

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT de Génie Électrique

### PROJET DE FIN D'ETUDES

#### SUJET

Utilisation D'un Paratonnerre  
Horizontal  
Sur Un Sol Hétérogène

Proposé par :

M<sup>r</sup>. A-Boubakeur

Etudié par :

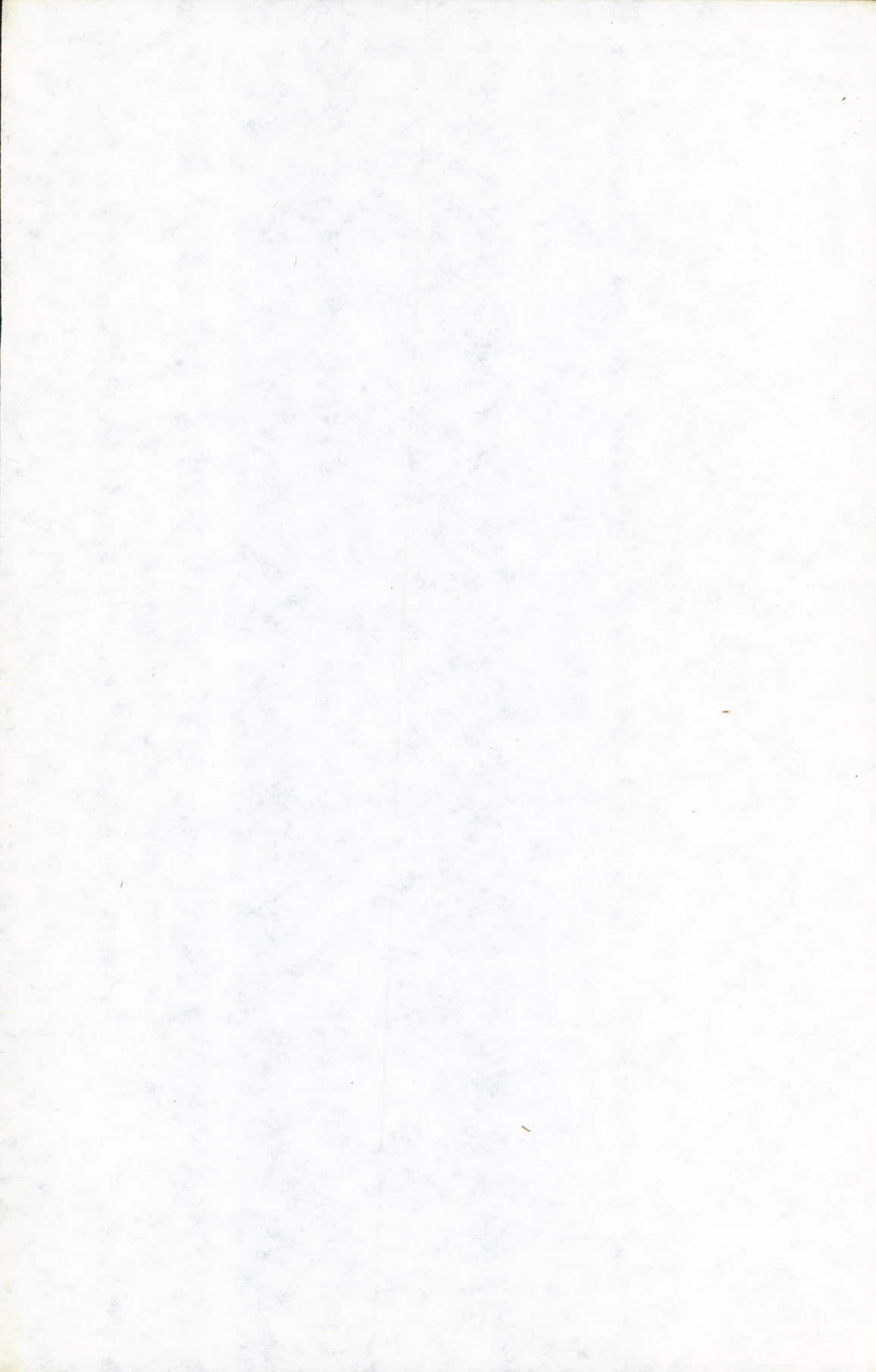
K-Miloudi

M-Mokhtari

Dirigé par :

M<sup>me</sup> J-Ferras

PROMOTION : janvier 88



-ooOoo- D E D I C A C E S -ooOoo-

*Je dédie ce modeste travail à mes parents, à mes frères  
et soeurs, à toute ma famille, ainsi qu'à tous mes  
amis .*

*MJLOUJ . KHALED .*

*Je dédie ce modeste travail à mes parents en signe  
de reconnaissance pour tout sacrifice consenti à mon égard et  
leur soutien moral, matériel et leur encouragement durant mes  
études.*

- A mes frères et mes soeurs, et à toute ma famille.*
- A AMROUCHE A. ET à MOKHTARJ K. et à NABIL.*
- A tous mes amis*

*MOKHTARJ MUSTAPHA.*



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

Au terme de ce travail , nous tenons à remercier vivement Madame FERRAS et Monsieur BOUBAKEUR pour leurs précieux conseils et leur bienveillante attention avec lesquels , ils nous ont aidé dans l'élaboration de ce projet.

Nous n'oublions pas de remercier tout ce ux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail .

## SOMMAIRE

### INTRODUCTION

CHAPITRE 1 : Etude du phénomène de décharge de foudre sur  
un sol hétérogène.

1.1 : Décharge de foudre

1.1.1 / Déroulement du phénomène de la décharge de  
foudre .

1.1.2 / Mécanisme d'impact d'un coup de foudre .

2.2 / Répartition des décharges de foudre sur le sol .

CHAPITRE 2 : Utilisation d'un paratonnerre horizontal sur  
un sol homogène ;.

### GENERALITES :

2.1 / Principe de protection par la méthode de la  
sphère fictive .

2.2 / Zone de protection d'un fil tendu horizontalement.

CHAPITRE 3 : Utilisation d'un paratonnerre horizontal sur  
un sol hétérogène .

### INTRODUCTION :

3.1 / Essais .

3.1.1 / Modèle utilisé .

3.1.2 / La conductivité du sable .

3.1.3. / Méthode de travail .

.../...

3.2 / Resultats d'essais .

3.2.1. / Phénomène de décharge .

3.2.2 / Probabilité de décharge .

3.2.3 / Foudroiement du paratonnerre horizontal .

CONCLUSIONS /

-oo00oo-\$\$-oo00oo-

المدسة الوطنفة المفعفة الففففف  
BIBLIOTHEQUE — المففففة  
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION



Depuis l'antiquité, l'homme a été confronté au phénomène de décharge de foudre et à ses effets destructeurs, qu'il interpréta de plusieurs façons. Est-ce-n'est qu'à partir de ce siècle que ce phénomène atmosphérique a commencé d'être profondément étudié.

Grâce au progrès technologiques, de nouvelles informations ont été obtenues concernant le mécanisme de la décharge de foudre.

Ces nouvelles notions ont permis entre autre de mieux connaître le fonctionnement des paratonnerres. Il a été mis en évidence que les paratonnerres attirent les décharges de foudre et que leur zone d'attraction est déterminante pour l'efficacité de protection contre la foudre.

Certaines études ont été consacrées à l'étude de la nature du sol qui pourrait avoir une influence sur son foudroiement (4).

Dans notre présent rapport, nous nous sommes intéressés à examiner l'influence d'un sol hétérogène sur la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal. Le modèle le plus approprié à cette étude est un sol plat hétérogène avec conducteur, mis à la terre, placé horizontalement. Pour exécuter ce travail, nous avons d'abord étudié le phénomène de la décharge de foudre, ainsi que la répartition de ces décharges sur un sol homogène puis hétérogène.

.../...



Nous avons étudié aussi la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal sur un sol homogène .

Et en-fin, à l'aide d'un modèle pratique, nous avons effectué une étude statistique pour déterminer la zone d'attraction du paratonnerre.

Le sol hétérogène utilisé lors de nos essais est constitué de deux conductivités différentes (Acier galvanisé + Sable sec).

Afin de simuler les phénomènes naturels, une tige verticale liée à un générateur de choc jouera le rôle d'un traceur de foudre négatif descendant.

Les paramètres introduits dans l'étude statistique sont :

- La distance entre la pointe de la décharge descendante et la surface du sol .
- La distance entre l'interface et l'axe de la décharge descendante .
- La hauteur du conducteur horizontal par rapport au sol.

.../...

CHAPITRE 1

ETUDE DU PHENOMENE DE DECHARGE  
DE Foudre  
SUR UN SOL HETEROGENE

## 1-1 Décharge de foudre

La formation du nuage orageux ( ou Cumulo-Nimbus ) est causée par l'instabilité de l'atmosphère due aux conditions météorologiques et géographiques.

Pratiquement dans chaque théorie qui explique la formation des nuages, la séparation des ~~de~~charges est liée à la condensation des nuages, à la présence d'un champ électrique entre l'atmosphère et le sol, et à un vent montant et humide (1). Elle est telle <sup>qu'elle</sup> engendre un champ électrique à la surface du sol orienté vers le nuage. L'intensité de ce champ peut atteindre des valeurs comprises entre 15 et 20 kv/m (4).

Certaines expériences ont montrées que la valeur de 20 kv/m est rarement dépassée, car à cette valeur, les conditions de déclenchement de la foudre sont alors atteintes.

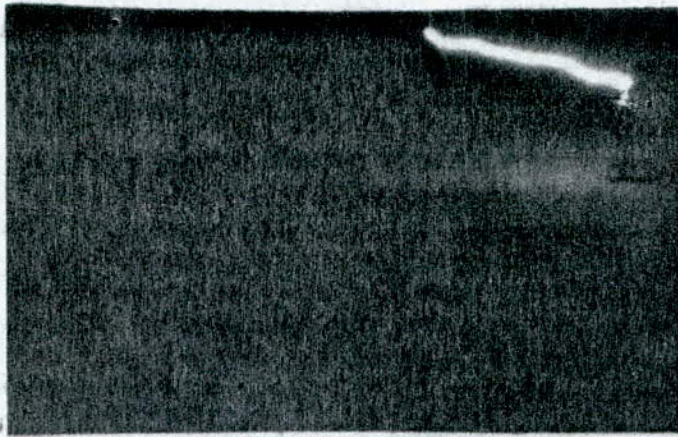
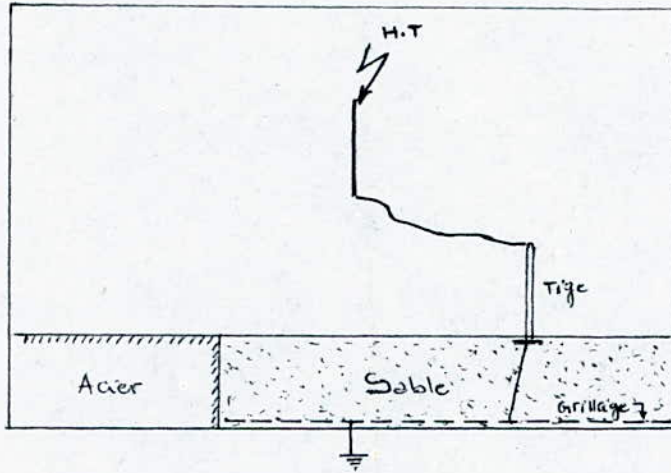
De plus, toute aspérité (figure 1, par effet de concentration des lignes de forces et de tassement des surfaces équipotentielles peut considérablement augmenter le champ superficiel local.

### 1.1.1 - Déroulement du phénomène de la décharge de foudre

On peut distinguer selon K. Berger (1), quatre types de décharges de coups de foudre au sol qui sont classés selon la polarité du nuage déchargé et selon le sens de propagation du traceur (figure 2) tableau 1.

.../...





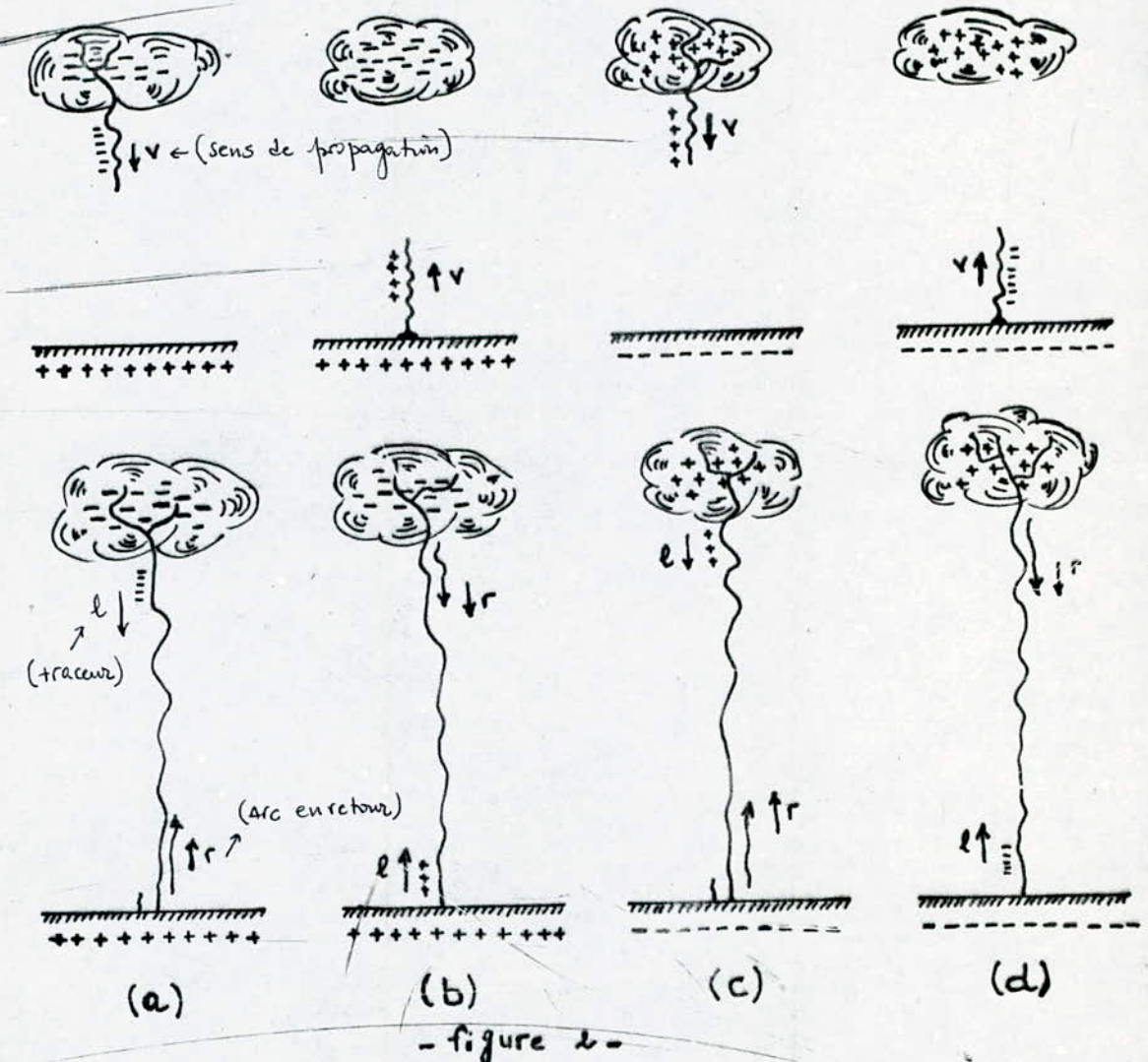
## Décharge En Présence d'ASPÉRITE'

Expérience faite au Laboratoire

Haute-tension de L'EMPA.

Sens de Propagation de la précharge		Polarité	figure	%
Précharge	descendante	Négative	2 (a)	80 à 90
Précharge	Ascendante	Positive	2 (b)	80 à 90
Précharge	descendante	Positive	2 (c)	10 à 20
Précharge	Ascendante	Négative	2 (d)	extrême rare

Tableau 2. Classification des coups de foudre  
Selon K. BERGER



Classification Des Coups De Foudre  
Selon. K. Berger [4]



Dans ce qui suit, nous nous intéresserons au déroulement de la décharge descendante négative qui représente le cas le plus fréquemment rencontré (80 / ± 90 ) % (5) .

Une telle décharge se déroule en deux étapes :

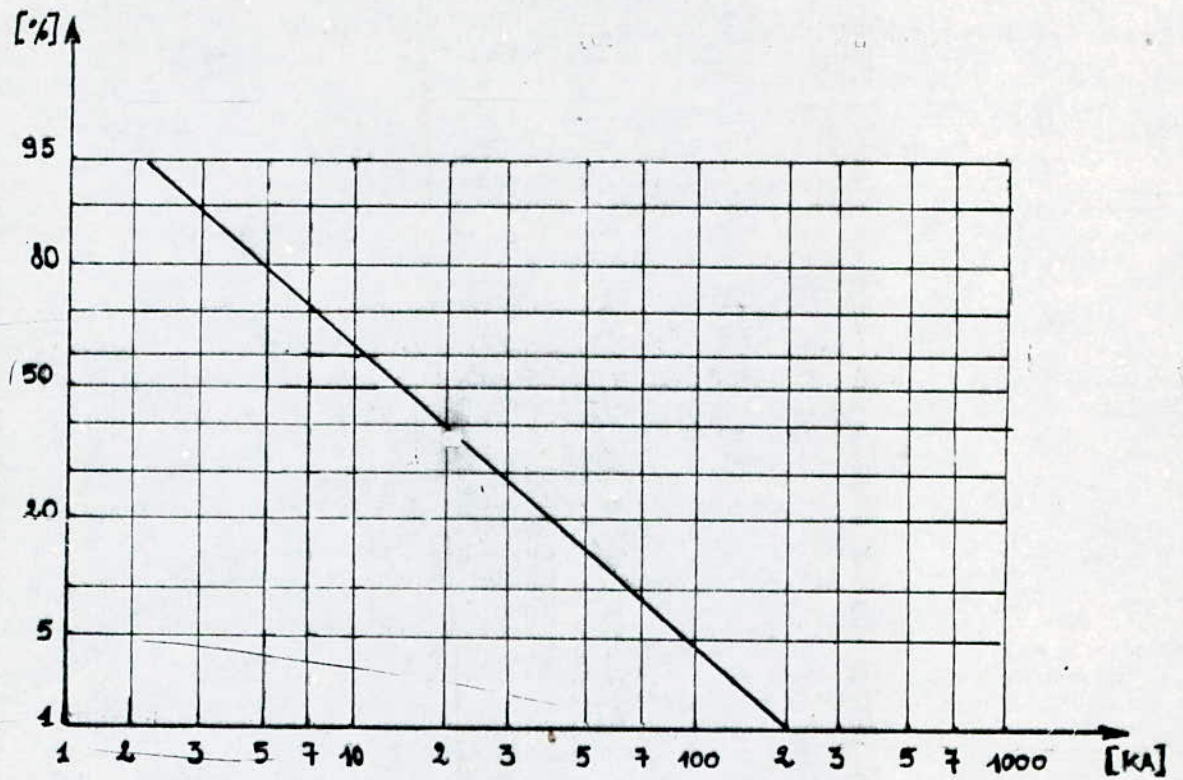
- 1)- Décharge préliminaire ou traceur .
- 2)- Décharge principale .

La décharge préliminaire se manifeste sous forme d'une étincelle faiblement lumineuse prenant naissance en un point du nuage où l'intensité du champ dépasse la valeur critique  $E_{cr} \approx 30 \text{ kv/km}$  (13). En général, cette décharge préliminaire n'atteint pas la terre en une seule étape, mais progresse par bonds d'environ 50 mètres interrompus par des arrêts d'une durée d'environ ( 50 + 100 )  $\mu\text{s}$  à chaque palier (1) . La vitesse moyenne de développement du canal ionisé qui est la phase invisible est de l'ordre de 0,5 m /  $\mu\text{s}$ , et d'une durée qui peut atteindre 4ms . La durée d'un seul éclair qui est la phase visible est aux environs de 200  $\mu\text{s}$  .

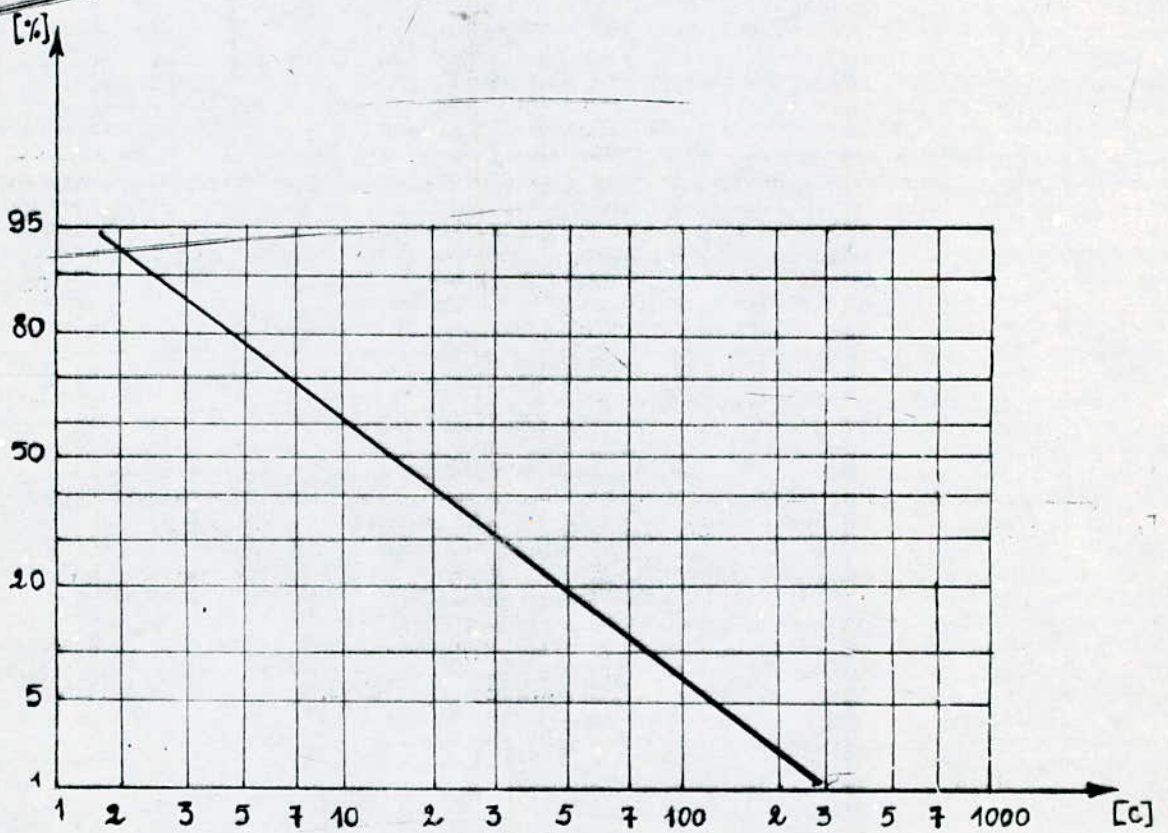
Dès que la pointe du traceur est assez proche du sol , une prédécharge ascendante (Ou traceur d'interception ) peut se développer vers le traceur principal à partir de la terre où l'intensité du champ local a atteint la valeur critique . Lorsque le traceur d'interception et le traceur principal se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol qui permet le passage d'un très fort courant d'une valeur ( 2 + 200 ) kA (Figure 3 ) et transporte

.../...





Distribution Statistique des amplitudes de Courants  
de foudre  
- figure 3 -



Distribution Statistique des charges écoulées  
Par un coup de foudre  
- figure 4 -

une charge électrique d'environ 20 C (3), (Figure 4). C'est ce qu'on observe ~~qu'un~~ coup de foudre (Figure 5 et 6).

La décharge principale véhicule des ~~de~~ charges positives qui neutralisent 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 (5). Les traceurs de ces décharges successives progressent de façon continue (Dart Leader). Le nombre de décharges successives est en moyenne égale à 3, mais peut être aussi égale à 10 ou plus (1), (Figure 6), (4).

#### 1.1.2. Mécanisme d'impact d'un coup de foudre descendant

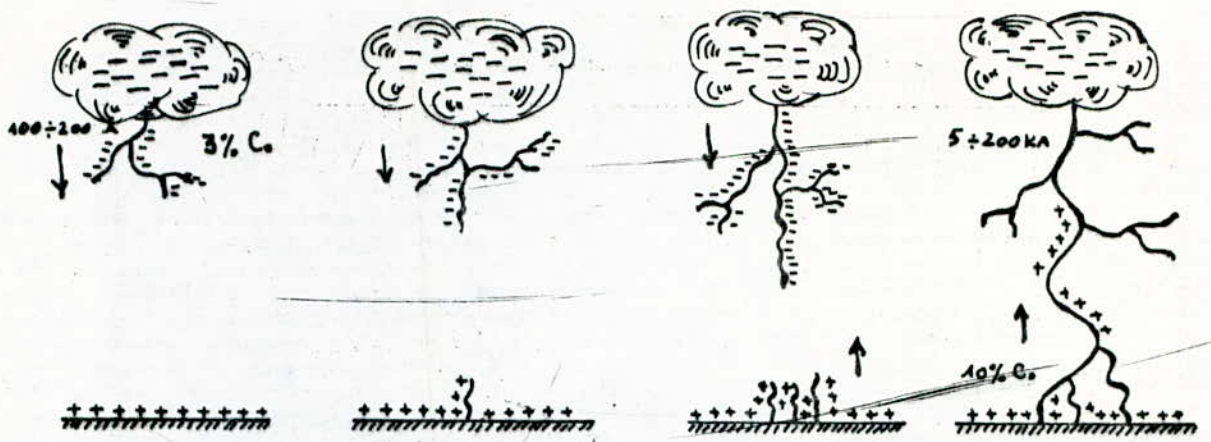
Le point d'impact d'une prédécharge est décidé au dernier saut de son développement à une certaine distance du sol. Cette distance est appelée "distance d'amorçage".

Le saut final, qui est la dernière phase de la croissance du leader, commence lorsque les streamers de la couronne situés à la tête de ce leader touchent le sol ou rencontrent les prédécharges ascendantes (6 et 7). Celles-ci démarrent à partir d'un point de la terre où l'intensité du champ atteint la valeur critique. Le point dans l'espace où se trouve la tête de la redécharge juste avant le saut final est appelé "Point Critique".

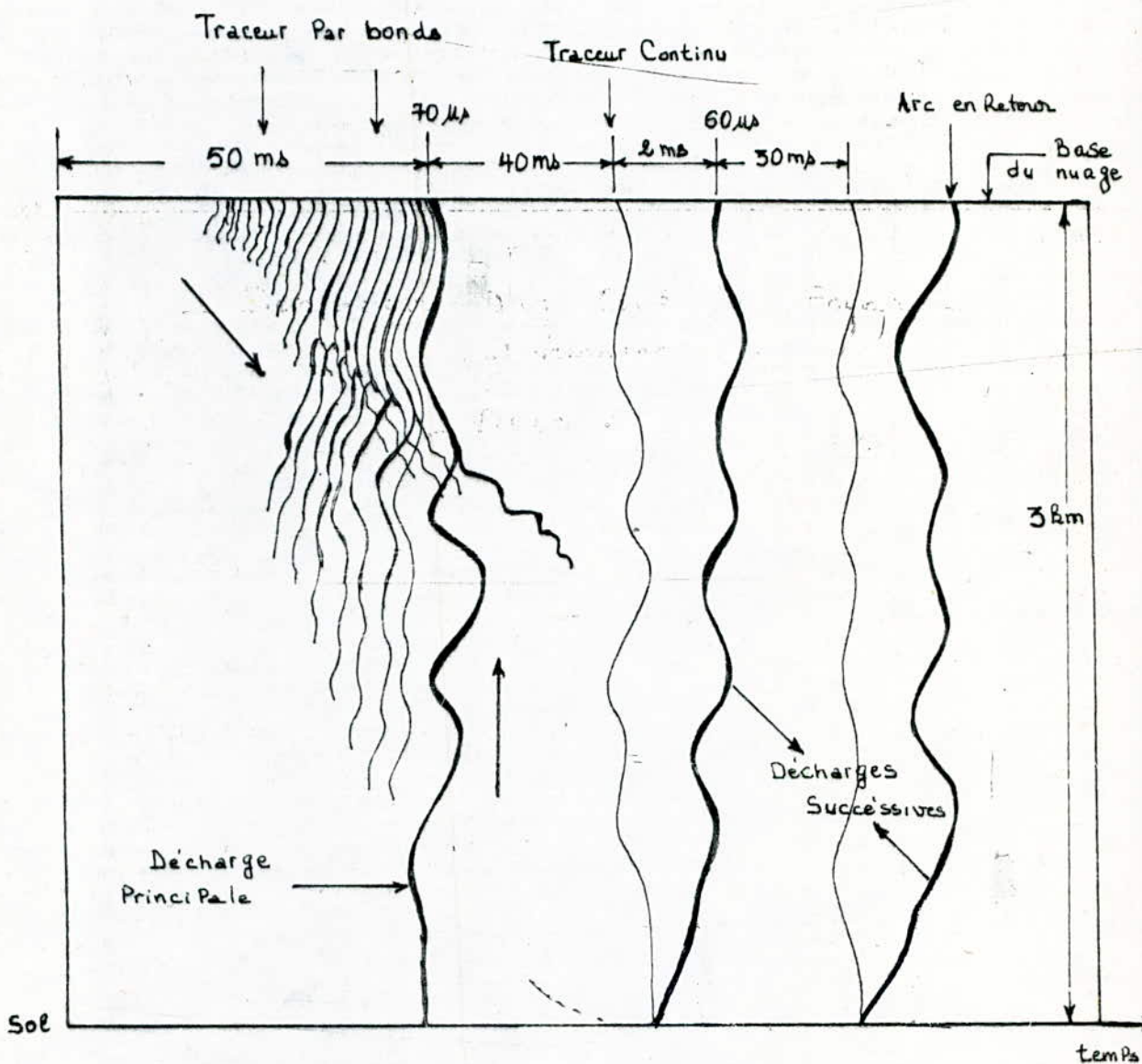
En tenant compte de ce qui a précédé, une expression analytique de la distance d'amorçage, en fonction de l'intensité de crête de la première décharge du coup de foudre a été établie (2,4 et 9):

.../...





- Coup De Foudre Descendant Négatif -  
- figure 5 -



- Déroulement D'un Coup De Foudre -  
Descendant négatif.

- figure 6 -



$$d = 9,4 I^{2/3}$$

où :  $d$ : distance d'amorçage en mètre.

$I$ : Intensité de crête en kA .

des travaux antérieurs, utilisent l'expression suivante comme distance d'amorçage:

$$d = 6,7 I^{0,8}$$

mais la première expression est plus rigoureuse surtout pour les forts courants . Pour que ce modèle soit utilisable pratiquement , on admettra que l'expression de la distance d'amorçage reste applicable quelque soit la nature de l'objet au sol ( y compris le sol plat lui-même ), (4) .

Les distance d'amorçage en fonction de l'amplitude du courant de foudre sont données par la figure 7 (4).

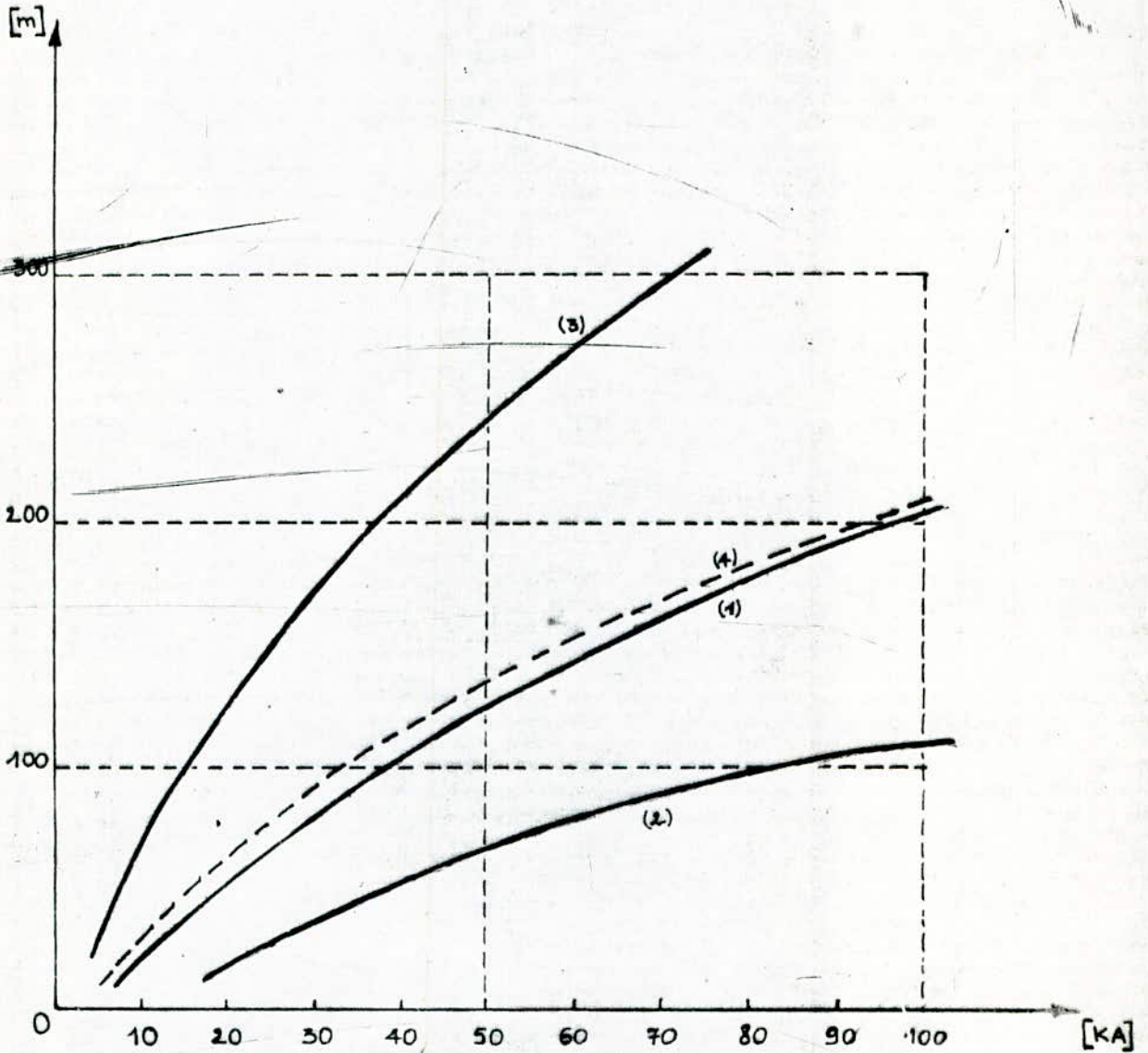
### 1.2 - Répartition des décharges de foudre sur le sol :

Pour caractériser la sévérité orageuse, on définit le niveau kéraunique comme étant le nombre de jours orageux par année en un lieu d'observation donné. Une définition plus rigoureuse est la densité de coup de foudre au sol exprimée en nombre de coup par km<sup>2</sup> et par an. Cette notion a permis d'établir des courbes isokérauniques <sup>Ainsi:</sup> pour un sol plat homogène ayant le même niveau kéraunique, la probabilité de se charger est la même en tous les points.

### 1.3 - Décharges de foudre sur un sol hétérogène :

Le sol n'a aucune influence sur la propagation du traceur avant que celui - ci n'atteigne le point critique . Ce ne seraient que

.../...



Distances d'amorçage en fonction de l'amplitude de courant de foudre

- figure 7 -

- (1) Whithead .
- (2) Gold ..... (1949) .
- (3) Rühling ..... (1972) .
- (4) Gary ..... (1979) .



des facteurs tout à fait locaux qui pourraient avoir une action sur la décision de l'impact de la foudre.

La présence des saillies, arbres, bâtiments, cheminées sont l'un de ces facteurs bien connus.

Par ailleurs, il a été constaté que l'impédance de la région du sol où prend naissance la décharge ascendante a très probablement une influence sur le développement de celle-ci (4), (8).

Ainsi une grande conductivité du sol favoriserait le développement de la décharge ascendante. Cette théorie peut - être appliquée aux failles humides ou aux nappes d'eau et aux terrains marécageux.

L'autre part, des études au laboratoire sur un sol hétérogène présentant deux conductivités différentes (9) ont montré que la présence de l'interface des deux composantes modifie considérablement la répartition d'impact sur la surface du sol.

Les résultats montrent qu'au point où l'intensité du champ électrique est la plus élevée, au moment du saut final, on obtient une plus grande probabilité de décharge. L'intensité du champ est augmentée au niveau de l'interface, et cette augmentation dépend des conductivités des deux composantes du sol, de la distance entre électrodes "h" et de la distance "x" entre l'interface et l'axe de la tige. (9).

.../...



CHAPITRE 2

UTILISATION D'UN PARATONNERRE

HORIZONTAL

SUR UN SOL HOMOGÈNE

.../...

Le but de la protection contre la foudre est de diminuer la probabilité de danger pour les vies humaines et de dégâts matériels qui pourraient se produire lors d'un coup de foudre .

Comme on a vu précédemment, plusieurs points de vue ont été émis en ce qui concerne le point d'impact de la foudre .

Pour assurer la protection contre la foudre, de certains éléments, on place à leurs niveau un objet préférentiellement placé pour capter la foudre. Les dimensions de cette objet varient pour les différents points de vue.

Une zone de protection d'un objet donné peut - être considéré comme étant l'espace environnant cette objet , où la probabilité d'atteinte pour la foudre est très faible (1), (9) .

La tendance actuelle consiste en l'emploi d'un modèle électrogéométrique pour le calcul logiquement probabiliste des protections . Cette approche fournit les meilleurs résultats de la protection contre la foudre sur un sol homogène.

## 2.1 - Principe De protection par la méthode de la sphère fictive :

Suivant le modèle électrogéométrique, tout se passe comme si la pointe du traceur était le centre d'une sphère fictive, de rayon "d" (Distance d'amorçage) qui l'accompagne rigidement au cours de la trajectoire à priori aléatoire du traceur.

A l'approche du sol, le premier objet touché par la 'sphère'

.../...

déterminera le point d'impact du coup de foudre. Imaginons que cette sphère est roulée au 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 protection, sans jamais pouvoir toucher l'un des objets à protéger, alors la protection est assurée.

## 2.2 - Zone de protection d'un fil tendu horizontalement:

En appliquant la méthode de la sphère fictive à un fil horizontal de hauteur "h", on peut trouver deux cas pour la protection fournie autour de celui.

Le premier cas quand  $d > h$ ; est montré sur la figure 8.

Le rayon de protection au sol est:

$$x_0 = \sqrt{2hd - h^2} \quad (9), (10).$$

Et la condition pour qu'un objet soit correctement protégé est qu'il soit entièrement inclus dans la zone de protection (Partie Hachurée), voir figure 8.

Le deuxième cas a lieu quand  $d < h$ , figure 9, où le rayon de protection est toujours :

$$x_0 = \sqrt{2hd - h^2} \quad (9), (10).$$

Et la hauteur "p" maximale que peut avoir un objet à protéger directement audessous du fil horizontal est donnée par :

$$p = 2d - h \quad (9), (10).$$

Ainsi, la hauteur maximale  $h_{\max}$  du fil horizontal recommandé pour une distance d'amorçage "d" donnée est:

$$h_{\max} = d \quad (9), (10)$$

.../...



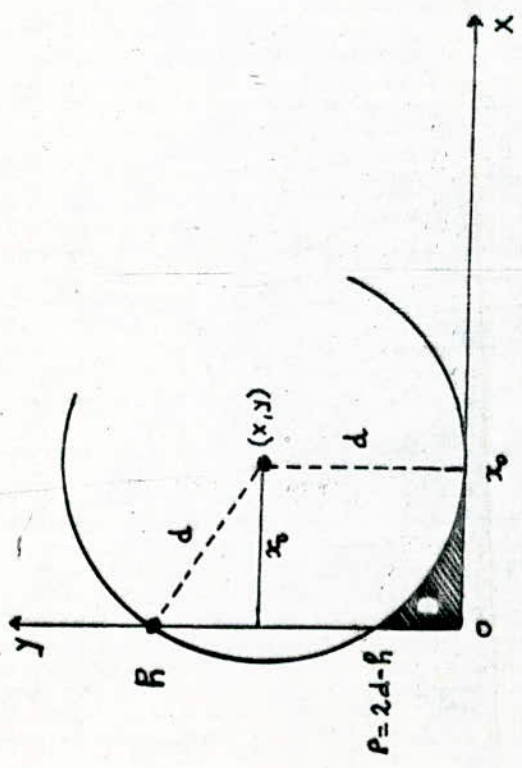


figure 8

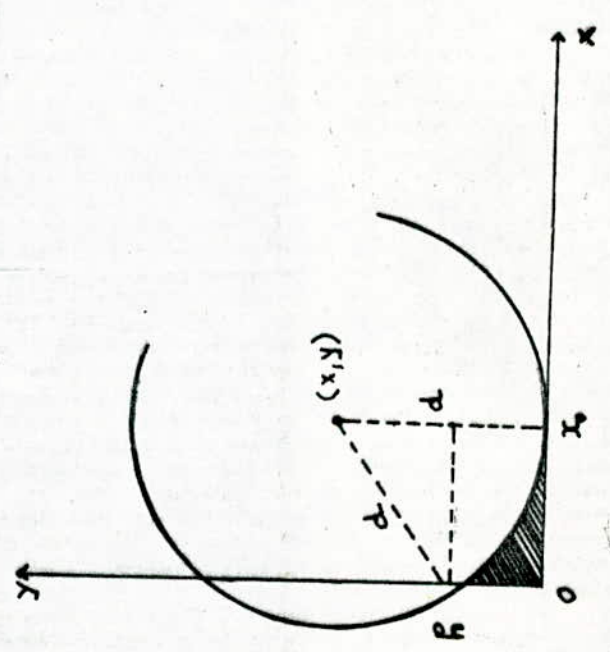
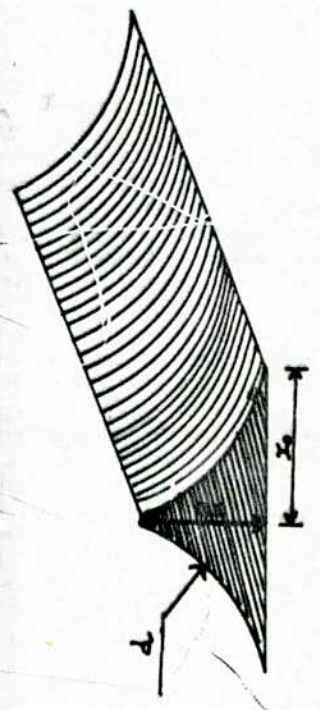
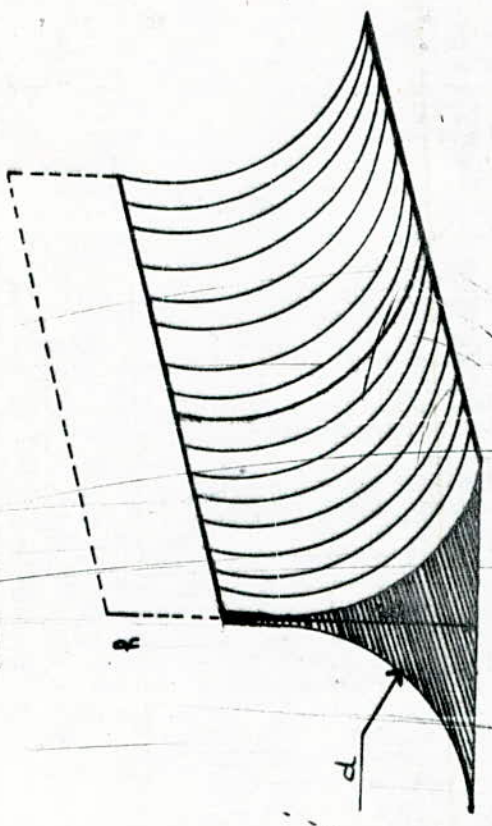


figure 9



CHAPITRE 3

UTILISATION D'UN PARATONNERRE

HORIZONTAL

SUR UN SOL HETEROGENE.

.../...

Le modèle expérimental choisi dans notre travail a pour but d'étudier l'influence d'un sol hétérogène plat sur la zone d'attraction d'un conducteur placé horizontalement .

La décharge de foudre est simulée dans le laboratoire par des impulsions de forme 1,2 / 50  $\mu$ s .

La prédécharge de foudre a été simulée par une tige verticale dont la pointe représente le point critique . C'est à partir de ce point que le saut final s'effectue.

Suivant la hauteur "h" de la tige , les impulsions appliquées avaient une valeur de crête suffisamment grande entraînant à coup sûr la décharge disruptive  $U_{100\%}$  .

### 3.1 - ESSAIS :

#### 3.1.1 - Modèle utilisé :

Le modèle expérimental utilisé, présente une hétérogénéité du sol , dont les composantes, ayant une interface bien déterminée, étaient de l'acier galvanisé et du sable sec .

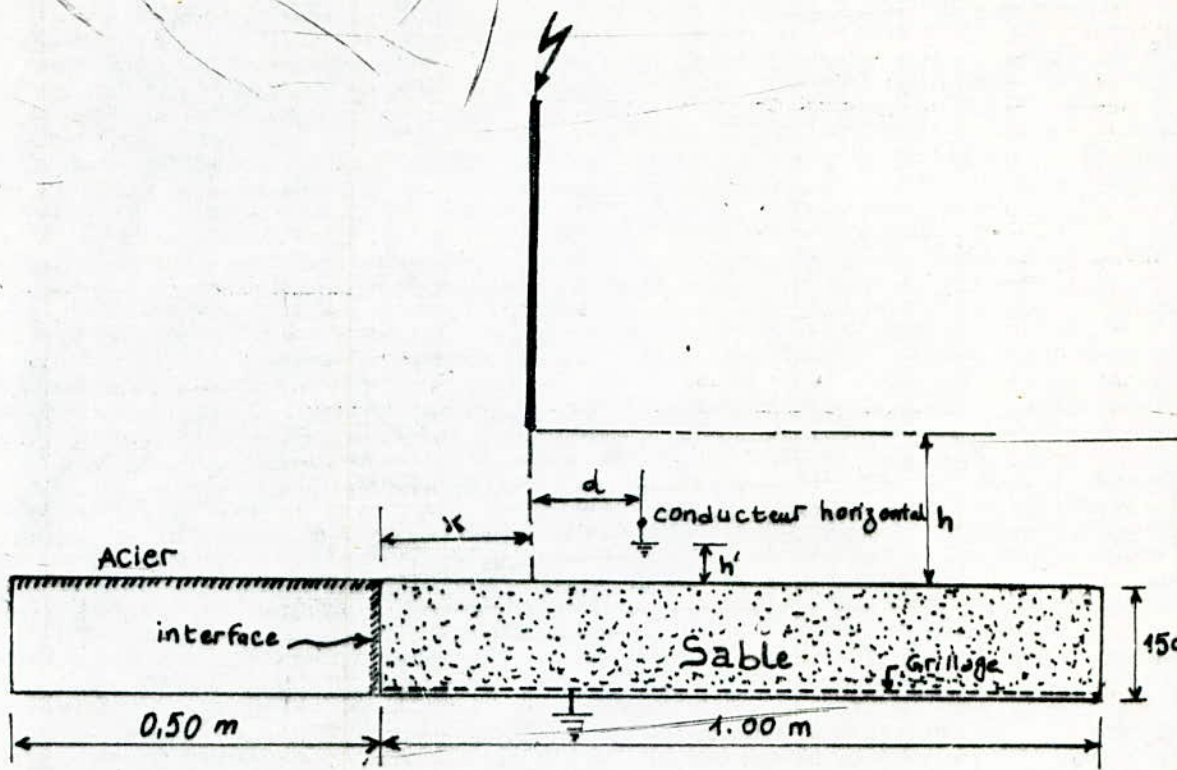
La surface de l'électrode plate (Acier galvanisé + sable sec ) est de ( 1,5 x 1 )  $m^2$ , et son épaisseur est de 0,15 m tandis que la tige a un diamètre de 6 mm avec un extrémité hémisphérique de même diamètre; Le conducteur horizontal utilisé à une position variable déterminée par la hauteur "h" et par la distance "d" figure 10 .

L'ensemble conducteur, interface, et sable est relié à la terre .

La tige a une position variable déterminée par la hauteur "h" et par la distance "x" figure 10 .

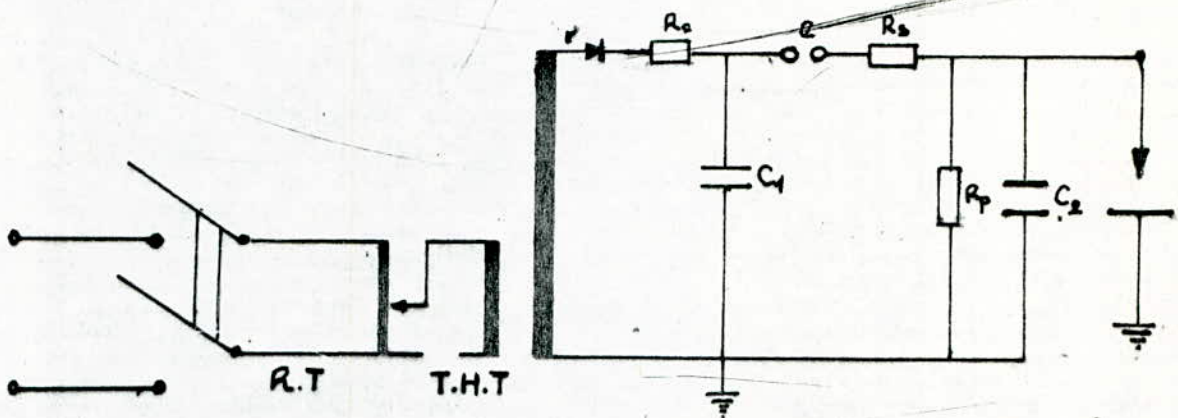
.../...





Modèle Experimental

figure - 10.



Générateur De Choc (un étage) - figure 11 -

R.T: Régulateur de tension.

T.H.T: Transformateur Haute tension

r: Redresseur.

$R_c$ : Résistance de charge ( $7k\Omega$ )

$C_1$ : Condensateur de charge ( $0,18\mu F$ )

e: Eclateur à sphères.

$R_s$ : Résistance Série ( $10\Omega$ )

$R_p$ : Résistance parallèle ( $430\Omega$ )

$C_2$ : Condensateur de choc ( $0,022nF$ )

Elle est reliée au générateur de choc ( Haefely ) à 8 étages . Il est d'une tension nominale égale à 500 kv et d'une énergie de 4 kJ . La capacité de choc est de ~~0,22~~ nF figure 11 (11).

Afin de simuler la décharge de foudre descendante négative, nous avons appliqué des impulsions de polarité négative .

Comme l'épaisseur du sable était de 15 cm , la hauteur de la tige a été limitée par la tension maximale de sortie du générateur de choc du laboratoire et par la résistivité du sable .

Dans nos essais , nous avons utilisé une hauteur maximale de 16,5 cm correspondant à une tension disruptive de  $55 \times 8 \times 0,857 \approx 377$  kv . pour chaque position considérée du système, nous avons appliqué 50 chocs successifs entraînant toujours la décharge disruptive, afin de pouvoir déterminer le nombre de point d'impact de la décharge sur chaque élément du système .

### 3.1.2 - : la conductivité du sable :

Le sol hétérogène que nous avons utilisé présente deux conductivités différentes, celle de l'acier galvanisé et celle du sable.

La conductivité de l'acier galvanisé est égale à  $6,5 \cdot 10^6$  S/m .

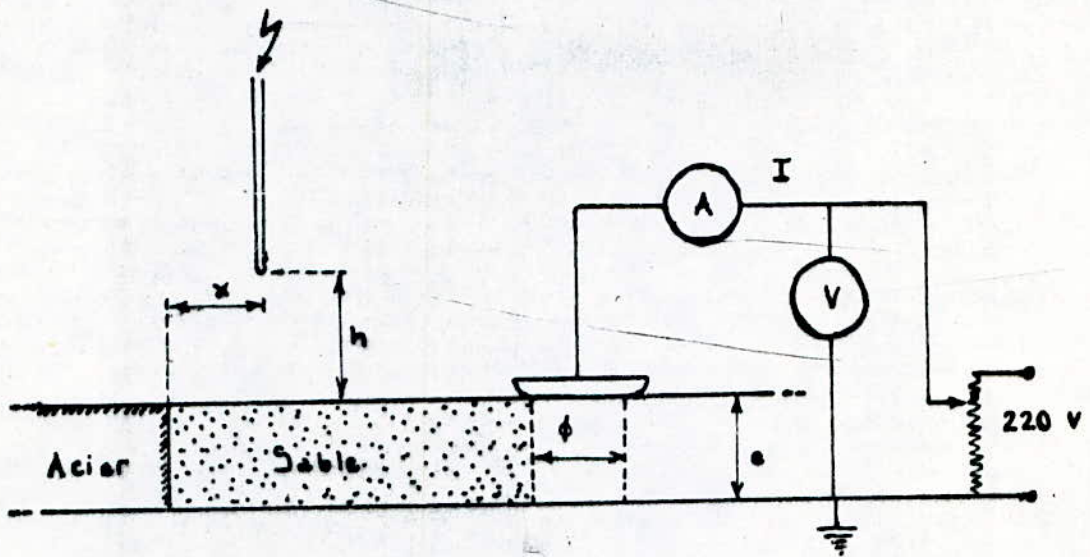
Pour mesurer la conductivité du sable (12), nous avons réalisé le montage de la figure 12 . A partir de la loi d'OHM  $G = I / U$ , donnant la conductance; nous déduisons la conductivité grâce à la

formule :

$$\delta = \frac{G \cdot e}{S} = G \frac{e}{\pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}$$

.../...





Schema Experimental Pour La  
Mesure De La Conductivité Du Sable.

- figure 12 -



$$\gamma = G \frac{e}{S} = G \frac{e}{\pi \left(\frac{\phi}{2}\right)^2}$$

Où :  $e$  : l'épaisseur de la couche du sable

$\phi$  : Diamètre de l'électrode de mesure .

La valeur que nous avons obtenu pour la conductance est de  $4 \mu S$ , ce qui nous donne une conductivité  $\gamma \approx 54.10^{-6} S/m$

### 3.1.3 - 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 .

Afin d'aboutir à des résultats appréciables, ce travail demande l'exécution de plusieurs . essais .

Les principaux paramètres introduits dans notre étude sont: -

$h, h', x, d$  figure 10 .

$h$ : distance entre le plan et la pointe de la tige .

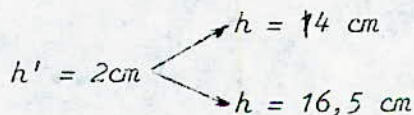
$h'$ : Distance entre la plan et le conducteur horizontal.

$x$  : Distance entre l'interface et l'axe de la tige .

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

Les valeurs choisies lors de nos essais sont:

- Deux valeurs de " $h$ " pour une seule valeur de " $h'$ " :



- Deux valeurs de " $h'$ " pour une seule valeur de " $h$ ":

.../...

$$h = 14 \text{ cm} \begin{cases} \nearrow h' = 2 \text{ cm} \\ \searrow h' = 4 \text{ cm} \end{cases}$$

Pour effectuer les essais, nous commençons par fixer les hauteurs "h" et "h'", et ont fait varier "d" pour chaque valeur de "x".

Pour  $h = 14 \text{ cm}$ ,  $h' = 2 \text{ cm}$  :

x varie de 0 à 18 cm avec un pas de 2 cm.

d varie de 7 à 20 cm.

Pour  $h = 14 \text{ cm}$ ,  $h' = 4 \text{ cm}$  :

x varie de 0 à 18 cm ( de 0 à 16 cm avec un pas de 4 cm ).

d varie de 10,5 cm à 20 cm.

Pour  $h = 16,5 \text{ cm}$ ,  $h' = 2 \text{ cm}$  :

x varie de 0 à 24 cm avec un pas de 4 cm.

d varie de 7 à 25 cm;

Pour chaque valeur de "x" fixée, nous choisissons une valeur de "d" ( au début aléatoire ), et nous la faisons varier de manière à bien distinguer la répartition des décharges sur le conducteur.

On s'intéresse alors aux valeurs limites de probabilité de décharge sur le conducteur qui sont autour de 100% pour les petites valeurs de "d" et de 0% pour les grandes valeurs .

Pour chaque configuration déterminée par  $(x, h, h', d)$ , nous appliquons au système 50 chocs négatifs de  $1,2 / 50 \mu\text{s}$  entraînant la décharge : " - disruptive, et à chaque fois, on mentionne sur un tableau le type de décharge observée.

.../...



- Les conditions atmosphériques ont été relevées au début et à la fin de chaque série de 50 chocs .

La température variait de  $T_{\min} = 11,5^{\circ}\text{C}$  à  $T_{\max} = 19,5^{\circ}\text{C}$ .

La pression variait de  $p_{\min} = 73,2 \text{ cm Hg}$  à  $p_{\max} = 77 \text{ cm Hg}$  .

L'humidité relative variait de  $h_{\min} = 62,2\%$  à  $h_{\max} = 76\%$ .

### 3.2. - RESULTATS D'ESSAIS :

Pour chaque configuration déterminée par  $(x, h, h', d)$ , nous avons pu distinguer les différents types de décharges qui peuvent y avoir lieu .

#### 3.2.1. - Phénomène de décharge :

Lors d'essais effectués sur sol hétérogène (8), les trois types de décharges observées sont:

1 - Décharge directe au sable ou à l'interface, figure 13a .

2 - Décharge directe au sable puis glissante vers l'interface, figure 13ib

3 - Décharge à l'interface et au sable à la fois , figure 13c.

La présence d'un conducteur horizontal, nous a permis d'observer d'autres types de décharges.

#### (a) - Décharges directes :

Les décharges directes peuvent être classées elles - même en trois types:

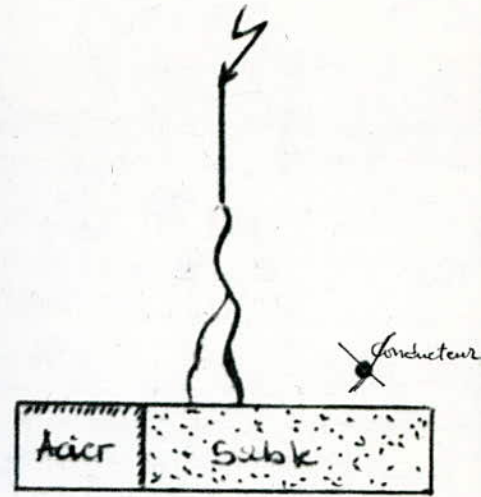
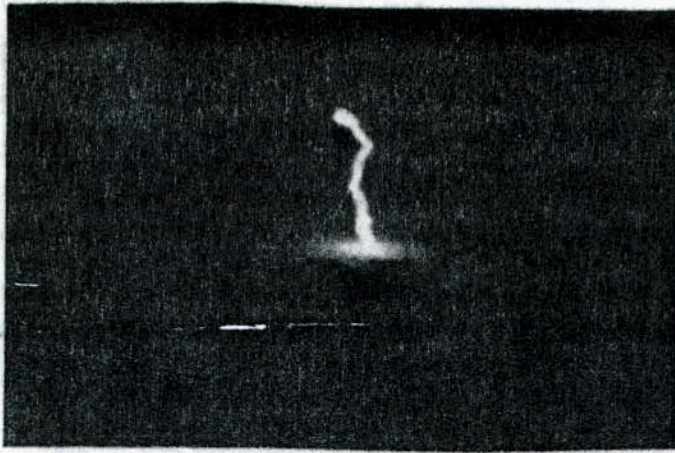
\* - Décharge directe atteignant l'interface, figure 14a .

\* - Décharge directe atteignant de sable, figure 14b.

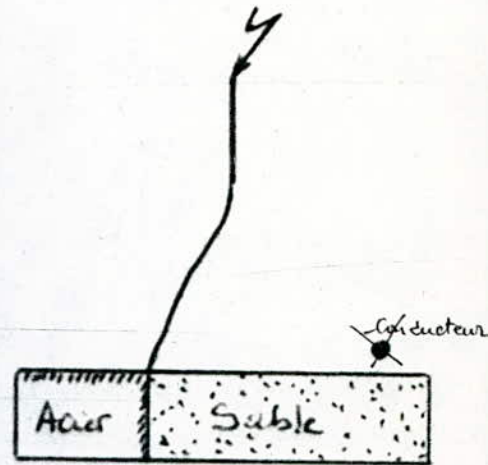
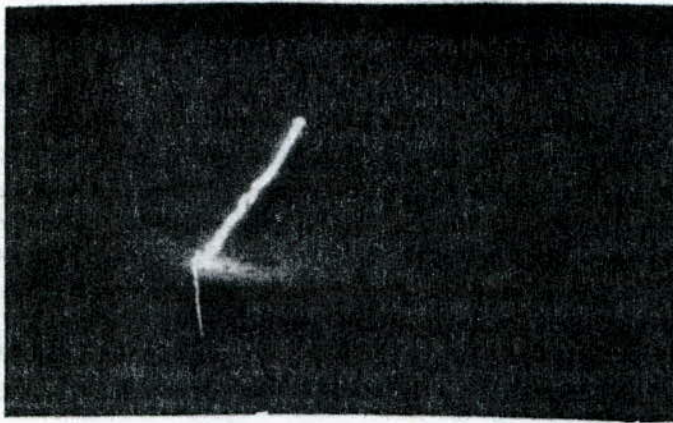
\* - Décharge directe atteignant le conducteur, figure 14c.

.../...

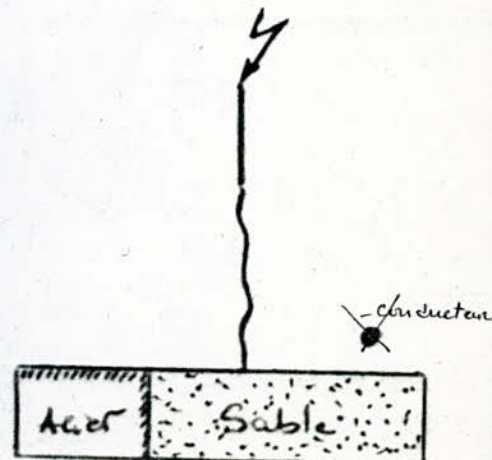




Décharge Sur Le Sable

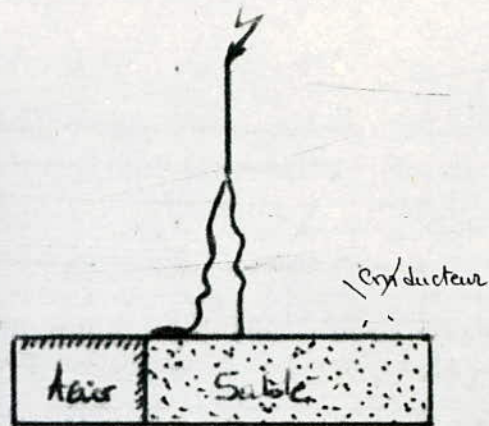
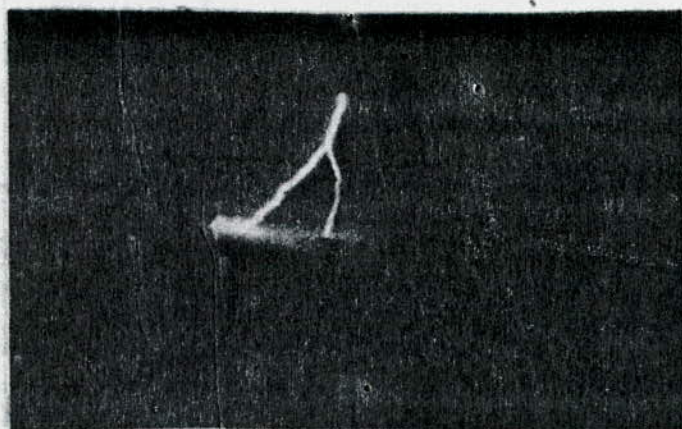


Décharge sur L'Interface

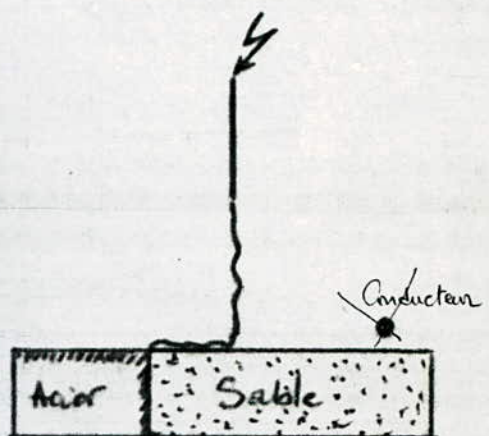
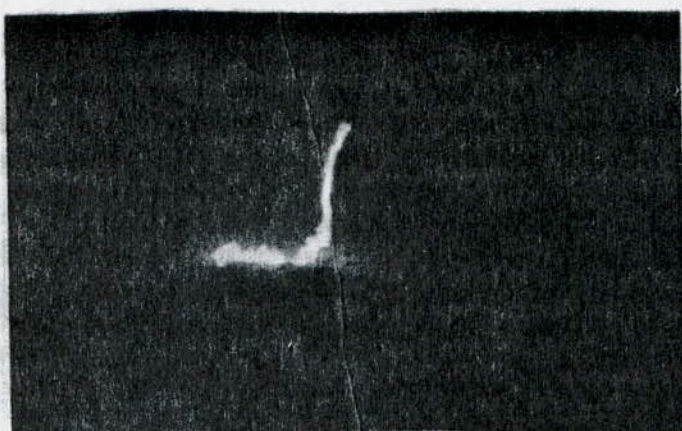


Décharge sur le sable

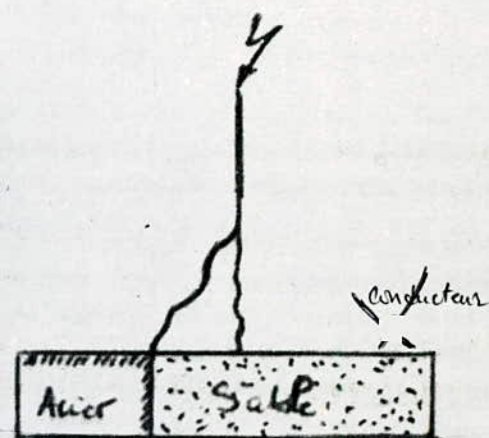
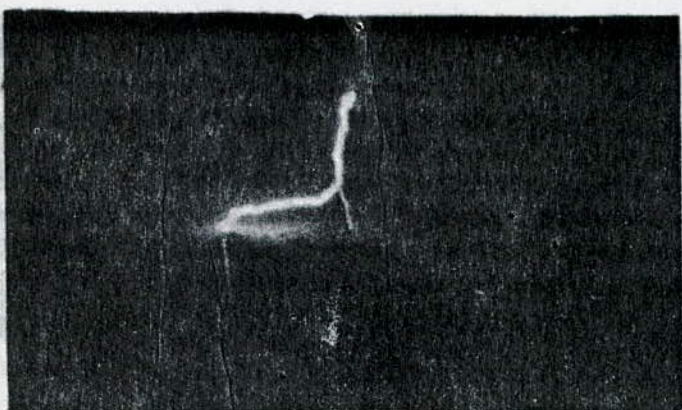




- figure 13 c - Décharge Ramifiée (glissante + Sable)

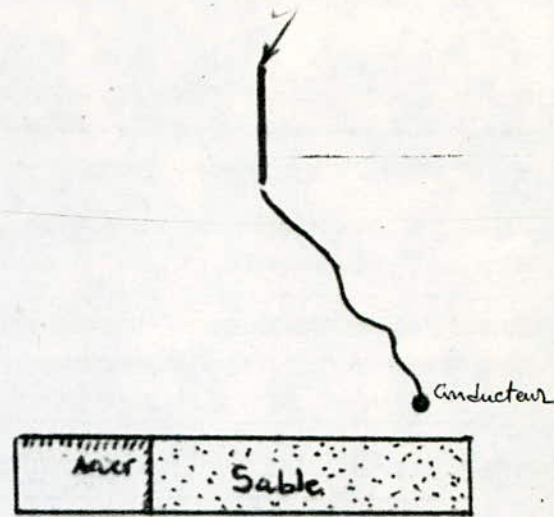


- figure 13 b - Décharge Glissante Vers l'interface

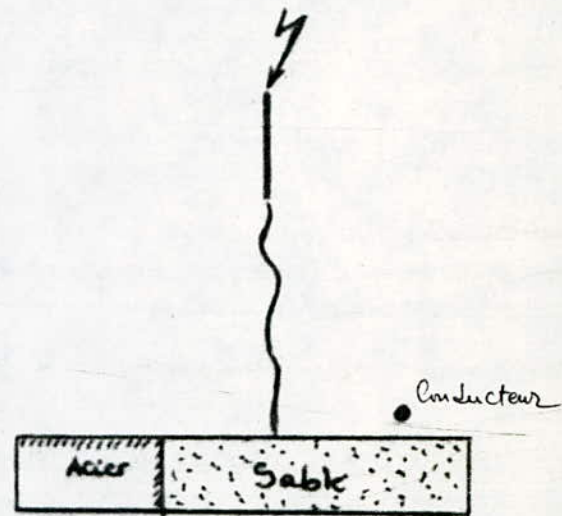
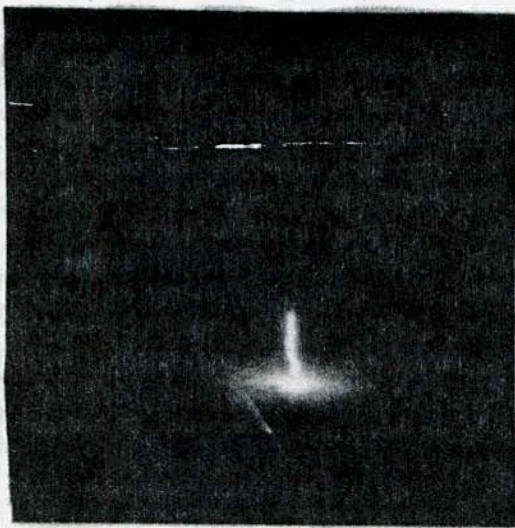


- figure 13 c - Décharge Ramifiée, (Sable Interface).

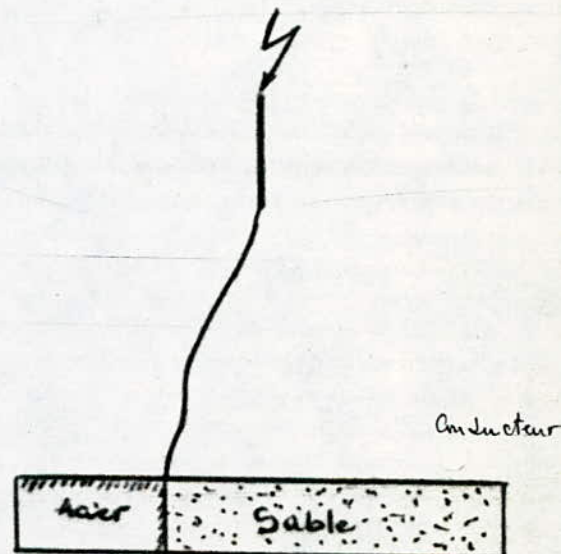




- figure 14c - Décharge Sur Le Conducteur



- figure 14b - Décharge Sur Le Sable

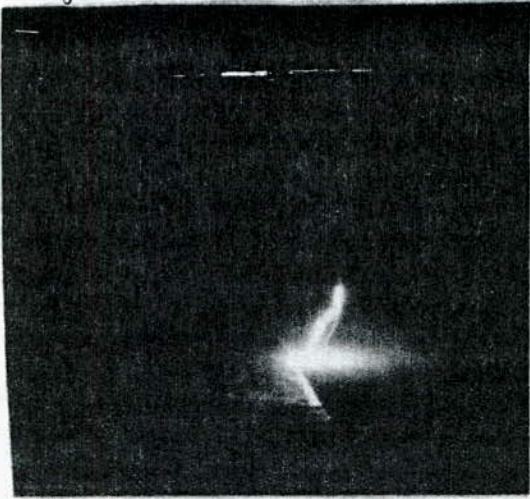
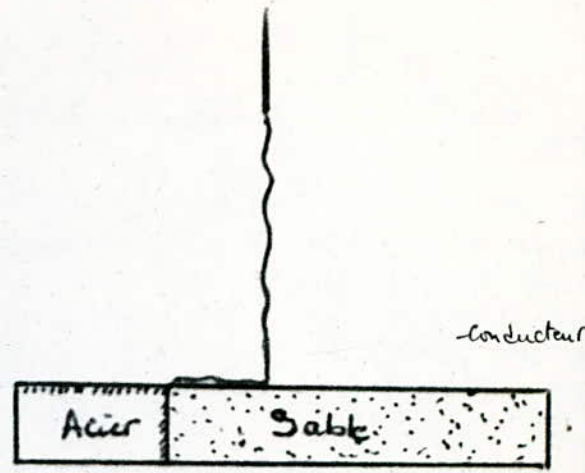


- figure 14a - Décharge Sur L'Interface.

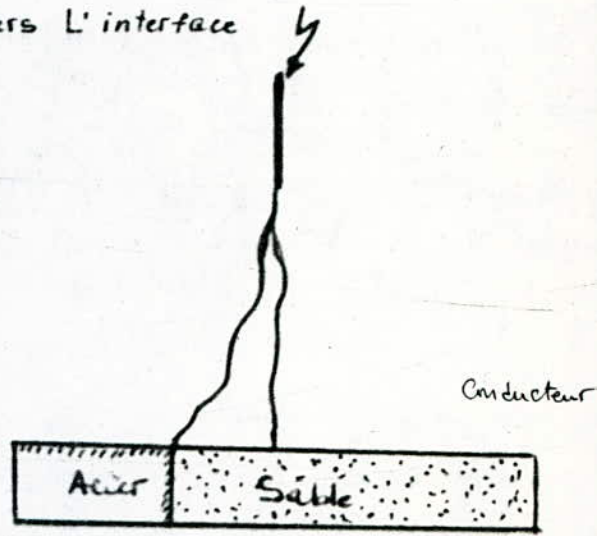




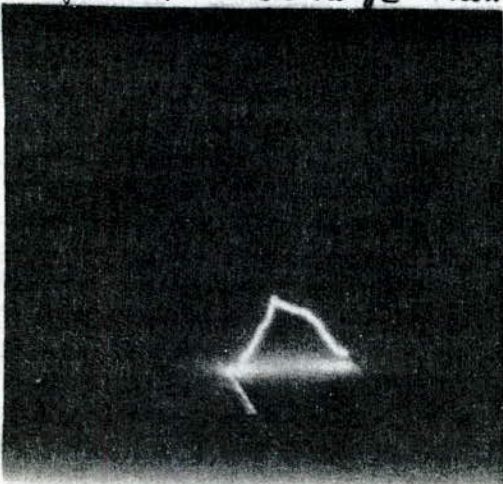
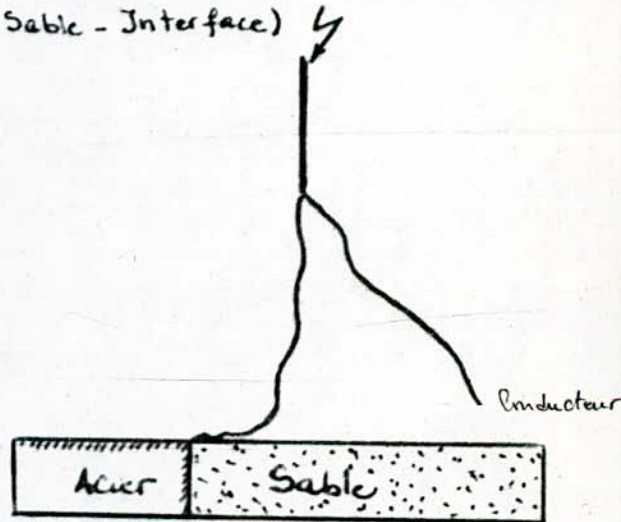
- figure 14d - Decharge Glissante Vers L'interface



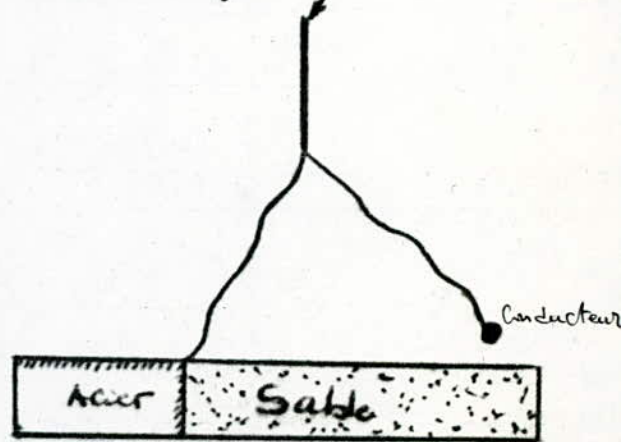
- figure 14e - Decharge Ramifiée (Sable - Interface)



- figure 14f - Decharge Ramifiée (conducteur - glissante)



- figure 14g - Decharge Ramifiée (Interface - Conducteur)



(b) - Décharges complexes :

La particularité de ces décharges est qu'elles s'effectuent en deux étapes successives. La première étape est une décharge directe sur la sable, la deuxième étape est un glissement de celle-ci vers l'interface, voir figure 14d .

(c) - Décharges ramifiées:

Les décharges ramifiées sont caractérisées par plusieurs points d'impact à la fois. Elles peuvent être classées en deux catégories :

\* - Décharge ramifiée en trois branches atteignant à la fois le conducteur , le sable et l'interface.

\* - Décharge ramifié en deux branches: figure 14 (e, f, g ), sable-conducteur, sable-interface , interface-conducteur.

3.2.2. - Probabilité de décharge :

Pour étudier la probabilité de décharge pour une configuration donnée, notons par :  $n_i$ ,  $n_s$ ,  $n_{gl}$  et  $n_c$  les nombres respectifs de décharge sur l'interface , sur le sable, glissante, ou sur le conducteur . Les fréquences de déchargesont alors respectivement :

$$f_i = \frac{n_i}{n_{it}} ; f_s = \frac{n_s}{n_{it}} ; f_{gl} = \frac{n_{gl}}{n_{it}} ; \text{et } f_c = \frac{n_c}{n_{it}}$$

.../...



$n_{it}$  étant le nombre total d'impacts .

$$n_{it} = n_i + n_s + n_{gl} + n_c$$

$$f_i + f_s + f_{gl} + f_c = 1$$

Pour les décharges ramifiées, on ne considère que les points d'impacts de chaque ramification et on les compte parmi les décharges directes. Les résultats obtenus sont montrés sur les tableaux 2, 3, et 4. Les courbes obtenues ont été tracées sur une échelle gaussio - arithmétique.

### 3.2.2.1. - Probabilité de décharge sur l'interface :

Pour trois valeurs du rapport  $\frac{d}{h}$  fixes, nous avons tracé les courbes donnant la variation de la fréquence de décharge à l'interface ( $f_i$ ) en fonction du rapport  $\frac{x}{h}$  figure 15 . La disposition des points nous montre . à priori que la distribution des impacts à l'interface en fonction de  $\frac{x}{h}$  suit une loi normale .

Les droites de regression ont été tracées à l'aide de la méthode des moindres carrés (les coefficients de corrélation étant compris entre  $\pm 1$  et 0 ). Ces droites montrent que pour une configuration tige - interface donnée (  $\frac{x}{h}$  fixe ), en éloignant le conducteur (  $\frac{d}{h}$  augmente ), la fréquence de décharge à l'interface augmente ; c'est-à-dire que le conducteur attire de moins en moins les décharges, ce qui permet à l'interface d'attirer de plus en plus les décharges .

.../...



		x	0	4	8	12	16	20	24
d	d/h	x/h	0	0,24	0,48	0,72	0,96	1,21	1,45
7	0,42	f <sub>i</sub>	5.88						
		f <sub>s</sub>	0						
		f <sub>g1</sub>	0						
		f <sub>c</sub>	94.11						
8	0,48	f <sub>i</sub>		6	0	0			
		f <sub>s</sub>		0	0	0			
		f <sub>g1</sub>		0	0	0			
		f <sub>c</sub>		94	100	100			
12	0,72	f <sub>i</sub>	54.9	23.53	13.46	1.92			
		f <sub>s</sub>	0	1.96	1.92	1.92			
		f <sub>g1</sub>	0	0	1.92	1.92			
		f <sub>c</sub>	45.09	74.5	82.7	94.23			
14	0,84	f <sub>i</sub>	88						
		f <sub>s</sub>	0						
		f <sub>g1</sub>	0						
		f <sub>c</sub>	12						
16	0,96	f <sub>i</sub>	100	92	64.54		3.77		
		f <sub>s</sub>	0	2	15.38		45.28		
		f <sub>g1</sub>	0	0	1.92		3.77		
		f <sub>c</sub>	0	6	21.15		47.16		
18	1,09	f <sub>i</sub>				25.8		5.55	0
		f <sub>s</sub>				56.45		74.05	86.27
		f <sub>g1</sub>				9.67		5.55	1.96
		f <sub>c</sub>				8.06		14.81	11.76
19	1,15	f <sub>i</sub>					44.28		
		f <sub>s</sub>					73.21		
		f <sub>g1</sub>					5.35		
		f <sub>c</sub>					7.14		
20	1,21	f <sub>i</sub>				30			
		f <sub>s</sub>				52.85			
		f <sub>g1</sub>				14.28			
		f <sub>c</sub>				2.85			
22	1,33	f <sub>i</sub>					6.89	0	
		f <sub>s</sub>					84.48	94.23	
		f <sub>g1</sub>					6.89	3.84	
		f <sub>c</sub>					1.72	1.92	
25	1,51	f <sub>i</sub>			62.29	19.35		7.54	0
		f <sub>s</sub>			36.06	70.96		86.8	98
		f <sub>g1</sub>			16.39	9.67		3.77	0
		f <sub>c</sub>			1.63	0		1.88	2

Tableau - 2 -  $h = 16.5 \text{ cm}$  ,  $h' = 2 \text{ cm}$ .

x . en . cm , h . en . cm , f<sub>i</sub> , f<sub>s</sub> , f<sub>g1</sub> , f<sub>c</sub> . en %



		x	0	4	8	12	16	18
d	d/h	x/h	0	0,28	0,57	0,85	1,14	1,28
10,5	0,75	f <sub>i</sub>	8					
		f <sub>s</sub>	0					
		f <sub>sl</sub>	0					
		f <sub>c</sub>	92					
12	0,85	f <sub>i</sub>		12				
		f <sub>s</sub>		0				
		f <sub>sl</sub>		0				
		f <sub>c</sub>		88				
14	1	f <sub>i</sub>	44		8	2		
		f <sub>s</sub>	0		0	0		
		f <sub>sl</sub>	0		0	0		
		f <sub>c</sub>	56		92	98		
16	1,14	f <sub>i</sub>	94	75,47	31,6	18,64	3,84	3,84
		f <sub>s</sub>	0	1,88	15,79	20,34	30,77	26,92
		f <sub>sl</sub>	0	1,88	5,26	8,47	1,92	1,92
		f <sub>c</sub>	6	20,75	47,36	52,54	63,46	67,3
18	1,28	f <sub>i</sub>	100	94	57,14	21,66	13,33	5,35
		f <sub>s</sub>	0	0	12,7	65	70	80,35
		f <sub>sl</sub>	0	0	23,8	11,66	10	7,14
		f <sub>c</sub>	0	6	6,35	1,66	6,66	7,14
20	1,42	f <sub>i</sub>			53,22	20,29		1,85
		f <sub>s</sub>			37,1	62,31		92,59
		f <sub>sl</sub>			9,67	17,39		5,56
		f <sub>c</sub>			0	0		0

Tableau - 3 -  $h = 14 \text{ cm}$ ,  $h' = 4 \text{ cm}$ .

x en cm, h en cm, d en cm, f<sub>x</sub> en %



	x	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	
d	d/h	x/h	0	0,14	0,28	0,42	0,57	0,71	0,85	1	1,14	1,28
7	0,5	f <sub>i</sub>	6		0							
		f <sub>s</sub>	0		0							
		f <sub>g</sub>	0		0							
		f <sub>c</sub>	94		100							
8	0,56	f <sub>i</sub>			2	4						
		f <sub>s</sub>			0	0						
		f <sub>g</sub>			0	0						
		f <sub>c</sub>			98	96						
8,5	0,6	f <sub>i</sub>		18								
		f <sub>s</sub>		0								
		f <sub>g</sub>		0								
		f <sub>c</sub>		72								
10	0,71	f <sub>i</sub>			54	8						
		f <sub>s</sub>			4	0						
		f <sub>g</sub>			0	0						
		f <sub>c</sub>			42	92						
10,5	0,75	f <sub>i</sub>	60,78									
		f <sub>s</sub>	0									
		f <sub>g</sub>	0									
		f <sub>c</sub>	39,21									
11	0,78	f <sub>i</sub>					5,88		0			
		f <sub>s</sub>					3,92		0			
		f <sub>g</sub>					0		0			
		f <sub>c</sub>					90,19		100			
12	0,85	f <sub>i</sub>		80								
		f <sub>s</sub>		0								
		f <sub>g</sub>		0								
		f <sub>c</sub>		20								
13	0,92	f <sub>i</sub>					49,05					
		f <sub>s</sub>					45,09					
		f <sub>g</sub>					1,88					
		f <sub>c</sub>					33,96					
14	1	f <sub>i</sub>	96,15		96			11,11	9,61	4		
		f <sub>s</sub>	1,92		0			38,88	17,3	4		
		f <sub>g</sub>	1,92		0				3,7	1,92	0	
		f <sub>c</sub>	1,92		4			46,29	71,15	92		
15	1,07	f <sub>i</sub>				71,7		21,91				
		f <sub>s</sub>				16,98		49,31				
		f <sub>g</sub>				266		13,69				
		f <sub>c</sub>				5,66		15,06				
16	1,14	f <sub>i</sub>		98			53,84		18,96		1,92	0
		f <sub>s</sub>		0			23,07		51,72		73,07	74
		f <sub>g</sub>		0			17,94		6,89		1,92	0
		f <sub>c</sub>		2			5,12		22,41		23,07	26
17	1,21	f <sub>i</sub>			96							
		f <sub>s</sub>			4							
		f <sub>g</sub>			0							
		f <sub>c</sub>			0							
18	1,28	f <sub>i</sub>				92	62,66	50	25,39	17,46	7,14	
		f <sub>s</sub>				6	21,53	44,64	64,9	71,42	82,14	
		f <sub>g</sub>				0	16	5,35	12,69	9,52	8,92	
		f <sub>c</sub>				2	0	0	0	1,58	1,78	
19	1,35	f <sub>i</sub>										
		f <sub>s</sub>										
		f <sub>g</sub>										
		f <sub>c</sub>										
20	1,42	f <sub>i</sub>							27,94		3,84	2
		f <sub>s</sub>							58,82		94,23	96
		f <sub>g</sub>							13,23		1,92	0
		f <sub>c</sub>							0		0	2

Tableau 1.  $h = 14 \text{ cm}$ ,  $h' = 2 \text{ cm}$  ( $x, h, d$  en cm ;  $f_x$  en %) )



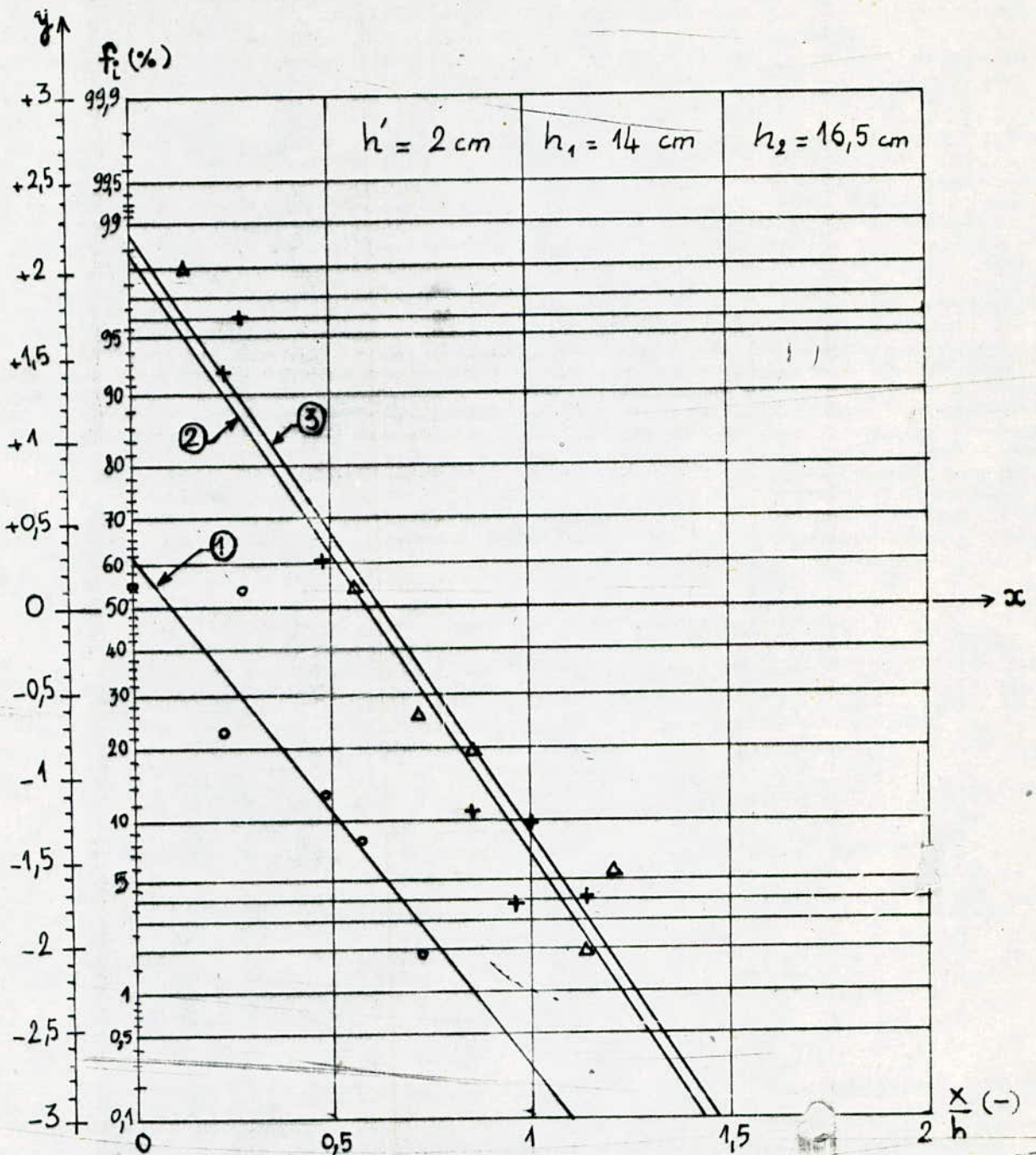


figure - 15 - Variation de " $f_i$ " en fonction de  $\frac{x}{h}$

○ Droite ① pour  $(d/h)_1 = 0,72$ ,  $(d/h)_2 = 0,71 \rightarrow (d/h)_{\text{moy}} = 0,715$

+ Droite ② pour  $(d/h)_1 = 1$ ,  $(d/h)_2 = 0,96 \rightarrow (d/h)_{\text{moy}} = 0,98$

$\Delta$  Droite ③ pour  $(d/h)_1 = 1,14$ ;  $(d/h)_2 = 1,09 \rightarrow (d/h)_{\text{moy}} = 1,115$

coefficients de corrélation:  $r_1 = -0,91$ ,  $r_2 = -0,97$ ,  $r_3 = -0,98$

Pour  $\frac{d}{h}$  fixe, la fréquence de décharge à l'interface diminue lorsque  $\frac{x}{h}$  augmente.

### 3.2.2.2. - Probabilité de décharge sur le sable :

D'après les résultats obtenus (voir tableaux 2, 3, et 4), les décharges sur le sable n'apparaissent que si la distance ( $D = x + d$ ) entre le conducteur et l'interface atteint une certaine valeur limite ( $D_{\min}$ ). Cette valeur dépend de la distance  $t$  tige-plat et de la hauteur du conducteur.

Si la distance " $D$ " est fixée à une valeur supérieure à  $D_{\min}$  ( $D > D_{\min}$ ), en déplaçant la tige horizontalement à partir de l'interface jusqu'au conducteur ( $x = 0 + D$ ) ou vice-versa, on remarque que la fréquence de décharge au sable augmente à partir de 0, atteint un certain maximum, puis diminue jusqu'à la valeur 0. On remarque d'autre part que, si la distance " $D$ " augmente la fréquence de décharge au sable augmente.

Il existe donc; une distance ( $D = D_{\min}$ ) pour laquelle la fréquence de décharge au sable est nulle (0%), quelque soit la position de la tige ( $x$ ).

Pour étudier la variation de  $D_{\min}$  en fonction de  $h$  et  $h'$ , nous avons regroupé dans le tableau - 5 - , les positions  $x$ ,  $h$ ,  $h'$ ,  $d$  pour lesquelles la décharge commence à atteindre le sable. Nous remarquons, d'après le tableau, que  $D_{\min}$  augmente avec les hauteurs  $h$  et  $h'$ .

.../...



$R_c$ (cm)	$h' = 2$ cm			$h' = 4$ cm		
	X (cm)	d (cm)	$D_{min}$ (cm)	X (cm)	d (cm)	$D_{min}$ (cm)
14	4	10	14	4	16	20
16,5	4	12	16			

Tableau - 5.

	$h' = 2$ cm				$h' = 4$ cm			
	$P_c = 0\%$		$P_c = 100\%$		$P_c = 0\%$		$P_c = 100\%$	
	X (cm)	$d_{max}$ (cm)	X (cm)	$d_{min}$ (cm)	X (cm)	$d_{max}$ (cm)	X (cm)	$d_{min}$ (cm)
$R_c = 14$ cm	0	14	0	7	0	18	0	9
	4	16	4	8	4	19	4	10
	8	17	8	10	8	20	8	12
	12	18	12	11	12	20	12	14
	16	19	16	13	16	20	16	15
$R_c = 16,5$ cm	0	16	0	7	$h' = 2$ cm		$h' = 4$ cm	
	4	18	4	8	$d_{max}$ moy	$d_{min}$ moy	$d_{max}$ moy	$d_{min}$ moy
	8	25	8	11	$R_c = 14$ cm	16,8	9,8	19,4
	12	25	12	12				
	16	23	16	13	$R_c = 16,5$ cm	21,4	10,2	

Tableau - 6.



Il existe aussi, une position ( $D = D_{\max}$ ) pour laquelle la fréquence de décharge au sable est de 100 % pour une certaine position de la tige ( $x$ ).

### 3.2.2.3. Probabilité de décharge glissante :

La remarque la plus importante qui concerne les décharges glissantes est qu'elles sont liées aux décharges sur le sable. En effet, elles ne peuvent exister qu'avec l'apparition de celles-ci.

Pour une distance " $D$ " fixe, la probabilité de leur apparition augmente avec la probabilité de décharge sur le sable, puis diminue lorsque " $x$ " augmente.

### 3.2.3. - Foudroiement du paratonnerre horizontal:

( fréquence de décharge sur le conducteur ).

Pour les mêmes valeurs de " $\frac{d}{h}$ " prises dans le cas des décharges à l'interface, nous avons tracé les courbes donnant la variation de la fréquence de décharge au conducteur, figure 16 ;

La disposition des points, nous montre à priori que la distribution des impacts au conducteur en fonction de " $\frac{x}{h}$ " suit une loi normale.

Les droites de regression ont été tracées à l'aide de la méthode des moindres carrés ( les coefficients des corrélations étant compris entre 0 et +1 ).

.../...

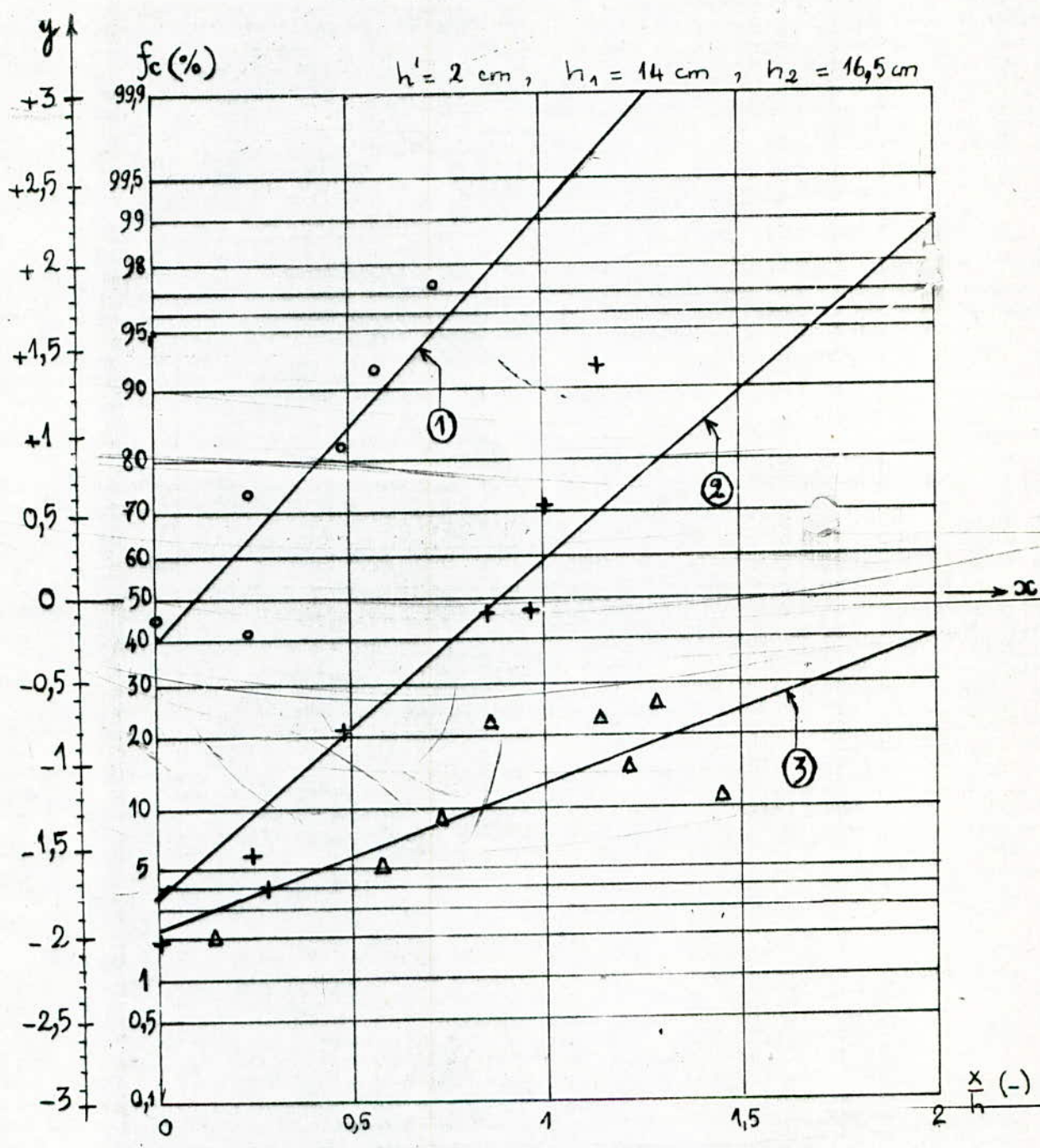


Figure - 16 - Variation de "f<sub>c</sub>" en fonction de  $\frac{x}{h}$

- o Droite ① pour  $(d/h)_1 = 0,72$  ,  $(d/h)_2 = 0,71 \rightarrow (d/h)_{\text{moy}} = 0,715$
  - + Droite ② pour  $(d/h)_1 = 1$  ,  $(d/h)_2 = 0,96 \rightarrow (d/h)_{\text{moy}} = 0,98$
  - Δ Droite ③ pour  $(d/h)_1 = 1,14$  ,  $(d/h)_2 = 1,09 \rightarrow (d/h)_{\text{moy}} = 1,115$
- coefficients de Corrélation:  $r_1 = 0,89$  ,  $r_2 = 0,70$  ,  $r_3 = 0,78$



Ces droites montrent que pour une configuration tige - interface donnée ( $\frac{x}{h}$  fixe), en éloignant le conducteur ( $\frac{d}{h}$  augmente), la fréquence de décharge au conducteur diminue.

Pour  $\frac{d}{h}$  fixe, la fréquence de décharge au conducteur augmente lorsque  $\frac{x}{h}$  augmente.

Nous avons aussi examiné l'influence de la hauteur du conducteur sur la fréquence de son foudroisement. La hauteur du conducteur était égale à 2 cm puis 4 cm.

Pour un rapport  $\frac{d}{h}$  donné, la fréquence de décharges au conducteur augmente avec sa hauteur, figure 17. Ainsi nous constatons d'après cette figure, que pour n'importe quelle hauteur du conducteur, la fréquence " $f_c$ " augmente avec le rapport " $\frac{x}{h}$ ". Nous avons essayé de déterminer pour chaque configuration ( $h, h',$  et  $x$ ), les distances  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  pour lesquels la probabilité de foudroisement du conducteur est respectivement 100 et 0%. Pour cela, nous avons regroupé les résultats sur le tableau -6-, et nous avons constaté que les valeurs moyennes de  $d_{\min}$  et  $d_{\max}$  augmentent avec les hauteurs  $h$  et  $h'$ .

.../...

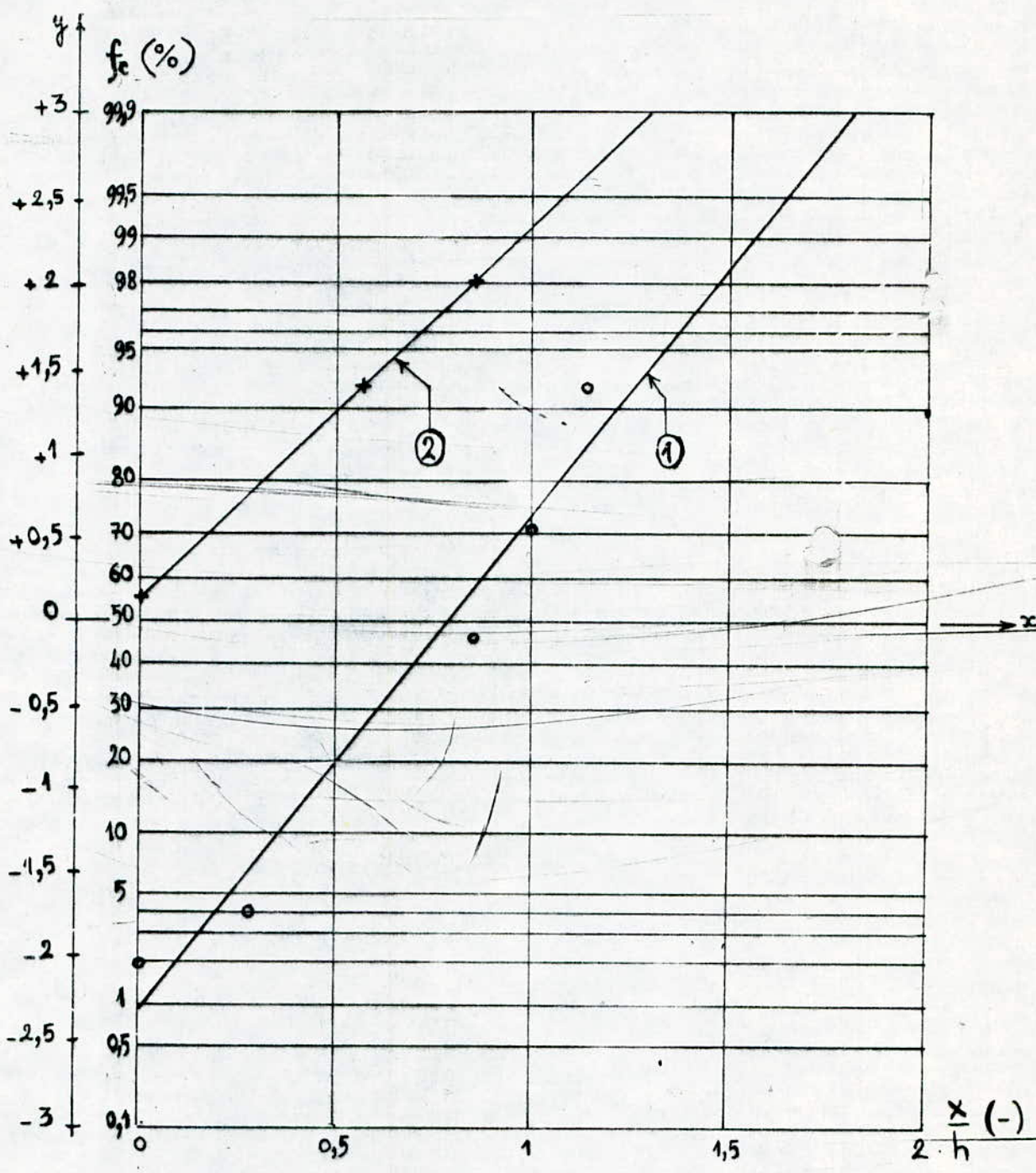


figure-17- Variation de "f<sub>c</sub>" en fonction de  $\frac{x}{h}$ .  
 o Droite ① pour  $h = 14 \text{ cm}$ ,  $\frac{d}{h} = 1$ ,  $h' = 2 \text{ cm}$   
 + Droite ② pour  $h = 14 \text{ cm}$ ,  $\frac{d}{h} = 1$ ,  $h' = 4 \text{ cm}$   
 coefficients de corrélation:  $r_1 = 0,98$ ,  $r_2 = 1$



-ooOoo- CONCLUSIONS -ooOoo-

## CONCLUSIONS /

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le phénomène de décharges<sup>et</sup> en particulier dans les intervalles d'air tige - plan .

A l'aide des modèles expérimentaux nous avons effectué une étude statistique concernant la fréquence de décharge de foudre négative aux différents éléments du sol hétérogène et au conducteur horizontal.

A partir de ces essais nous avons reçu "des répartitions de décharges de foudre négatives à l'interface et au conducteur qui suivent des lois normales en fonction du rapport  $\frac{x}{h}$  . La droite de regression, pour la répartition des décharges à l'interface a un coefficient de corrélation négatif ( une pente négative) . Pour la répartition des décharges sur le conducteur, la droite de regression a un coefficient de corrélation positif (une pente positive).

Ceci nous permet de déduire que la présence de l'interface modifie la répartition des décharge sur le conducteur et par conséquent elle modifie sa zone d'attraction .

Par ailleurs, nous avons remarqué que la distance tige- plan et la hauteur du conducteur ont une influence directe sur le foudroiement du conducteur.

.../...



Ces essais nous ont permis d'observer les différents types de décharges qui peuvent avoir lieu dans le cas d'intervalles d'air tige - plan hétérogène avec paratonnerre horizontal.

Enfin, nous espérons que cette approche de l'étude de l'utilisation d'un paratonnerre horizontal sur un sol hétérogène soit développée à l'avenir .

-ooOoo- B I B L I O G R A P H I E -ooOoo-

- ( 1 ) - A. BOUGAKEUR : Cours de technique de la haute tension,  
(F 224) E N P A .
- ( 2 ) - M. AGUET et M. INOUCI : Traité d'électricité -haute tension-  
Volume XX11 E.P.E Lausanne .  
Edition Géorgi .1982 .
- ( 3 ) - RICHARD P. FEYMAN : Les cours de physiques de FEYMANN .  
(Electromagnétisme1) TOMME 2 ).  
Edition ADDITON WESLEY Publishing Compagny.  
LONDON 1982 .
- ( 4 ) -G. Le ROY , C. GARY , B. HUTTLER , J. LABOT , Ch. Dubanton:  
Les propriétés diélectrique de l'air et les  
trés haute tension . Edition EYROLLES1984 .
- ( 5 ) - R. B. ANDERSON et A. J. ERIKSON : Lighting parameters for engenering :  
application. CIGRE STUDY COMMITTEE 33 .  
Colloquium and study Comitticomeeting  
Suceava , ROMANIA25 . 29 June 1979.
- ( 6 ) - " Groupes des Renardières " : L'amorçage en polarité positives  
des grands intervalles d'air aux Renardières.  
ELECTRA N° 53 Juillet 1977 .
- ( 7 ) - " GROUPE Des Renardières " : Recherches aux renardières sur  
l'amorçage des grands intervalles d'air.  
ELECTRA . N° 23 Juillet 1972 .

.../...



- ( 8 ) - J. FERRAS : Influence des propriétés électrogéologiques  
du sol sur le point d'impact de la décharge  
de foudre . Thèse de Magistère  
E.N.P. ALGER DEC. 87.
- ( 9 ) - Association Electrotechnique Hongroise: Conférence internationale  
pour la protection contre la foudre .  
BERSCHTE PAPERS RAPPORTS. BUDAPEST 1981.
- ( 10 ) - A. HADDAD et N. TERKI : Protection contre la foudre du laborat-  
toire à haute tension de l'E.N.P  
Projet de fin d'Etudes . Janvier 1985 .
- ( 11 ) - M. DOBARDZIC : Station d'Essais au choc à haute tension .  
MEMOIRE. ALGER Juin 1972 .
- ( 12 ) - A. BENAISSA : Cours de Prospection électrique Méthode de  
Résistivité ; Q. P. U Février 1986 .
- ( 13 ) - E. KUFFEL , W. S. ZAENGL / High Voltage engineering .  
( FUNDAMENTALS ) EDJT. PERGAMA PRESS .  
OXFORD 1984 .

