction de h_c croît en exponentielle de la forme $V_c/B = 1 - 2^{-ah_c}$ avec

$a = + 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^{-1}\text{)}.$ (Annexe 2)

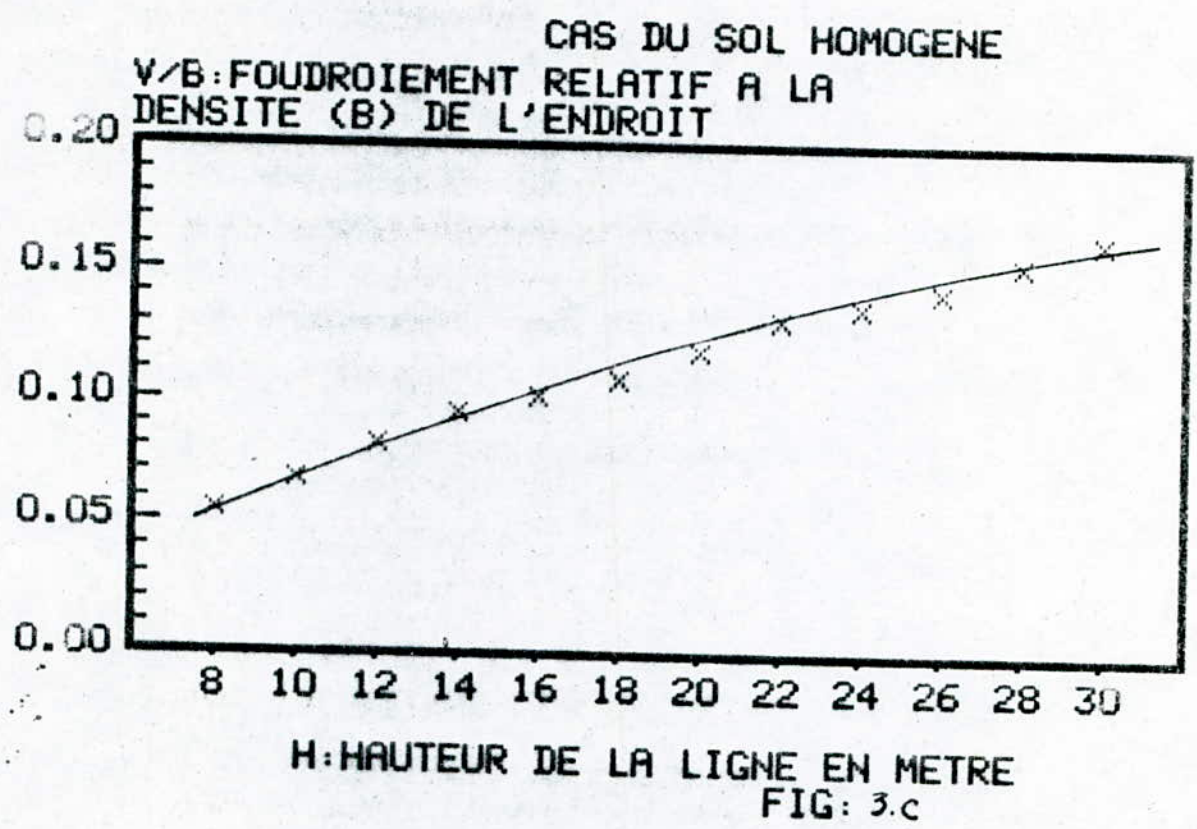
La figure 3. d, montre une assimilation très proche de V_c/B en $1 - e^{-ah_c}$ dans l'intervalle [8,30](m)

Conclusion.

Le foudroiement de la ligne augmente en fonction de sa hauteur, autrement dit que l'espace d'attraction augmente en fonction de la hauteur du conducteur, Si l'espace d'attraction est déterminé par le modèle électrogéométrique

3.3.3. Conducteur situé au-dessus d'un sol plat et hétérogène.

L'influence du sol plat et hétérogène sur la zone d'attraction d'un conducteur placé horizontalement a été étudié à l'aide d'un modèle expérimental.



Foudroiement d'une ligne située au dessus d'un sol
Plat est homogène

3.3.3.1. Modèle expérimental.

Le modèle expérimental utilisé, présente une hétérogénéité du sol, dont la composante interface bien déterminée, était de l'acier galvanisé et du sable sec.

Conductivité de l'acier galvanisé : $\gamma_1 = 6,5 \cdot 10^6 \text{ s/m}$ /1 /

Conductivité du sable sec : $\gamma_2 = 13 \cdot 10^{-6} \text{ s/m}$ /1 /

La tige a une position verticale déterminée par la hauteur ' h ' et par la distance ' X '.

Le conducteur a une position horizontale déterminée par la hauteur ' h_c ' et la distance ' r '. Figure 3.2

3.3.3.2. Méthode de travail.

Comme il a été mentionné précédemment, nous étudions l'influence de l'hétérogénéité du sol sur la zone d'attraction du conducteur placé horizontalement. Figure 3.2

Les principaux paramètres introduits dans notre étude h_c, D tel que $D = x + d$.

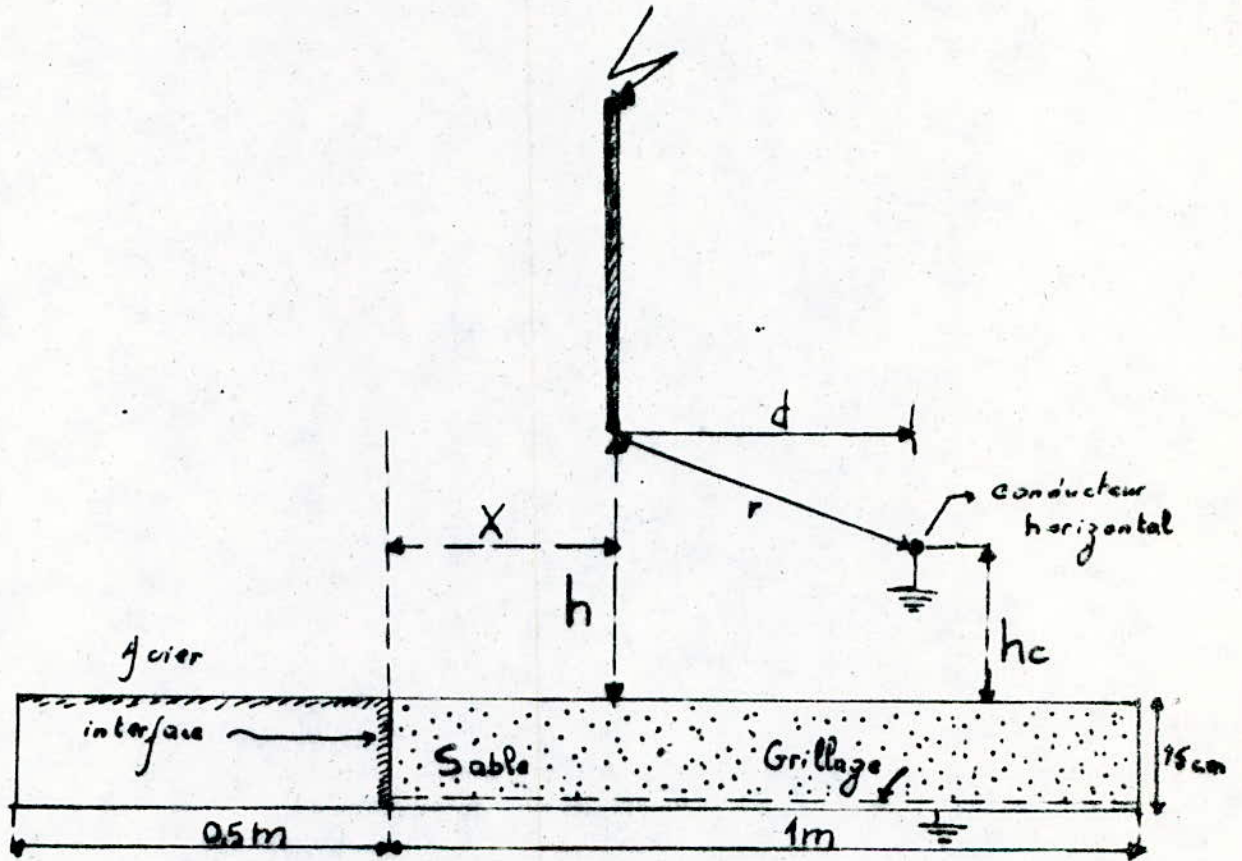
h_c : distance entre le plan et le conducteur horizontal.

X : distance entre l'interface et l'axe de la tige.

d : distance entre l'axe de la tige et le conducteur.

D'après les tableaux des résultats donnés au projet de fin d'études /1 /, on a tiré les points critiques pour lesquels la fréquence de foudroiement au conducteur est supérieure à 0,9.

Cette fréquence dépend de la configuration du système c'est à-dire la position du conducteur par rapport à l'interface (D/h_c) figure 3.2. Nous avons pris D/h_c comme paramètre influençant le foudroiement du conducteur pour déterminer l'espace d'attraction, en utilisant le système de coordonnées cylindrique relatif à la hauteur du conducteur h_c .



Modelle experimental

Fig: 3.e 1/1

D/h_c	$y' = y/h_c$	$x' = d/h_c$
$3,75 \pm 0,25$	8,25	3,55
	3,5	2,64
$6,25 \pm 0,25$	8,25	4,12
	7	3,95
$9,66 \pm 0,81$	8,25	5,88
	7	5,43

tableau des données//.

fréquence de foudroiement à la ligne est supérieur à 0,9.

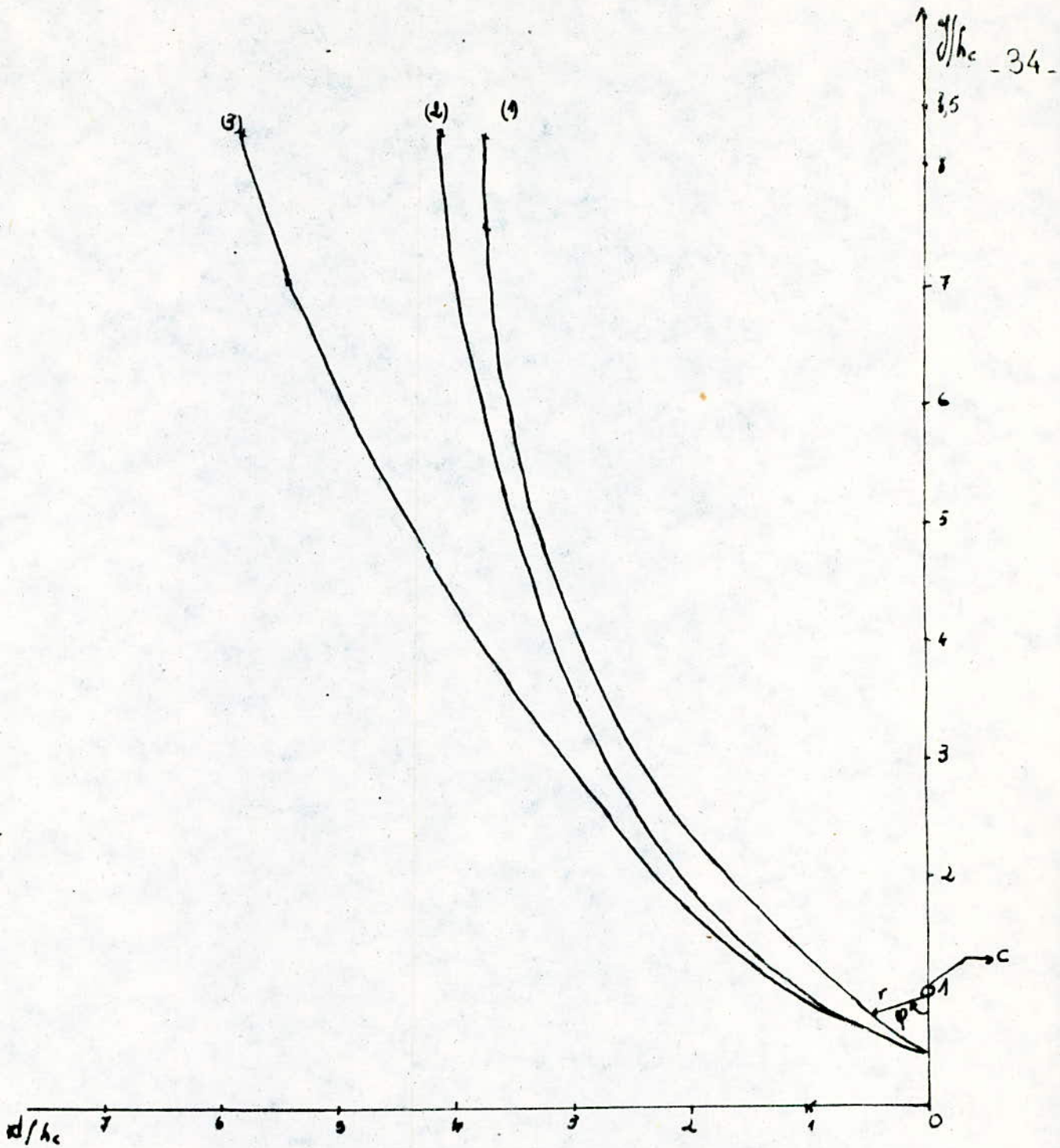
La zone d'attraction du conducteur varie avec sa position (D), (figure 3.e) par rapport à l'interface // /.

Nous utilisons les courbes (figure 3.f) qui représentent les surfaces limites de l'espace d'attractions pour déterminer le foudroiement de la ligne V_c pour lesquelles la probabilité de décharge au conducteur est presque 1.

La fonction qui vérifie les points de la courbe en coordonnées cylindriques (r, θ) est donnée par l'expression suivante :

$$\theta = \pi \operatorname{th} \left[a (r' - 0,5)^b \right]$$

avec $r' = r/h_c$: distance d'amorçage relative à la hauteur du conducteur.



c. Conducteur

Courbe (1) : $D/h_c = 3.75 \pm 0.25$

Courbe (4) : $D/h_c = 6.25 \pm 0.25$

Courbe (5) : $D/h_c = 9.66 \pm 0.81$

FIG: 3.f

zone d'attraction déterminée à partir du Tableau 3

les paramètres a, b varient avec D/hc.

D/hc	3,75 ± 0,25	6,25 ± 0,25	9,66 ± 0,81
a	0,56859998	0,4413999	0,5428
b	0,404540	0,497350	0,3296

tableau 3.3.

à l'aide de la méthode des moindres carrées, en utilisant un programme en FORTRAN que les paramètres a, b ont été calculés

Les coordonnées cylindriques (r, θ) sont données par les formules suivantes (figure 3.e).

$$r = \sqrt{d^2 + (h - h_c)^2}$$

$$\theta = \text{Arctg} \left(\frac{d}{h - h_c} \right)$$

D/hc	3,75 ± 0,25	6,25 ± 0,25	9,66 ± 0,81
r (cm)	8,05	8,25	4,5
φ (rd)	2,29184	2,63759	2,19159
r (cm)	3,654	7,21	7,81
φ (rd)	2,2655	2,55359	2,44693

3.4. - PROCEDE DE CALCUL DE FOUOROIEMENT SUR UN SOL HETEROGENE :

D'après la figure 3.f, les limites de l'intégrale $0,5 \leq r' < \infty$

$$0 \leq \theta' \leq \pi \operatorname{th}[a (r' - 0,5)^b].$$

En appliquant le même procédé que du sol homogène pour calculer le foudroiement relatif à B

$$V_{c/B} = \int_{0,5}^{\infty} \int_0^{\pi \operatorname{th}[a (r' - 0,5)^b]} h_c \cdot \frac{k_p}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{r'} \exp\left[-\frac{1}{2} k^2 p^2 (\ln(r'/r_m))^2\right] \cdot r' \cdot dr' \cdot d\theta'$$

$$V_{c/B} = \frac{k_p}{\sqrt{2\pi}} \int_{0,5}^{\infty} \int_0^{\pi \operatorname{th}[a (r' - 0,5)^b]} h_c \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} k^2 p^2 (\ln(r'/r_m))^2\right] dr' \cdot d\theta'.$$

$$V_{c/B} = \frac{k_p \cdot \pi \cdot h_c}{\sqrt{2\pi}} \int_{0,5}^{\infty} \operatorname{th}[a (r' - 0,5)^b] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} k^2 p^2 (\ln(r'/r_m))^2\right] dr'. \quad (13)$$

où : r_m est la distance d'amorçage moyenne relative à la hauteur du conducteur (Annexe.1)

L'intégrale (13) ne peut être résolue analytiquement, donc on passe par un calcul numérique, en faisant un programme en FORTRAN au MICROVAX du Centre de Calcul de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Le programme se base sur la méthode d'intégrale numérique de trapèze dont l'organigramme est présenté sur la figure (3.g).

3.4.1. Résultats obtenus.

A l'aide de ce programme, nous avons étudié le foudroiement d'un conducteur situé sur un sol hétérogène en fonction de la distance entre l'interface et le conducteur relative à la hauteur du conducteur.

D/hc	3,75	6,75	4,75
Vc/B (kV)	0,0215	0,0964	0,1196

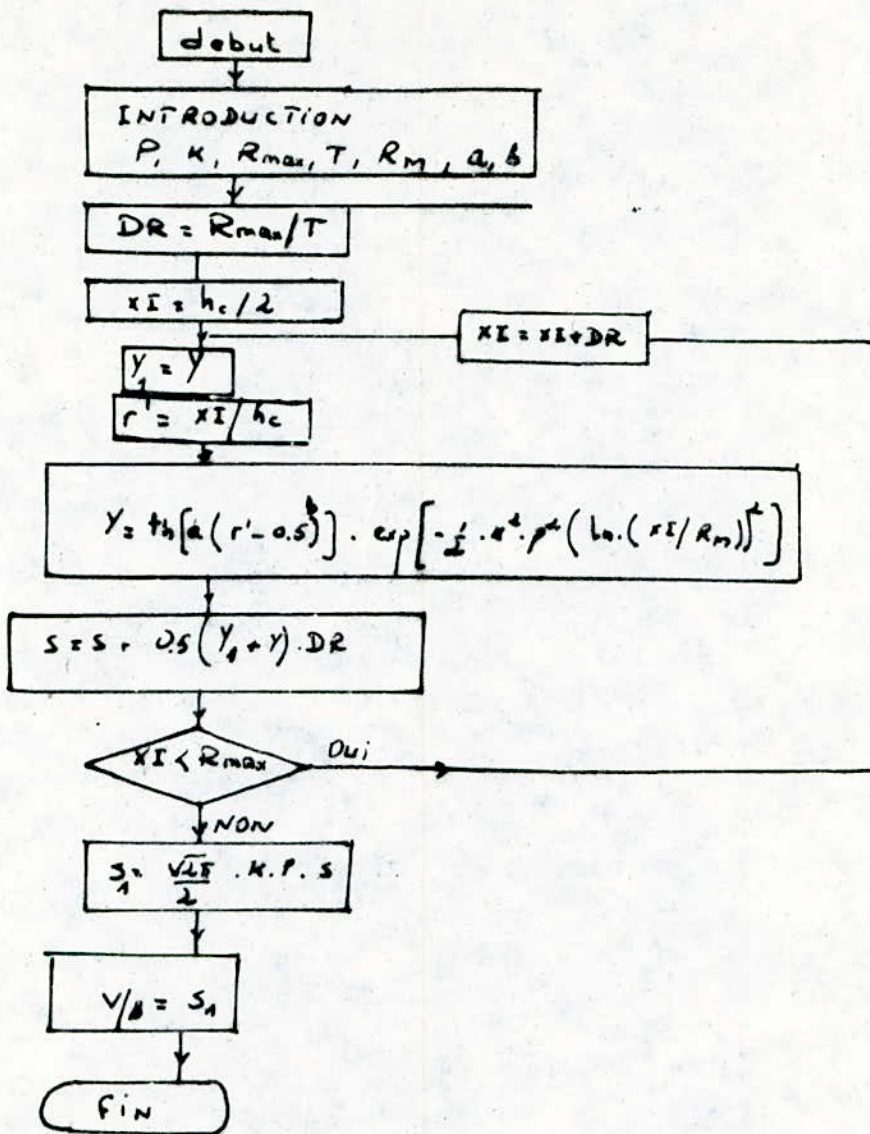


FIG: 3.9

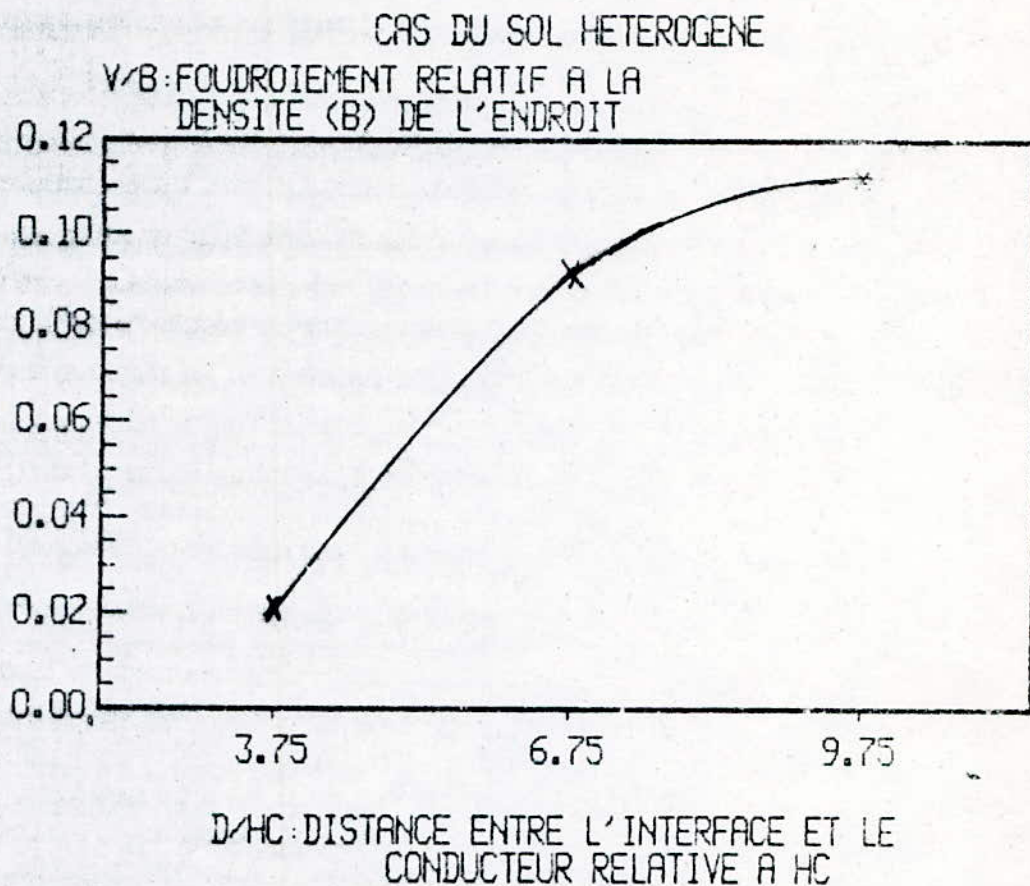


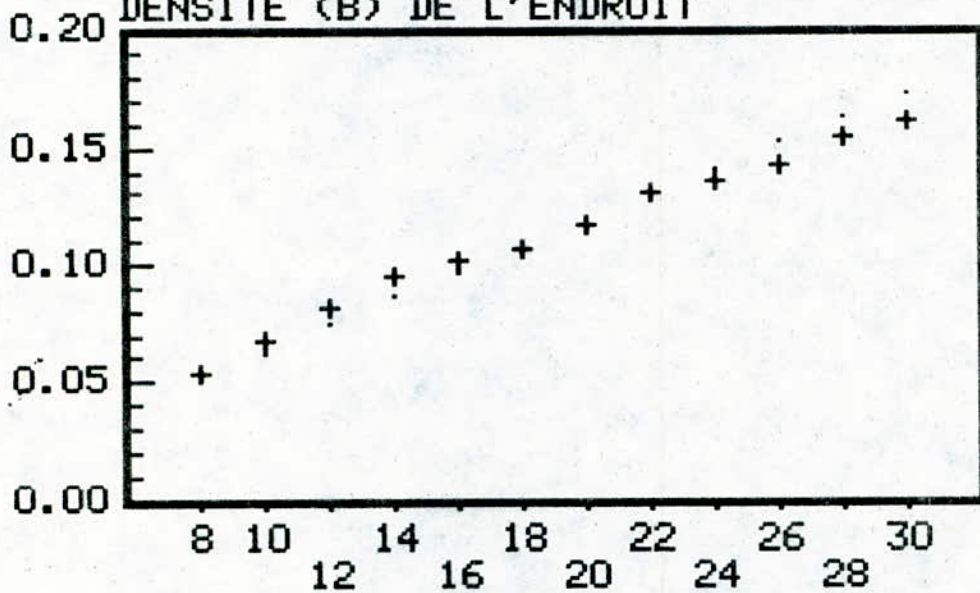
FIG: 3h

Foudroiement d'une ligne située au-dessus
d'un sol plat et hétérogène.

$$hc = 20 \text{ m}$$

CAS DU SOL HOMOGENE

V/B: FOUDROIEMENT RELATIF A LA
DENSITE (B) DE L'ENDROIT



· Graphe B
+ graphe A

H: HAUTEUR DE LA LIGNE EN METRE

FIG: 3.d

V_c/B est approximée a une fonction $f(h_c) = 1 - \exp(1 - ah_c)$
Le graphe (B) est la fonction approximée.

INTERPRETATION.

D'après la figure 3.f ,
la zone d'attraction des décharges par le conducteur augmente. En effet, toutes les caractéristiques (1, 2, 3) correspondent à une fréquence de décharge sur le conducteur supérieur à 0,9.

D'après la figure 3.h , pour des valeurs de D/h_c faibles le foudroiement au conducteur est faible, par contre il augmente, quand le rapport D/h_c croit et tend vers une valeur constante.

CONCLUSION.

Ce projet nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le phénomène de foudre.

A l'aide des calculs mathématiques, nous avons examiné l'influence de l'hétérogénéité du sol sur le foudrolement du conducteur. Nous avons pu constater que :

- La présence de l'interface modifie l'espace d'attraction du conducteur. En effet, cet espace diminue lorsque le conducteur mis à la terre est proche de l'interface qui sépare les deux milieux du sol qui a été choisi.

- Le foudrolement du conducteur augmente en fonction de D/h_c jusqu'à une valeur maximale de ce dernier.

- Par ailleurs, nous avons remarqué que la hauteur du conducteur a une influence directe sur le foudrolement de celui-ci.

- Nous supposons que le foudrolement du conducteur se ferait de manière identique que sur un sol homogène à partir d'une valeur maximale du rapport D/h_c . Nous proposons que des essais seront effectués afin de déterminer cette valeur, afin de finaliser le modèle de protection contre la foudre sur un sol hétérogène.

- ANNEXES -

ANNEXE 1

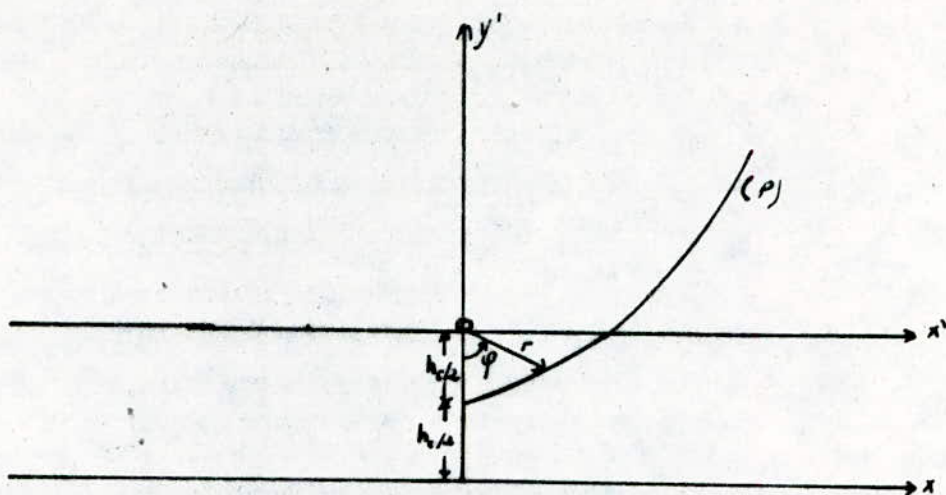


figure 1.

- par translation de repère. (figure 1) On a :

$$\text{d'où } y' = \frac{1}{2h_c} x'^2 - \frac{h_c}{2} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y - h_c \end{cases}$$

$$\text{avec } \begin{cases} x' = r \sin \varphi \\ y' = -r \cos \varphi \end{cases}$$

L'équation (1) devient :

$$-r \cos \varphi = \frac{r^2}{2h_c} \sin^2 \varphi - \frac{h_c}{2}, \text{ avec } \sin^2 \varphi = 1 - \cos^2 \varphi$$

$$\text{d'où } \cos^2 \varphi - \frac{2h_c}{r} \cos \varphi - \left(1 - \frac{h_c^2}{r^2}\right) = 0$$

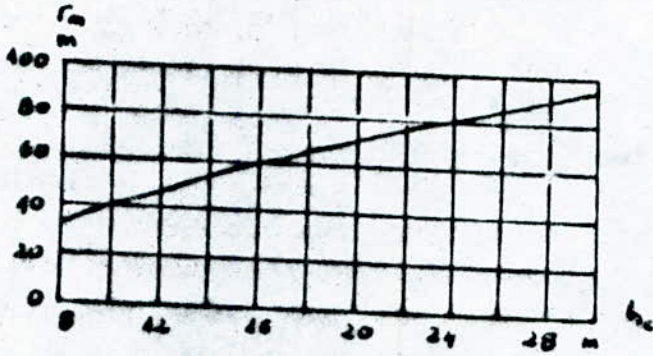
soit $\cos \varphi = \lambda$, donc

$$\lambda^2 - \frac{2h_c}{r} \lambda - \left(1 - \frac{h_c^2}{r^2}\right) = 0$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{2h_c/r \pm 2}{2} = \frac{h_c}{r} \pm 1; \quad \cos \varphi_{1,2} = \frac{h_c}{r} \pm 1$$

puisque $-1 \leq \cos \varphi \leq 1$ alors $\cos \varphi = \frac{h_c}{r} - 1$

$$\text{d'où } \varphi_0 = \arccos\left(\frac{h_c}{r} - 1\right)$$



h_c : hauteur de conducteur
 r_m : la distance d'amorçage moyenne
 la valeur médiane de la distance d'orientation // //
 correspondant à la hauteur h_c

h_c (m)	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
$r'_m = \frac{r_m}{h_c}$	4	4	3,9	3,85	3,75	3,55	3,7	3,54	3,33	3,23	3,14	3,23

$$-V_c/\beta = \frac{\kappa \cdot p}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_0^{\pi} \int_0^{h_c/4} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr \cdot d\varphi + \int_0^{\pi} \int_{h_c/2}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr \cdot d\varphi \right]$$

$$V_c/\beta = \frac{\kappa \cdot p}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_0^{\pi} \int_0^{h_c/2} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr \cdot d\varphi + \int_{h_c/2}^{\infty} (\pi - \varphi_0) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr \cdot d\varphi \right]$$

$$V_c/\beta = \frac{\kappa \cdot p}{\sqrt{2\pi}} \left[\int_0^{\pi} \int_0^{h_c/4} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr + \int_{h_c/4}^{\infty} \pi \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr - \right.$$

$$\left. \int_{h_c/4}^{\infty} \varphi_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr \right]$$

$$V_c/\beta = \frac{\kappa \cdot p}{\sqrt{2\pi}} \left[\pi \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr - \int_{h_c/4}^{\infty} \varphi_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr \right] \quad (2)$$

On pose $I_1 = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) dr$ (3), ou $\lambda = r/r_m$ et $d\lambda = \frac{dr}{r_m}$

$$\text{d'où } I_1 = r_m \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \kappa^2 \cdot p^2 (\ln(\lambda))^2\right) d\lambda \quad (4)$$

Introduisons une nouvelle variable désignée par "t". Cette variable est donnée par l'équation suivante :

$$t = \frac{\kappa \cdot p}{\sqrt{2}} \cdot \ln(\lambda) - \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \kappa \cdot p} \quad (5), \text{ d'où } t^2 = \frac{\kappa^2 \cdot p^2}{2} (\ln(\lambda))^2 - \ln(\lambda) + \frac{1}{2 \cdot \kappa^2 \cdot p^2}$$

La fonction exponentielle de cette dernière est égale à :

$$\exp(-t^2) = \exp\left(-\frac{\kappa^2 \cdot p^2}{2} (\ln(\lambda))^2\right) \exp(\ln(\lambda)) \cdot \exp\left(\frac{-1}{2 \cdot \kappa^2 \cdot p^2}\right)$$

comme $\exp(\ln(\lambda)) = \lambda$ d'où

$$\exp(-t^2) = \lambda \exp\left(-\frac{\kappa^2 \cdot p^2}{2} (\ln(\lambda))^2\right) \exp\left(\frac{-1}{2 \cdot \kappa^2 \cdot p^2}\right) \text{ d'où}$$

$$\frac{1}{\lambda \exp\left(\frac{-1}{2 \cdot p^2 \cdot \kappa^2}\right)} \cdot \exp(-t^2) = \exp\left(-\frac{\kappa^2 \cdot p^2}{2} (\ln(\lambda))^2\right) \quad (6)$$

de l'équation (5) On a :

$$\frac{dt}{d\lambda} = \frac{k \cdot p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad \text{d'où} \quad d\lambda = \frac{\lambda \cdot \sqrt{2}}{k \cdot p} \cdot dt \quad (7)$$

On remplace les équations (6) et (7) dans l'équation (4) on obtient

$$I_1 = r_m \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot k^2}\right)} \exp(-t^2) \cdot \frac{\lambda \sqrt{2}}{k \cdot p} dt \quad \text{d'où}$$

$$I_1 = r_m \int_0^{\infty} \frac{1}{\exp\left(-\frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot k^2}\right)} \exp(-t^2) \frac{\sqrt{2}}{k \cdot p} dt = \frac{r_m \cdot \sqrt{2}}{k \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot k^2}\right)} \int_0^{\infty} \exp(-t^2) dt$$

et comme $\int_0^{\infty} \exp(-t^2) dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$ donc

$$I_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot r_m}{k \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot k^2}\right)} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (8)$$

On remplace la constante (8) dans l'équation (2), On obtient

$$V_c / B = \frac{k \cdot p}{\sqrt{2\pi}} \left[\pi \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot r_m}{k \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot k^2}\right)} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} - \int_{h_c/2}^{\infty} \varphi_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot k^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) \cdot dr \right] \quad (9)$$

On remplace $\varphi_0 = \arccos\left(\frac{h_c}{r} - 1\right)$ dans l'équation (9), on obtient

$$V_c / B = \frac{k \cdot p}{\sqrt{2\pi}} \left[\pi \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot r_m}{k \cdot p \cdot \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot k^2}\right)} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} - \int_{h_c/2}^{\infty} \arccos\left(\frac{h_c}{r} - 1\right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot k^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) \cdot dr \right]$$

$$V_c / B = \frac{\pi \cdot r_m}{2 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot p^2 \cdot k^2}\right)} - \frac{k \cdot p}{\sqrt{2\pi}} \int_{h_c/2}^{\infty} \arccos\left(\frac{h_c}{r} - 1\right) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot k^2 \cdot p^2 (\ln(r/r_m))^2\right) \cdot dr$$

ANNEXE: 2

$$v/s = 1 - \exp(-a \cdot h_c) \text{ d'où } \exp(-a \cdot h_c) = 1 - v/s$$

$$\text{donc } -a \cdot h_c = \ln(1 - v_c/s) \text{ d'où } a = - \frac{\ln(1 - v_c/s)}{h_c}$$

pour les différentes valeurs de v_c/s correspondant à h_c

on forme le tableau suivant :

h_c (m)	v_c/s (km^2)	a (m^{-1}) $\times 10^3$
8	0.05229822	6.7144
10	0.662271	6.43
12	0.0734733	6.31
14	0.0967198	6.95
16	0.09334	7
18	0.1059644	6.22
20	0.115836	6.16
22	0.1231441	6.28
24	0.1341192	5.433
26	0.1407340	5.83
28	0.21523238	5.3
30	0.1606023	5.3356

On prend la valeur moyenne de $a = \frac{\sum a_i}{n}$ d'où $a = 6,29 \cdot 10^3 \text{ [m}^{-1}\text{]}$

BIBLIOGRAPHIE.

- |1| K. MILOUDI, M. MOKHTARI
"Utilisation d'un paratonnerre horizontal sur
un sol hétérogène". - 1987
- |2| G. LE ROY, C. GARY, B. HUTZLER, J. LALOT
CH. DUBANTON
"Les propriétés diélectriques de l'air et les
très hautes tensions". - 1980
- |3| C. GARY, A. CIMADOR, R.FIEUX
La foudre "Étude du phénomène" ; RGE Tome 84
N° 1 - Janvier 1975
- |4| M. BNOOK and J. OGAWA
"The cloud discharge Academic Press 1977
LONDON (R.H. GOLDE : Lightning 6.)
- |5| RGE. Tome 89 N°5 - Mai 1980.
- |6| FERRAS J.
"L'influence des propriétés électrogéologiques
du sol sur le point d'impact de la décharge de
foudre".
Thèse de Magister - Option : Machines 1987.
- |7| Kamel HADIDI et Larbi BOUDJNANE
"Calcul numérique des tensions induites par la
foudre dans les circuits du centre de calcul
de l'E.N.P." - Janvier 1986.
- |8| T. E. ALLIBONE
"Velocities of leader - strokes to lightning and
spark discharge."
- |9| R. E. ORVILLE and V. P. IDONE
"Lightning parameters for engineering application
CIGE ST STUDY COMMITTEE 33 - 25 - 29
- |10| R. H. GOLDE
"The lightning discharge, lightning protection
3.E ARNOT AHOLD - 1973
- |11| ARNOLD - EPULETEK Villa mrédele (Hongrois)
MUSZAKI KONYVKIADO BUDAPEST 1980
- |12| S.B. GRISCOM
"The lightning prestrike theory westinghouse
engineer - Novembre 1963 P. 172

- [13] HORVATH
"Décharge de foudre et protection contre la foudre."
- [14] R. B. ANDERSON et A.G. ERJKSON
"Lightning parametres for engenering application - 1979"
- [15] C. B. MOORE and B. VONNEGUT
"The thovn dercloud,"
Academic Presse - 1977
LONDON 11 (R.H. Golde : Lightning 3).
- [16] MIDOBARDZIC
"Formes des décharges glissantes sous tension de choc 1,2/50 us sur les surfaces de diélectriques solides pollués par le sable du Sahara" (Thèse E.N.P.)
- [17] HADDAD - TERKI Nacer
"Protection contre la foudre du Laboratoire de haute tension de l'E.N.P."
Projet de fin d'études - 1985
- [18] T. MORVADH
"Pratical application of the probability theory of lightning strckes"
- Novembre 1979

