

2/89
L ex

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

DETERMINATION EXPERIMENTALE
DES ZONES D'ATTRACTION D'UN
PARATONNERRE DANS LE CAS
D'UNE TERRE HETEROGENE

Proposé par :

A .BOUBAKEUR .

Etudié par :

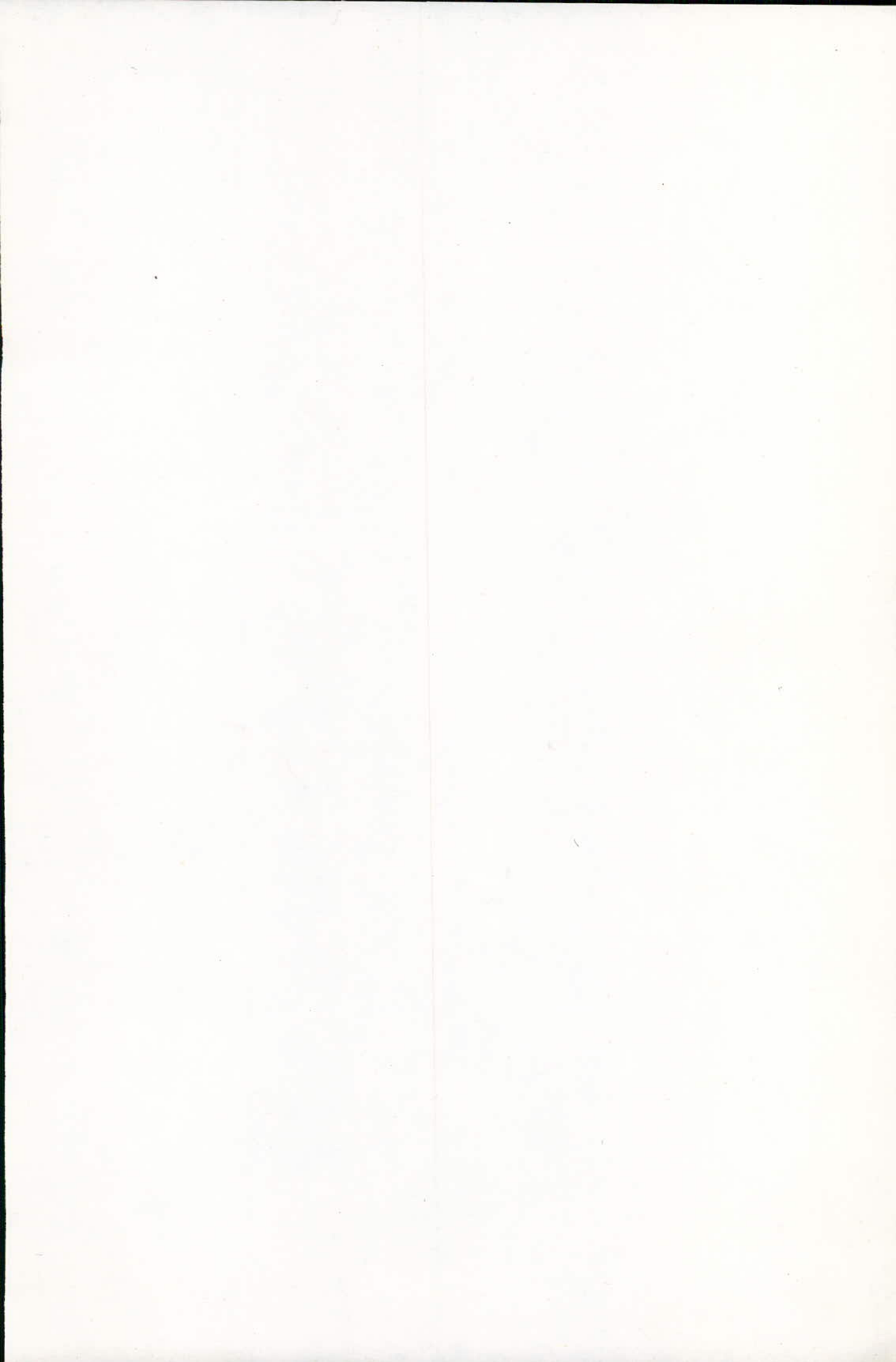
CHEMLAL . Sadja .

ATEK . Abdelaziz .

Dirigé par :

A .BOUBAKEUR .

PROMOTION : Juin: 1989



DEDICACES

A mes parents

ATEK Abdelaziz

A mes parents, à toute ma famille

et à tous mes ami(e)s.

CHEMLAL SADJIA

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

Nous remercions Monsieur A. BOUBEKEUR pour son encadrement et ses conseils.

Nous remercions aussi Melle CHEMLAL Salèha pour son aide précieuse, ainsi que tous ceux qui nous ont aidé.

INTRODUCTION

CHAPITRE I.

MECANISME DE Foudre

I. 1. ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE

I. 1.1 Etude du système terre-atmosphère

I. 1.2 Formation des nuages orageux

I. 2. CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre

I. 3. MECANISME DE DECHARGE D'UN COUP DE Foudre

I. 3.1 Coup de foudre descendant

I. 3.2 Coup de foudre ascendant

I. 4. LOCALISATION DES COUPS DE Foudre

I. 5.1 distribution des amplitudes de courant

I. 5.2 Forme d'onde des courants de foudre

I. 5.3 Raideur des fronts d'onde

I. 6. EFFETS D'UN COUP DE Foudre

CHAPITRE 2.

PROTECTION CONTRE LA Foudre EN SOL HOMOGENE

II. 1 SURTENSIONS DE Foudre DANS UN RESEAU

II. 1.1 Coup de foudre direct sur un conducteur de phase

II. 1.2 Coup de foudre sur le cable de garde ou sur le pylone

II. 1.3 Surtensions dans un poste

II. 1.4 Coup de foudre à proximité d'une ligne

II. 2. SEVERITE ORAGEUSE

II. 3 DISPOSITIFS DE MESURE DE FOUDDROIEMENT

II. 4. MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA FOUDDRE

II 4.1 Protection par parafoudre

II. 4.2 Protection par paratonnerre

II. 5 MODELE ELECTRO-GEOMETRIQUE

II. 6 PROTECTION D'UNE LIGNE

II. 7 METHODE GRAPHIQUE DE LA DETERMINATION DES ZONES DE PROTECTION

II. 7.1 Principe

II. 7.2 Applications

CHAPITRE 3

DECHARGE EN SOL HETEROGENE

III. 1. INTRODUCTION

III. 2. INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTRO-GEOLOGIQUES DU SOL SUR LA DECHARGE DE FOUDDRE

III. 3. MODELE MATHEMATIQUE

III. 4. MODELE EXPERIMENTAL

III. 5. CONCLUSION

CHAPITRE 4

ZONES D'ATTRACTION D'UN CONDUCTEUR HORIZONTAL SUR SOL HETEROGENE

IV. 1 INTRODUCTION

IV. 2 ESSAIS EFFECTUES

IV. 3 PROTECTION SUR SOL HOMOGENE DE CONDUCTIVITE

IV. 4 PROTECTION EN SOL PRESENTANT UNE DISCONTINUITÉ
GEOLOGIQUE

C O N C L U S I O N

INTRODUCTION

La foudre est un phénomène d'électricité naturelle, qui peut causer des dégâts matériels et humains considérables.

Le paratonnerre est un des moyens de protection contre ces effets destructeurs.

L'existence de régions à haute fréquence de foudroiement a emmené à envisager l'hypothèse de l'existence d'une corrélation entre la nature du sol et la localisation des coups de foudres.

Les études faites par J. FERRAS à l'E.N.P.A ont mis en évidence l'effet de l'hétérogénéité du sol sur l'impact des coups de foudre.

Les résultats de ce travail nous ont incité à étudier l'influence de la nature électrogéologique du sol sur les zones d'attraction d'un conducteur horizontal.

Cette étude pratique a été réalisée à l'aide d'un modèle expérimental, simulant la décharge de foudre sur un sol au dessus duquel se trouve un paratonnerre horizontal.

En premier lieu, nous avons considéré les zones d'attraction pour un sol homogène de conductivité .

Nous avons ensuite étudié les variations de ces zones d'attraction lorsque le paratonnerre est au-dessus d'un sol hétérogène constitué de deux matériaux de conductivités différentes.

Les résultats de ces essais nous permettront d'envisager une nouvelle approche de la protection tenant compte de la nature du sol.

C H A P I T R E I

M E C A N I S M E D E F O U D R E

I. 1. ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE

II. 1.1. Etude du système terre-atmosphère

La terre est entourée par beau temps d'une couche ionisée qui a une épaisseur d'environ 100 km [2]. Cette couche étant chargée positivement, la surface de la terre acquiert par influence une charge négative. On peut donc assimiler le système globe-terrestre-atmosphère à un condensateur sphérique (fig. 1) de capacité

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\frac{1}{r} - \frac{1}{h}} \approx 46 \text{ mF} \quad (\text{eqn. 1}) \quad [2]$$

r : rayon de la terre = 6367 km
 h : rayon de la couche ionisée = 6467 km
 ϵ_0 : permittivité de l'air = $8.85 \cdot 10^{-12}$

On a mesuré à la surface de la terre des intensités de champ allant de 100 à 400 V /m . [2] .

Cette intensité dépend de l'heure de la journée, de l'altitude et de l'ensoleillement.

A cause de la présence d'ions créés par les radiations cosmiques, il résulte un mouvement permanent de charges. [2].

I. 1.2. Formation des nuages orageux :

Ce sont des "cumulo-nimbus" dont la surface peut atteindre des dizaines de km² et leur épaisseur plusieurs km. Ils sont situés à une hauteur moyenne de 2 km du sol (fig. 2) ; leur formation est due à un vent montant qui provoque une détente de l'air humide lors de son ascension puis son refroidissement par condensation.

Ce processus provoque une séparation de charge à l'intérieur du nuage.

Les gouttellettes d'eau chargées négativement se retrouvent à la base du nuage, tandis que les cristaux de glace moins lourds et chargés positivement sont au sommet.

Ce nuage constitue ainsi un dipole dont les charges vont induire entre la terre et le nuage un champ électrique d'intensité variable au dessous de la base du nuage (fig.3) [1].

Le mécanisme de séparation de charges est très complexe, plusieurs théories ont été proposées pour l'interprétation de ce phénomène, on en citera les deux suivantes :

. Théorie de la précipitation :

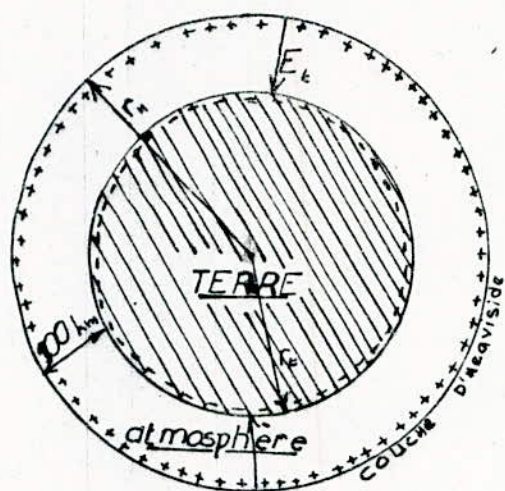
Une goutte d'eau tombant dans le champ électrique terrestre devient polarisée. Le haut de la goutte devient chargé négativement et le bas positivement. Lors de sa chute, la goutte d'eau va attirer les ions négatifs, présents dans l'atmosphère qui vont se fixer sur sa partie inférieure. A cause du courant d'air ascendant, les ions positifs ne peuvent se fixer sur la goutte

Ainsi les gouttelettes d'eau chargées négativement vont se retrouver sous l'effet de leur poids en bas du nuage. Tandis que les ions positifs plus légers seront entraînés vers le haut du nuage par le courant d'air ascendant. [2]

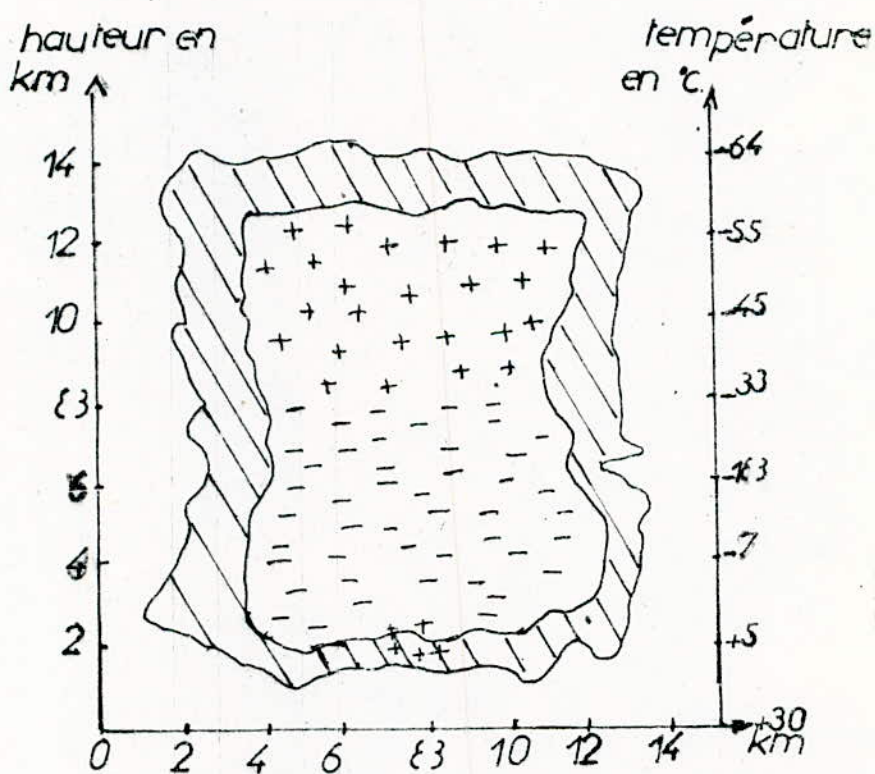
. Théorie de la convection :

Selon cette théorie, deux sources externes fournissent les charges électriques du nuage. La première source est constituée par les rayons cosmiques qui ionisent les molécules d'air situées au-dessus du nuage. La deuxième est constituée par des ions positifs créés au voisinage de la terre, au niveau des objets pointus où le champ électrique est suffisamment intense pour ioniser les molécules environnantes.

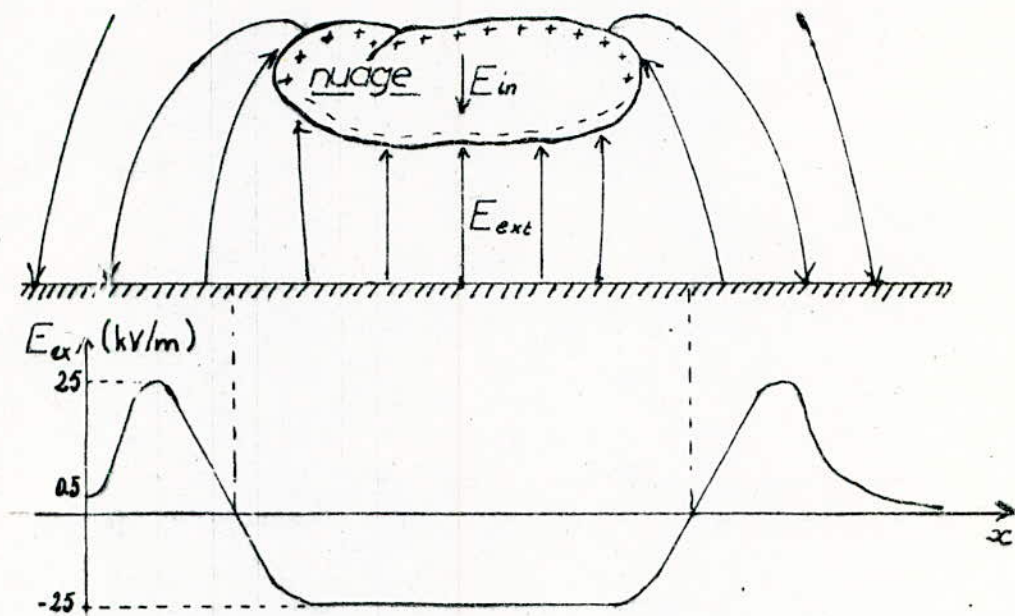
Les ions négatifs formés par les rayons cosmiques qui se fixent aux gouttelettes d'eau en pénétrant dans le nuage vont être attirés par les ions positifs. A cause des variations de températures dans les différentes régions du nuage, il y aura création de courants d'air ascendants qui vont entraîner les charges positives vers le haut. D'où la structure dipolaire du nuage [11]



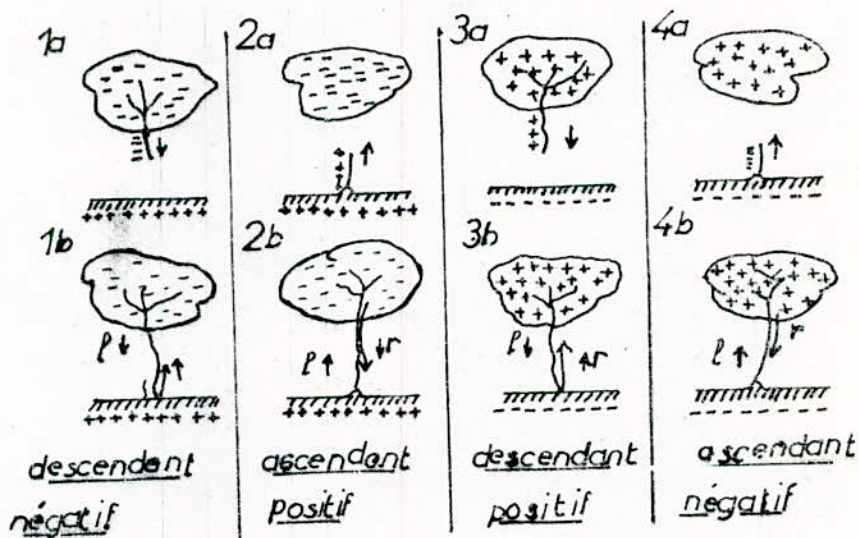
(Fig 1). schématisation du système terre-atmosphère [2]



(Fig 2) Structure générale d'un nuage orageux. [1]



(Fig. 3) Répartition spatiale et au niveau de la terre des champs électriques durant un orage. [2].



(Fig 4) Classification des coups de foudre d'après K. BERGER. [16].

I. 2. CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre

D'après K. Berger, il y a 4 types de décharges de foudres au sol, qui sont classés selon la polarité et le sens du traceur. (fig. 4.)

Les coups de foudre ascendants ont généralement lieu en présence d'aspérités naturelles ou artificielles (montagnes, tours...), tandis que les coups de foudres négatifs sont beaucoup plus répandus et représentent 80 à 90 pour cent des coups de foudre en zones tempérées. [16]

I. 3. MECANISME DE DECHARGE D'UN COUP DE Foudre

Lorsque le gradient d'amorçage de l'air $E = E_i$ est atteint, une décharge peut se produire, soit à l'intérieur du nuage, soit entre deux nuages, soit entre le nuage et la terre (fig. 5). [2]

La valeur du champ varie de 30 KV /cm, dans les conditions normales et aux basses altitudes, jusqu'à 10 KV /cm en hautes altitudes et en présence de gouttelettes d'eau. [3]
Le mécanisme de décharge diffère selon le type de coup de foudre :

I. 3.1. Coup de foudre descendant

Il débute par une prédécharge faiblement lumineuse à partir de la base du nuage où le champ électrique a atteint le seuil d'ionisation de l'air.

Cette prédécharge se dirige vers le sol par bonds successifs de 50 m environ, séparés par des temps d'arrêt de 40 à 100 μ s. [1]

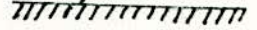
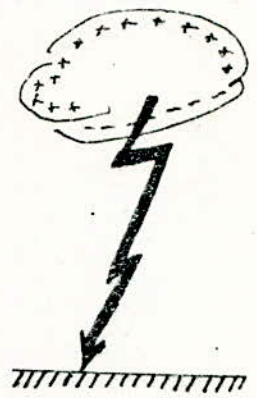
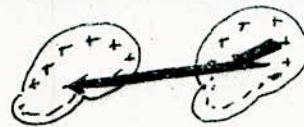
Cette prédécharge est appelée traceur par bond ou "stepped leader".

C'est un canal ionisé qui porte à sa pointe une concentration de charges et dont la vitesse de propagation moyenne varie de 0,15 à 0,20 m/s [3]

Ce dernier continue à se ramifier et à augmenter de luminosité au fur et à mesure de sa progression, lorsque le leader s'approche du sol, il induit par influence des charges à la surface du sol, et la d.d.p entre le nuage et le sol peut atteindre 1 M.V. [3]

Le champ électrique sera très intense au niveau du sol, surtout au voisinage des aspérités ou des objets pointus.

Lorsque l'intensité du champ moyen atteint environ la valeur de 5 kv/cm [1], il y a apparition de prédécharges ascendantes.

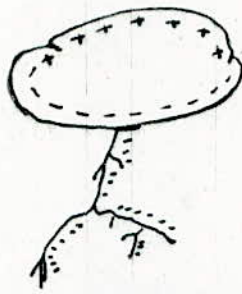


a) Décharge dans un nuage

b) Décharge entre 2 nuages

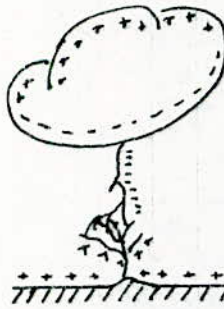
c) Décharge entre nuage et sol

(Fig. 5) DIFFERENTS TYPES DE DECHARGES DE Foudre [2]

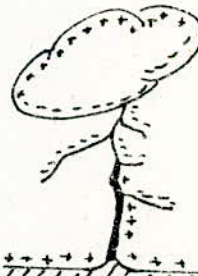


a) Développement du traceur par bonds

b) Apparition d'effluves montantes



c) Rencontre entre les traceurs



d) Return stroke

(Fig. 6) DEROULEMENT D'UN COUP DE Foudre AU SOL [4]

La distance entre la pointe du traceur et le sol, juste avant le saut final, est appelée distance d'amorçage. Au moment où les deux traceurs se rejoignent, il s'établit un court-circuit entre le nuage et la terre, permettant ainsi l'écoulement des charges positives vers la base du nuage. (fig. 6)

On observe alors un trait fortement lumineux qui va du sol au nuage à la vitesse d'environ $50,10^6$ m/s :

c'est l'arc en retour ou "return stroke" [4]. Le courant dans le "return stroke" est de l'ordre de quelques kA à 250 kA, et la température du canal atteint 15.000 à 20.000 °C.

C'est le return stroke qui est responsable des effets destructeurs de la foudre.

Lorsque le courant de la première décharge cesse de s'écouler, 10 à 30 ms plus tard, une seconde décharge descendante apparaît sous forme d'un leader qui progresse d'une façon continue à une vitesse de 10^6 m/s, en empruntant le canal du traceur par bond : c'est le Dart Leader (fig.7.) [1]

Sa vitesse est 10 fois plus importante que celle du stepped leader [4]. Cette décharge est ensuite suivie d'un return stroke comme précédemment.

Environ 30 à 80 % des coups de foudre sont composés de deux décharges et 20 % à de 3 à 5 décharges. [4]

I. 3.2. Coup de foudre ascendant

La présence de saillies et d'aspérités artificielles ou naturelles au niveau de la surface de la terre favorisent la concentration des lignes de champs et donc l'augmentation locale du champ électrique.

Ce qui provoque l'apparition d'effluves se transformant en un traceur ramifié qui progresse vers le nuage à la vitesse de 2 à $6 \cdot 10^4$ m/s [1]

Au moment où les ramifications du traceur touchent le nuage, il y a apparition d'une décharge qui peut durer une dizaine de millisecondes et écouler des courants de l'ordre de milliers d'ampères. [1]

I. 4. LOCALISATION DES COUPS DE Foudre

Il existe des endroits qui sont particulièrement foudroyés qu'on appelle "nids d'orage".

Trois facteurs peuvent expliquer cette concentration de coups de foudre :

.facteurs géologiques

On a constaté que la fréquence de foudroiement du sol dépendait de la nature de celui-ci.

Ainsi les failles humides, les nappes d'eau et les terrains marécageux, ont une certaine attirance préférentielle pour la foudre. [1]

.facteurs topologiques

L'existence de certaines conditions atmosphériques caractéristiques à une région donnée, favorisent la formation des orages de chaleur. [1]

La présence de vallées et de fleuves canalise le mouvement de l'air, favorisant la formation des orages.

.Concentration ionique de l'air

Elle peut expliquer la présence de nids d'orages, mais aucune donnée expérimentale n'existe jusqu'à maintenant pour affirmer le résultat. [1]

I. 5. PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA Foudre

II. 5.1 Distribution des amplitudes des courants

La distribution des amplitudes des courants de foudre obéit à une loi normale. Et si l'on porte en abscisse le logarithme de l'intensité du courant de foudre et en ordonnée la probabilité qu'a un coup de foudre de dépasser une intensité donnée, on obtient sensiblement des droites. (fig. 8)

Diverses expressions ont été proposées pour calculer cette probabilité [1]

$$\text{Log} (\mathcal{C}) = 2 - I/60 \quad (\text{eqn 2})$$

où I : courant de crête en KA

\mathcal{C} : probabilité pour que le courant soit supérieur ou égal à I en (%).

Popolanski a approximé cette distribution par une loi log normale :

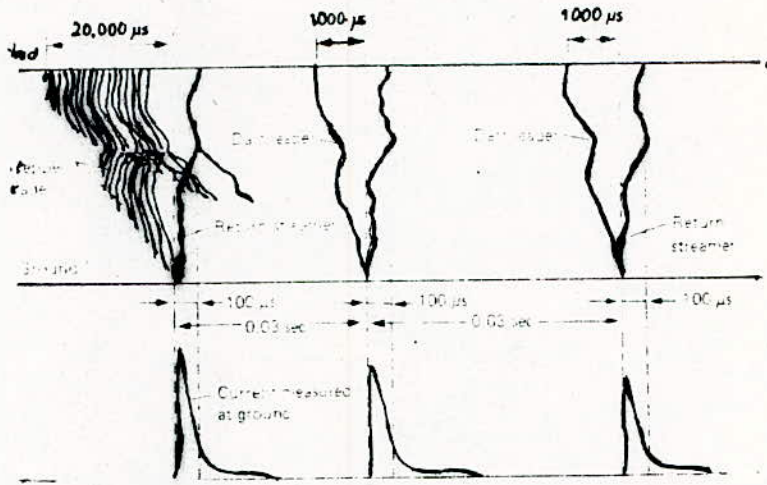
$$\mathcal{C}(I) = \frac{I}{\sigma \text{Log} I \sqrt{2\pi}} \int_0^I \frac{1}{\bar{I}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\text{Log} I - \text{Log} \bar{I}}{\sigma \text{Log} \bar{I}} \right)^2 \right] dP^{[16]}$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{I} = 25 \text{ kA} \\ \sigma = 0.39 \end{array} \right\}$$

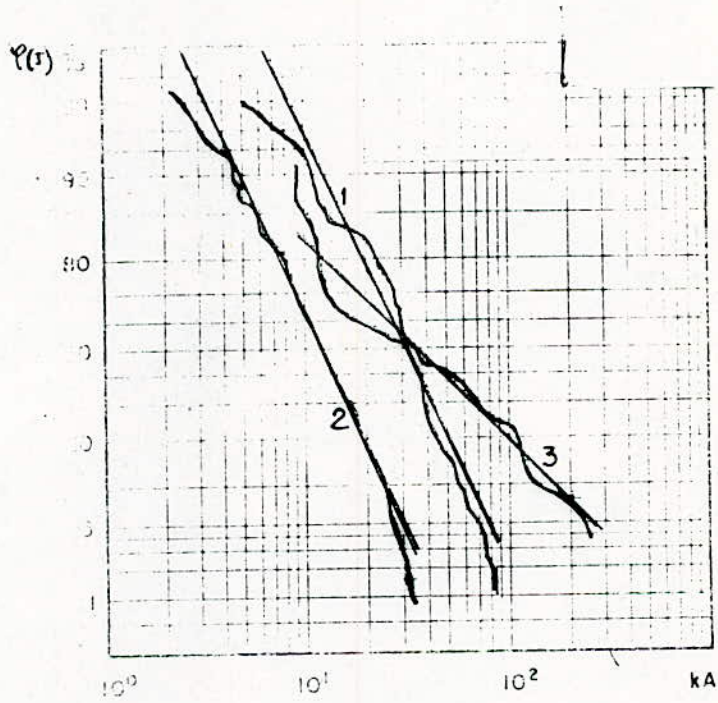
Pour les courants de foudre négatifs.

Des courbes représentées à la (fig 8) nous pouvons retenir les remarques suivantes :

. L'amplitude des courants de foudre positifs peut atteindre 108 KA dans 10 % des cas, tandis que pour les coups de foudres négatifs, 10 % des amplitudes sont de l'ordre de 60 KA.

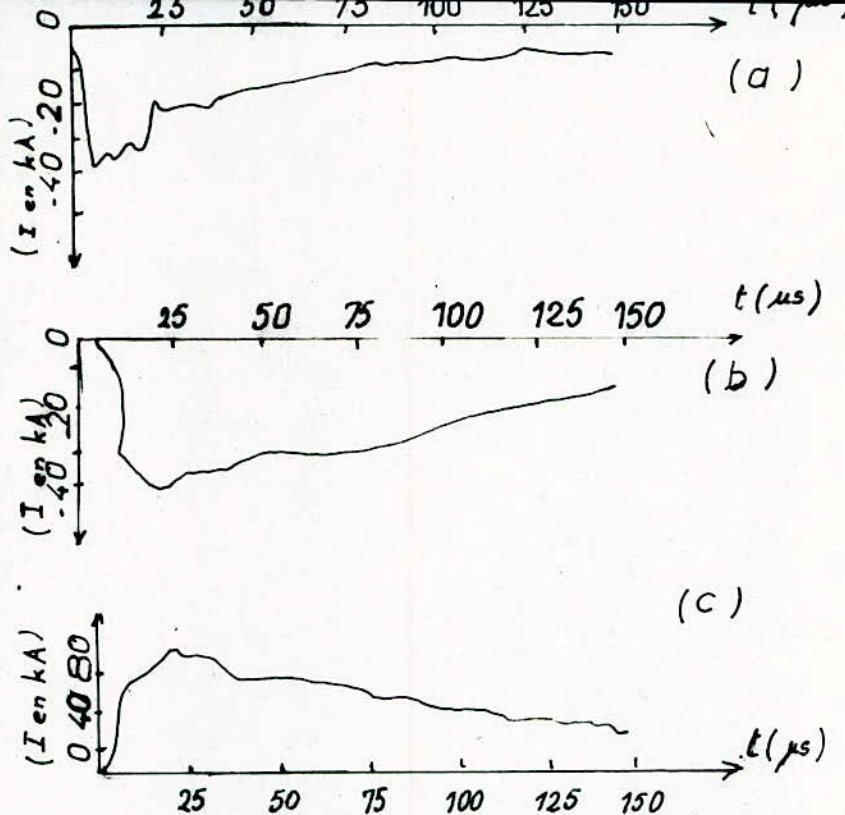


(Fig. 7) Schématisation d'un coup de foudre descendant. [4]



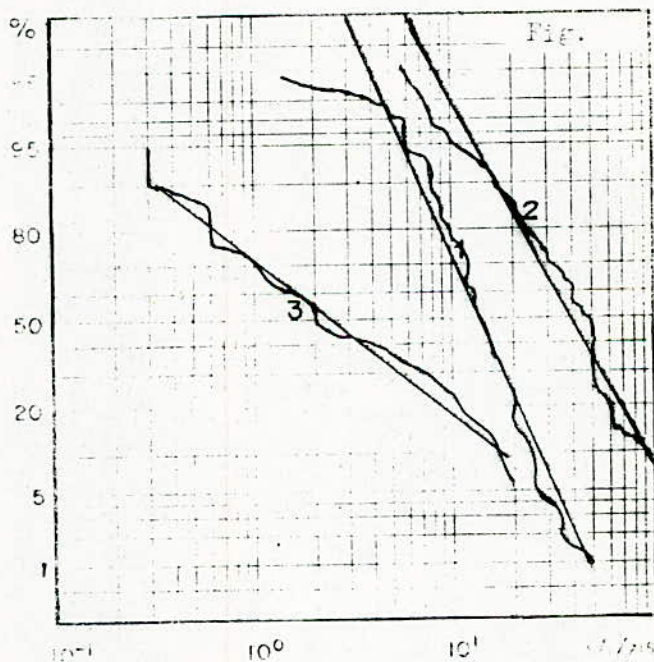
1. Premières impulsions négatives
2. Impulsions suivantes négatives
3. Impulsions positives

(Fig. 8) Distribution des amplitudes des courants de foudre. [15]



(Fig. 9) Forme d'onde d'un courant de foudre [1]

- (a) Courant de la 1ère décharge (coup de foudre négatif)
- (b) Courant de la 2ème décharge (coup de foudre négatif)
- (c) Coup de foudre positif



- 1. Premières décharges négatives
- 2. Décharges suivantes négatives
- 3. Décharges positives

(Fig. 10) Vitesse de montée maximale d'un coup de foudre [15]

. La valeur moyenne (50 % de la distribution globale) se situe autour de 30 KA pour les courants positifs et vers 28 KA pour les courants négatifs.

En conclusion, bien que les coups de foudre positifs soient rares, ils peuvent être plus dangereux que les coups de foudre négatifs.

I. 5.2 Forme d'onde des courants de foudre

Les formes d'ondes diffèrent suivant leur polarité. Une décharge négative est la combinaison de courants impulsionnels à front raide et de courants continus. La durée du front de la décharge partielle varie de 10 à 20 μ s

Un coup de foudre positif est constitué d'une seule décharge et peut durer de 0,1 à 0,2 secondes et la durée du front de 20 à 50 μ s (fig. 9.c) [1]

I. 5.3. Raideur des fronts d'onde

La raideur de front est l'amplitude du courant par unité de temps. Elle représente la vitesse de montée maximale du courant. Cette donnée a une grande importance dans les réseaux industriels. La figure (10) donne les distributions statistiques des raideurs de front, pour les courants négatifs seuls, pour les courants positifs seuls et pour des décharges négatives secondaires. (dart leader)

On constate que les coups de foudre positifs ont une probabilité moyenne de 50 %, qui correspond à une raideur de 2,5 KA/ μ s. Tandis que pour les coups de foudre négatifs, elle correspond à 10,5 KA / μ s

D'autres grandeurs électriques caractérisent la foudre, comme la durée de front ; l'énergie présumée, durée du coup de foudre, charge du coup de foudre etc...

I. 6. EFFETS D'UN COUP DE FOUDRE

I. 6.1 Effet de la charge Q :

Elle varie entre 10 et 300 C. Ses effets sont caractérisés par la fusion des conducteurs.

I. 6.2 Effet de l'intégrale d'action

$$G = \int i^2 dt$$

Elle représente l'énergie dépensée par effet joule dans une résistance d'un Ohm

I. 6.3 Effets dynamiques

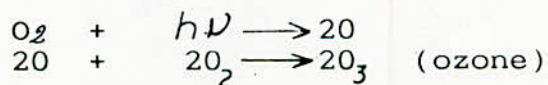
Les conducteurs de raccordement sont soumis aux forces électrodynamiques, qui ne sont pas négligeables pour les forts courants.

I. 6.4 Effets électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence, provoquent des perturbations radiophoniques. Le champ magnétique très variable dans le temps va induire des f.e.m aux bornes des conducteurs avoisinants.

I. 6.5 Effets électrochimiques

Il y a création d'ozone suivant la réaction :



I. 6.6 Effets acoustiques

Le courant de foudre augmente la température et la pression de l'air avoisinant ; cet air se répand dans l'atmosphère produisant une onde de choc. [6].

CHAPITRE II

PROTECTION CONTRE LA Foudre EN SOL HOMOGENE

Les surtensions atmosphériques représentent un danger pour les personnes, comme elles peuvent causer des dégâts matériels considérables, notamment au niveau des réseaux électriques. Il est donc indispensable, pour une protection efficace de connaître les surtensions que peut engendrer un coup de foudre dans ces réseaux.

II.1. SURTENSIONS DE FOUDRE DANS UN RESEAU

Lorsqu'un coup de foudre tombe sur un réseau d'exploitation, il va provoquer une surtension dont l'effet diffère suivant le point d'impact.

Quatre cas peuvent alors se produire :

II.1.1 Coup de foudre direct sur un conducteur de phase :

Lorsque le coup de foudre tombe sur une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact. Il entraîne avec lui une surtension dont la valeur est $U(t)$ (Fig. 11) : $U(t) = Z \left(\frac{i(t)}{2} \right)$ (eqn. 4)

ou : Z est l'impédance d'onde du conducteur de phase. Pour un conducteur situé à une hauteur H du sol, et de rayon r

$$Z = 60 \mathcal{L}_n \frac{2H}{r} (\Omega) \quad (\text{eqn. 5})$$

Pour les lignes à très haute tension, il faudra tenir compte de l'effet couronne, l'impédance d'onde modifiée devient : $Z = 60 \sqrt{\mathcal{L}_n \frac{2H}{r} \mathcal{L}_n \frac{2H}{r_c}} (\Omega)$ (eqn. 6)

où : r_c est le rayon du conducteur augmenté de l'épaisseur de la couche d'air ionisée.

Pour un conducteur constitué de plusieurs faisceaux :

$$r = \sqrt[n]{\frac{nR}{R}}$$

où n : est le nombre de faisceaux du conducteur.

P : rayon d'un faisceau

R : rayon géométrique moyen du conducteur

Ce cas de foudroiement est le plus dangereux, car il entraîne presque à coup sûr l'amorçage de la distance d'isolement des chaînes d'isolateurs de la ligne.

II. 1.2. Coup de foudre sur le cable de garde ou sur le pylone

Lorsque la foudre tombe sur un cable de garde ou sur un support métallique, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation de potentiel des structures métalliques.

La tension aux bornes de la chaîne d'isolateur dépend de l'impédance du pylone et du courant qui le traverse (fig.12)

$$U(t) = k \left[R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \right] \quad (\text{éqn. 7})$$

Où : k est la fraction du courant qui traverse le pylone. Si cette tension atteint la tension d'amorçage de l'isolement, il se produit un amorçage en retour.

II. 1.2 Surtension dans un poste

Lorsqu'une onde de tension d'amplitude U_c atteint un poste elle provoque une surtension :

$$U_p = \frac{2 U_c}{n} \quad (\text{eqn. 8})$$

avec : U_c : valeur de crête de l'onde incidente.

n : nombre de lignes arrivant au poste.

Le cas le plus défavorable est pour $n = 1$. Dans ce cas, il faut assurer la protection du matériel bobiné du poste en installant des parafoudres.

Si un disjoncteur, placé dans la ligne est ouvert, il y aura apparition à ces bornes d'une surtension qui est la somme de l'onde de choc de foudre et la tension entre phase à fréquence industrielle sur le poste; sa valeur maximale est : (voir fig. 13)

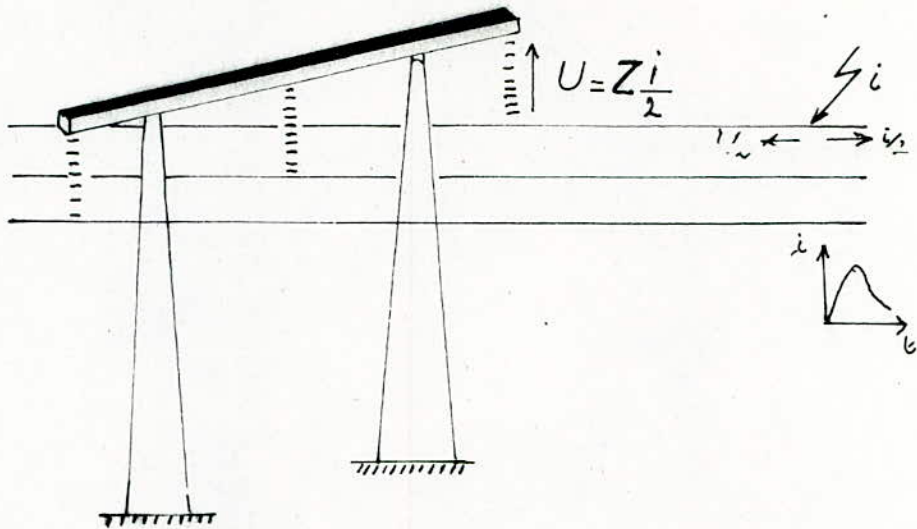
$$U_f = 2 U_c + U_L \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (\text{éqn. 9})$$

II. 1.4 Coup de foudre à proximité d'une ligne

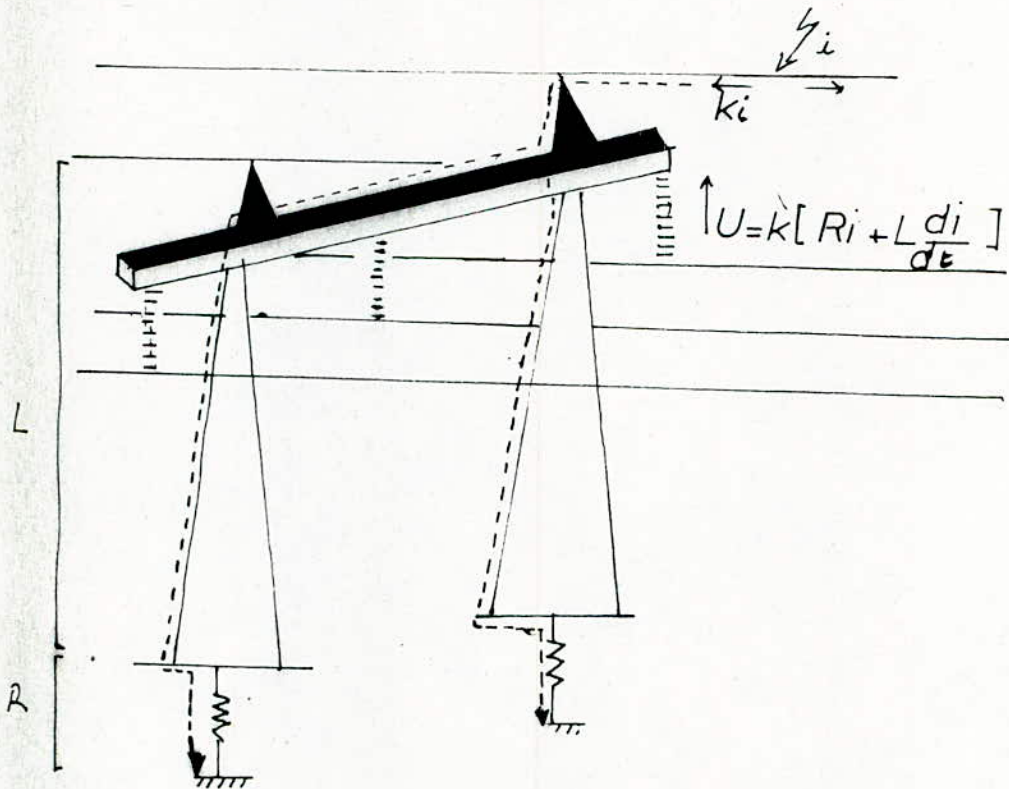
Les coups de foudre tombant à proximité des lignes ne sont pas dangereux pour les réseaux électriques. Cependant, il peuvent causer des dégâts en basse tension. Les surtensions peuvent être dues à 2 causes essentielles :

- Annulation rapide du champ électrique au moment du coup de foudre qui induit une surtension.
- Effet électromagnétique entre la ligne et le canal de foudre lors de la formation du return stroke.

.../.



(FIG-11) FOUROIEMENT D'UN CONDUCTEUR DE PHASE. [1]



(FIG-12) FOUROIEMENT D'UN CAIBLE DE GARDE [1]

II. 2. SEVERITE ORAGEUSE

Pour une protection efficace, il est nécessaire de connaître les paramètres suivants :

- . Niveau kéraunique :

C'est le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu.

Cette notion est assez imprécise car elle tient compte des décharges entre nuages, et dépend de beaucoup de facteurs extérieurs, cependant elle est suffisante pour avoir une distribution statistique des coups de foudre dans une région donnée.

- . Densité de coups de foudre au sol : N_g

La définition du niveau kéraunique étant assez rudimentaire, on a introduit la notion de densité de coups de foudre par km^2 et par an.

A partir des résultats fournis par des compteurs CIGRE, des chercheurs ont proposé les formules empiriques suivantes :

$$N_g = \frac{Y_g \cdot k}{\pi \cdot R_g^2} \quad (\text{éqn. 10}) \quad [16]$$

N_g : Nombre de coups de foudre par km^2 et par an.

Y_g : facteur de correction = $\frac{\text{N}^{\text{bre}} \text{ de coups de foudre qui ont actionné le compteur}}{\text{N}^{\text{bre}} \text{ total enregistré par le compteur}}$

k : nombre total de coups enregistrés

R_g : rayon d'action du compteur

- PRENTICE a aussi proposé une relation du type $N_g = a (N_s)^b$ (éqn. 11) [16]

Où : a et b : sont des coefficients qui dépendent de la zone considérée.

N_s : niveau kéraunique

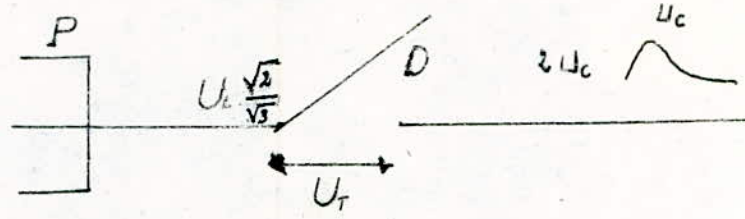
- En région tempérée cette relation devient :

$$N_g = 0.023 N_s^{1.3} \quad (\text{éqn. 12}) \quad [16]$$

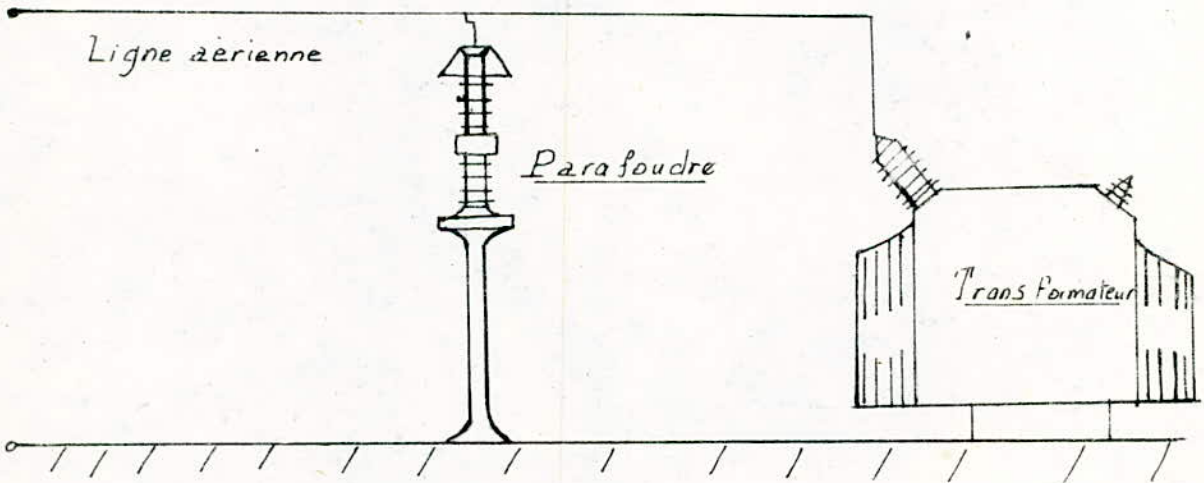
- Une autre expression de N_g proposée par GARY est :

$$N_g = N_s (0.1 + 0.35 \sin \alpha) (0.4 \pm 0.2) \quad (\text{éqn. 13}) \quad [1]$$

Où : α est la latitude de l'endroit considéré en degrés.



(FIG.13)_FOUDROIEMENT D'UN POSTE



(FIG.14)_ SCHEMA D'UN PARAFONDRE [7]

II. 3 DISPOSITIFS DE MESURE DU FOUDDROIEMENT

Afin d'affiner la statistique de coups de foudre, des appareils de comptage sont mis au point, dont nous citons :

. Compteur CIGRE

Son principe repose sur la mesure de la variation du champ local. On en distingue actuellement deux types :

- Le compteur CIGRE 500 Hz : dont le rayon d'action est de 37 km.

- Le compteur CIGRE 10 KHz : plus sensible que le précédent, et recommandé pour les zones très foudroyées, son rayon d'action est d'environ 20 km.

Le problème avec ce genre de compteurs est qu'ils ne distinguent pas les éclairs intranuages des coups de foudre au sol.

. Compteur optique :

Il permet de photographier directement la décharge.

. Comptage par triangularisation :

Son principe repose sur la détection des ondes électromagnétiques. Il est plus précis que les deux autres.

II. 4. MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA FOUDDRE

Les dispositifs les plus employés sont les parafoudres et les paratonnerres. Les premiers étant utilisés pour la protection de l'appareillage dans un réseau, les seconds ont un domaine d'application plus large, et servent à protéger une certaine portion de l'espace contre les coups de foudres directs.

II. 4.1 Protection par parafoudre

Ils sont très répandus sur les réseaux HT. Se placent entre une phase et la terre. (fig. 14)

Ce sont des appareils qui écoulent, comme les éclateurs, une onde de courant lorsqu'une surtension arrive à leurs bornes, maintenant ainsi la surtension dans certaines limites.

Le type de parafoudre le plus répandu est le parafoudre à résistance variable qui est constitué d'un ou plusieurs éclateurs en série avec une résistance non linéaire. Ils fonctionnent comme un interrupteur de mise à la terre extrêmement rapide, mais une fois la tension revenue à sa valeur nominale, ils éliminent rapidement la liaison avec la terre. [7]

II. 4.2. Protection par paratonnerre

Les paratonnerres sont, soit à cage, soit à tige. Ils sont constitués : d'organes capteurs, de conducteurs de descente et de prises de terre.

II. 4.2.1 Organes capteurs

Ils sont constitués d'une ou de plusieurs tiges verticales qui servent à capter la foudre.

II. 4.2.2 Les conducteurs de descente

Ces conducteurs relient les tiges aux prises de terre, ils sont conçus pour supporter de fortes intensités (jusqu'à 100 kA)

Leur section est calculée suivant la formule [8] :

$$S = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{k} \quad (\text{eqn. 14})$$

S : section du conducteur en [m]

I : courant en [A]

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

k : facteur dépendant de la nature du matériau utilisé.

$$k = \sqrt{\frac{Q_c (B+20)}{\rho_{20}} \cdot \ln \left(\frac{(\theta_f - \theta_i)}{(B + \theta_i)} + 1 \right)} \quad (\text{eqn.15})$$

où : θ_i : température initiale (ambiante) en [°C]

Q_c : Capacité volumique thermique du matériau en [J/°C mm³]

ρ_{20} : Résistivité électrique du matériau à 20°C en [Ω .mm]

θ_f : température finale admissible du conducteur en [°C]

B : inverse du coefficient de température de la résistivité à 0°C du matériau en [°C]

II. 4.2.3 Les prises de terre Elles doivent avoir une résistance extrêmement faible. Elles sont constituées de tiges d'acier sur un grillage métallique enfoui dans une terre conductrice.

Dans le dimensionnement de la prise de terre, il est important de :

- réduire la température des électrodes, car leur échauffement créé une couche de terre isolante (vitrification)

- veiller à ne pas atteindre les canalisations enfouies à proximité.

La répartition du potentiel au voisinage de l'électrode est donnée par [8] :

$$V(x) = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{(L+e) + \sqrt{(L+e)^2 + x^2}}{e + \sqrt{e^2 + x^2}} \right] \quad (\text{eqn.16})$$

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

I : courant de crête en [A]

L : longueur du conducteur en [m]

e : profondeur d'enfouissement en [m]

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

Des travaux de recherche basés sur l'analyse du foudroiement des lignes ont conduit AMSTRONG, GOLD et WHITEHEAD à l'élaboration d'un modèle électrogéométrique pour les zones d'attraction d'un paratonnerre.

II.5. MODELE ELECTROGEOMETRIQUE

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

Une expression analytique proposée pour exprimer la dépendance entre la distance d'amorçage et le courant de crête est :

$$d = 9.4 I^{2/3} \quad (\text{eqn. 17}) \quad [1]$$

d : distance d'amorçage en [m]

I : intensité de crête du courant en [A]

Le principe du modèle électrogéométrique est le suivant :

Si l'on considère un système de coordonnées xoy, où ox représente le niveau du sol et OY la verticale (fig. 15). Et si on place la tige verticale OH de hauteur h, on peut tracer une parabole définie par les points P à égale distance de la pointe H, de la tige et du sol. Son équation est :

$$h^2 - 2 \cdot hy + x^2 = 0 \quad (\text{eqn 18})$$

On peut définir ainsi 2 zones : I et II

- Si le traceur de foudre est dans la région I, il ira vers le sol.

- S'il est dans la région II, il sera attiré par la tige s'il est à une distance inférieure à d de H .

La limite de protection est donc l'ensemble des points de la parabole tels que : $HP = d$; soit :

$$x \leq h \sqrt{\frac{2d}{h} - 1} \quad (\text{eqn. 19}) \quad [1]$$

Deux cas peuvent se produire alors suivant la valeur de d :

- 1er cas : $d \geq h$

La zone d'attraction est la parabololoïde dont la base est un cercle de centre H et de rayon x .

La surface de capture en fonction du courant est alors :

$$s(i) = \pi x^2 = \pi (2dh - h^2) \quad (\text{eqn. 20}) \quad [1]$$

- 2ème cas : Si $d < h$

N'importe quel autre point que H de la tige peut attirer le traceur de foudre, s'il est situé dans un rayon x tel que $x \leq d$.

La zone d'attraction sera donc un cône dont la surface de capture (fig. 16) est $S(i) = \pi d^2$. (eqn.21)

La zone de protection sera donc d'autant plus grande que le courant de foudre sera intense.

II. 6 PROTECTION D'UNE LIGNE

On veut protéger une ligne contre des courants de foudre d'amplitude supérieure à I_0 , correspondant donc à un coup de foudre de distance d'amorçage d_0 (eqn. 17).

Pour cela, on doit placer des cables de garde au-dessus des conducteurs de phase de la ligne.

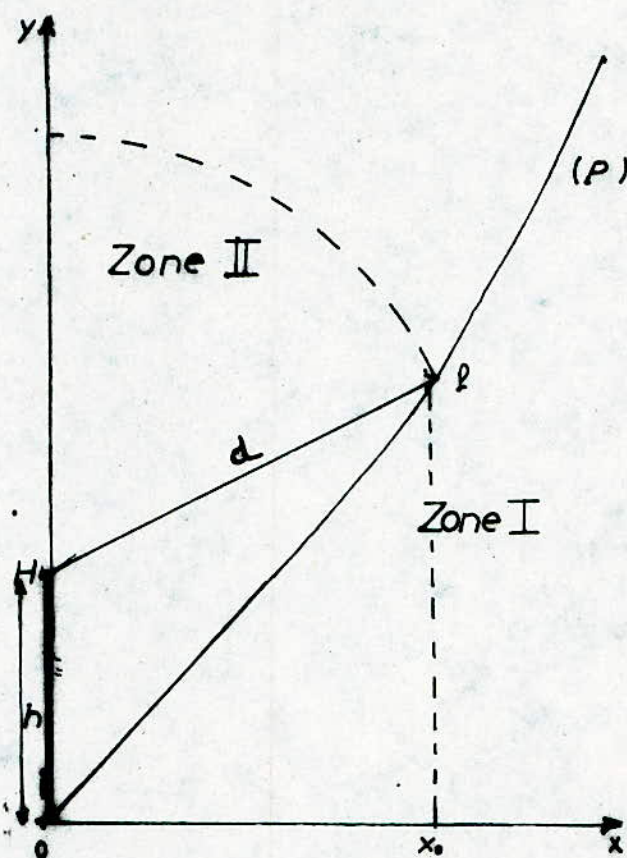
Il existe une position optimale du cable de garde qui assure la meilleure protection.

Nous déterminerons cette position d'après le principe du modèle éléctrogéométrique.

Soit un conducteur de phase situé à une hauteur H du sol (fig 17.). Et soit (P) l'ensemble des points de la parabole situés à égale distance du sol et du conducteur.

Tout traceur survenant à droit de la parabole (région I), ira vers le sol, la ligne ne sera donc pas touchée.

Si le coup de foudre tombe dans la région II, et que sa distance d'amorçage soit inférieure à d_0 , il touchera le conducteur mais sans causer de dégâts.



(Fig 15). ZONE DE CAPTURE D UNE TIGE
 VERTICALE SELON LE MODELE
 ELECTROGEOMETRIQUE [1]

Cette région est délimitée par le cercle F de rayon d_0 et de centre A.

Il faudra par contre se prémunir des coups de foudre survenant à gauche de la parabole P et dont la distance d'amorçage est supérieure à d_0 (région III).

Soit M le point d'intersection de l'arc de cercle F et de la parabole P.

Si on trace l'arc de cercle G de centre M et de rayons d , on aura quelque soit le point D situé dans la zone III, la distance DA supérieure à la distance du point D vers un point quelconque de l'arc G, situé au-dessus de A.

Donc, si on place notre cable de garde en ce point C de l'arc G, c'est lui qui attire les coups de foudre survenant dans cette zone.

Le paramètre définissant la position du cable de garde par rapport au conducteur de phase est l'angle de protection :

$$\theta = \arcsin \left[1 - \frac{H}{d_0} \right] - \arcsin \left(\frac{AC}{2d_0} \right) \text{ (eqn. 22) [13]}$$

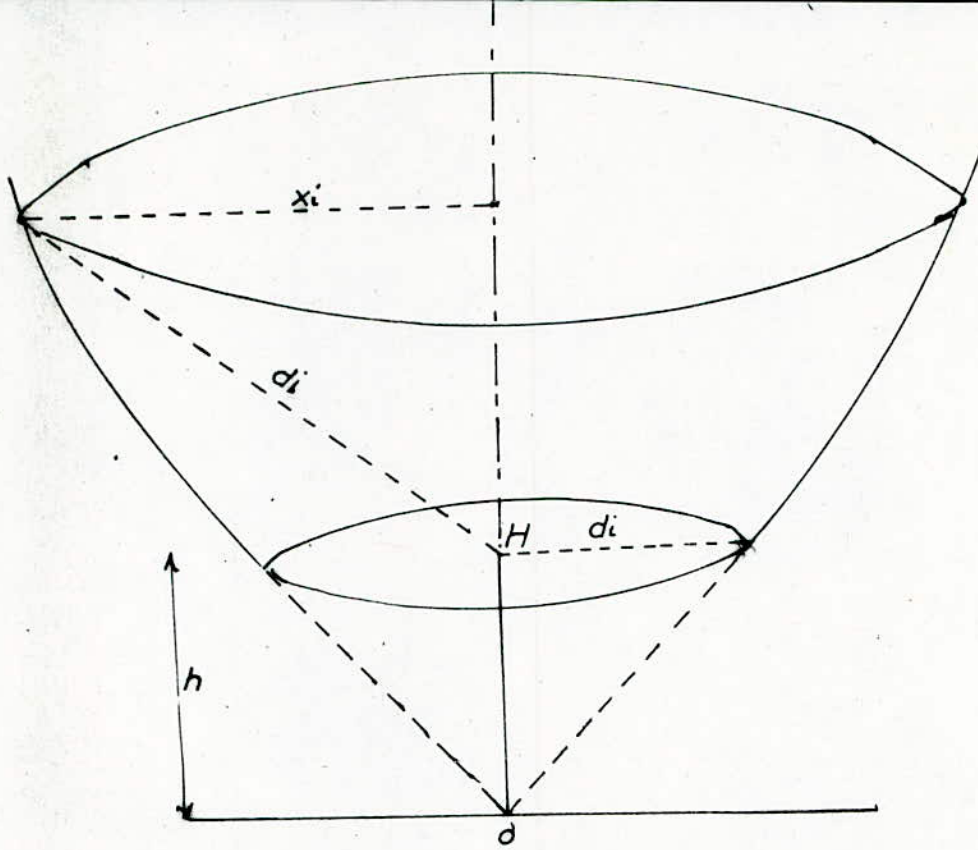
Dans le cas d'une ligne à trois conducteurs en nappe (fig. 18), on utilise deux conducteurs de garde, dont l'emplacement est déterminé en considérant les conducteurs qui sont les plus exposés au coup de foudre, tout en veillant à ce que la protection du troisième soit vérifiée.

Pour tenir compte de l'influence du terrain, la hauteur du conducteur à prendre en compte dans l'équation 22 sera :

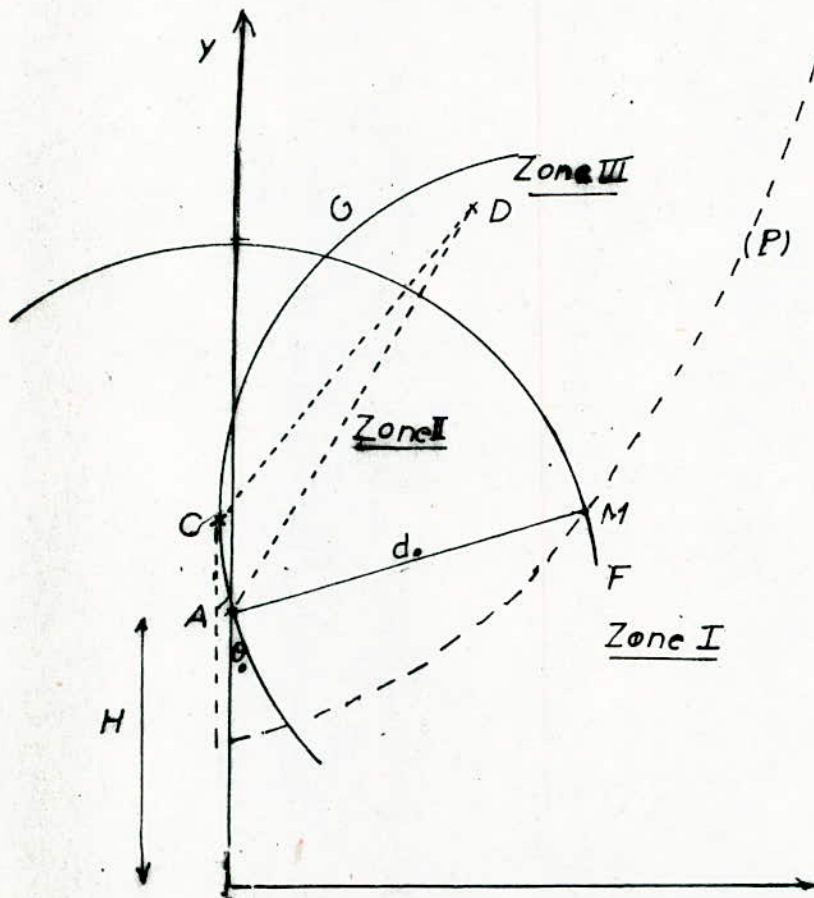
- . $H = 1.1 (H_p - \frac{2}{3} S_c)$ en terrain plat.
- . $H = H_p$ en terrain vallonné dont la pente est de 10 %
- . $H = 2 H_p$ en terrain montagneux
- . H_p : hauteur d'accrochage du pylone
- . H : hauteur du conducteur.

L'angle de protection peut être obtenu directement à l'aide d'un abaque (fig. 19), tenant compte des paramètres suivants :

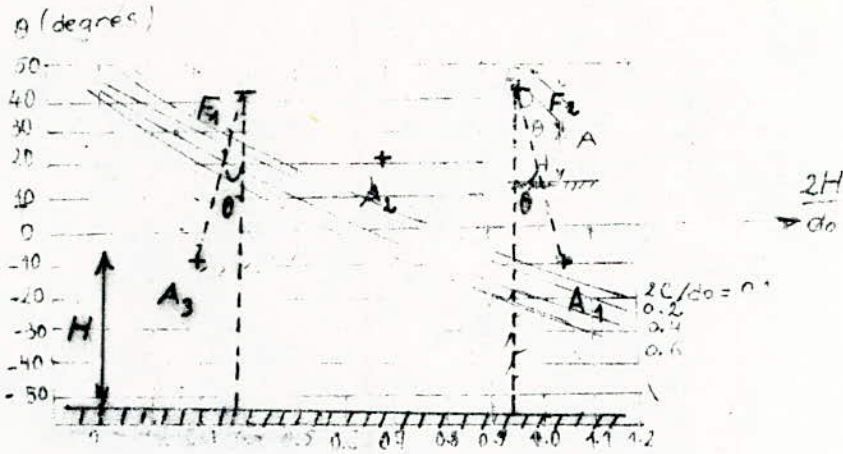
- . H : hauteur du conducteur au sol
- . C : distance entre le conducteur de phase et le cable de garde
- . d : distance d'amorçage critique



(FIG-16) SURFACE EQUIVALENTE DE CAPTURE D'UNE TIGE VERTICALE [1]

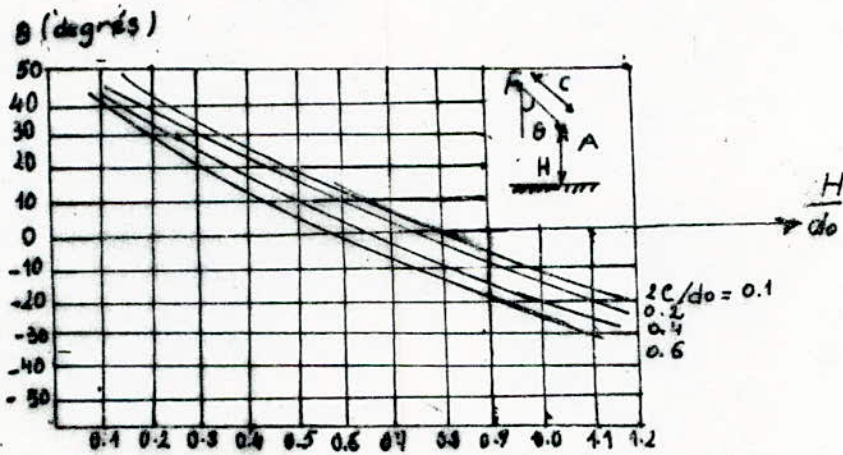


(FIG 17) MODELE ELECTROGÉOMETRIQUE DANS LE CAS D'UNE LIGNE PROTÉGÉE PAR UN CABLE DE GARDE [2]



(FIG-18) PROTECTION D'UNE LIGNE EN

FIG 19: ABAQUE DE DETERMINATION DE L'ANGLE DE PROTECTION θ_0 D'UN CABLE DE GARDE [1]



(FIG 19) ABAQUE DE DETERMINATION DE L'ANGLE DE PROTECTION θ_0 D'UN CABLE DE GARDE [1]

II. 7. METHODE GRAPHIQUE DE LA DETERMINATION DES ZONES DE PROTECTION

II. 7.1 PRINCIPE

Etant donné que le point d'impact de la foudre est le premier objet situé à la distance d du traceur. On peut imaginer que la pointe du traceur est le centre d'une sphère de rayon d , (distance d'amorçage).

Pour chercher les zones de protection, on fait rouler la sphère sur le sol dans toutes les directions, sans jamais perdre le contact avec lui.

Si au cours de ce mouvement la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection sans jamais toucher l'objet à protéger, alors la protection de celui-ci est assurée.

II. 7.2 Applications

Nous appliquerons ce principe pour la détermination des zones de protection pour les différents cas suivants :

II. 7.2.1 Cas d'une tige verticale

On peut envisager deux possibilités :

- $d > h$: la zone de protection est la partie hachurée sur la (fig 20), dont le rayon de protection au sol est : $x_0 = \sqrt{2hd - h^2}$. (eqn. 23)

- $d < h$: d'après la (fig.21), on voit que le rayon de protection au sol est pour ce cas :

$$x_0 = d$$

II. 7. 2.2 Cas de deux tiges verticales

Soit h la hauteur des deux tiges et $2D$ la distance entre elles.

Pour que les deux tiges aient une action conjuguée il faudrait que D soit inférieur à d .

Deux cas sont à considérer :

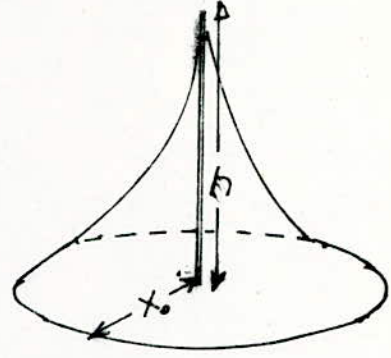
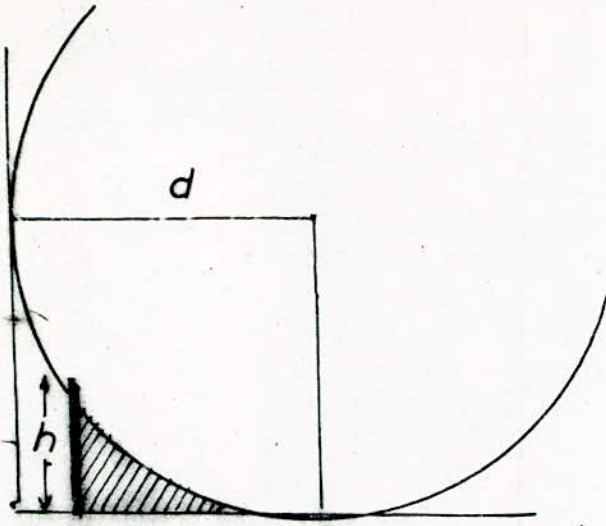
- $d > h$

Le cas le plus défavorable à lieu lors d'une approche horizontale, dans ce cas la hauteur H minimale protégée au centre vaut : $H = d - \sqrt{(d-h)^2 + D^2}$ (fig.22.a)

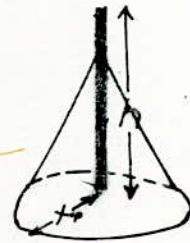
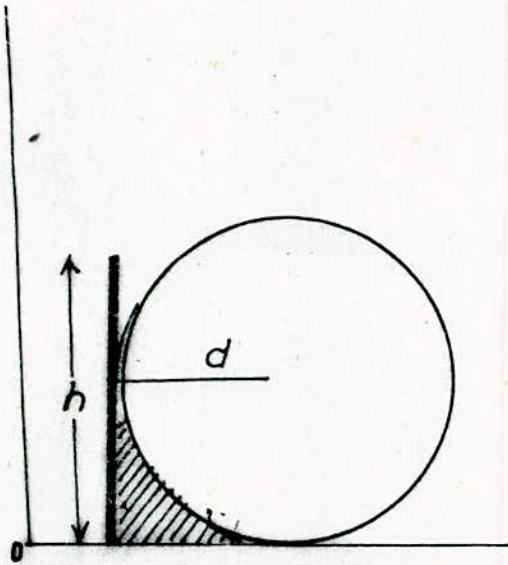
La zone de protection au sol sera le cercle de rayon

$$x_0 = \sqrt{h(2d-h) - D^2} = \sqrt{2hd - h^2 - D^2} \quad (\text{éqn. 24})$$

- $d < h$: (fig. 22.b)



(FIG. 20) ZONE DE PROTECTION D'UNE TIGE VERTICALE DANS LE CAS OÙ: $d > h$



(FIG. 21) ZONE DE PROTECTION D'UNE TIGE VERTICALE DANS LE CAS OÙ: $d < h$

La hauteur vaut pour ce cas : $H = d - D$

Le rayon de protection au sol vaut : $x_0 = \sqrt{d^2 - (D)^2}$
(eqn. 25)

II. 7.2.3 Cas de quatre tiges verticales (fig.22)

Soit quatre tiges disposées en un carré de côté $2D$.

Le cas le plus défavorable est celui d'une approche verticale, pour que les zones de protection des quatre tiges ne soient pas indépendantes, il faut que $d > D\sqrt{2}$.

La hauteur minimale protégée au centre est :

$$H = h - d + \sqrt{d^2 - 2D^2}$$

L'approche horizontale, se fait comme pour le cas de deux tiges verticales.

II. 7.2.4 Cas d'un fil horizontal

Deux cas sont à envisager :

- $d > h/2$: on voit d'après la (fig.24) que la distance de protection horizontale est : $x = \sqrt{2dh - h^2}$ (eqn.28) si l est la longueur du câble, la zone de protection au sol est donc un rectangle de surface : $S = 2xl$.

- $d < h/2$:

Pour les courants tels que $d < h/2$ qui sont généralement de faibles courants, le fil n'assure plus aucune protection.

II. 7.2.5 Cas de deux fils horizontaux

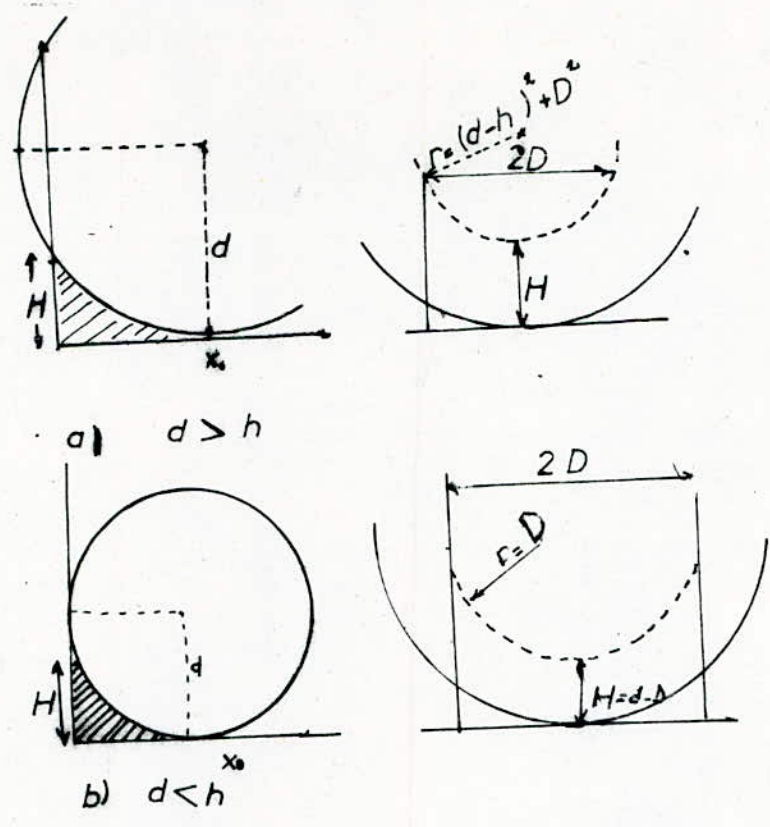
Soit $2D$ la distance entre les 2 conducteurs, et l la longueur des tiges, pour que les deux tiges aient une action commune, il faut que $d > D$

La hauteur minimale protégée vaut :

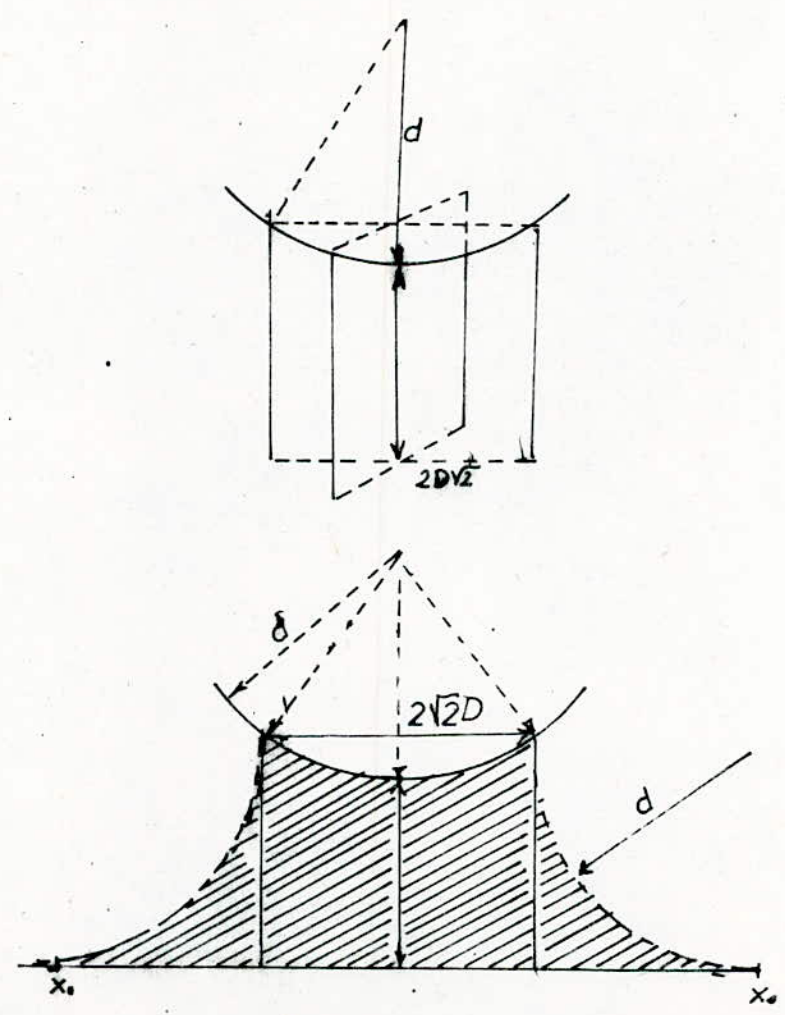
$$H = h - d + \sqrt{d^2 - D^2} \quad (\text{eqn. 29.})$$

La surface au sol protégée est :

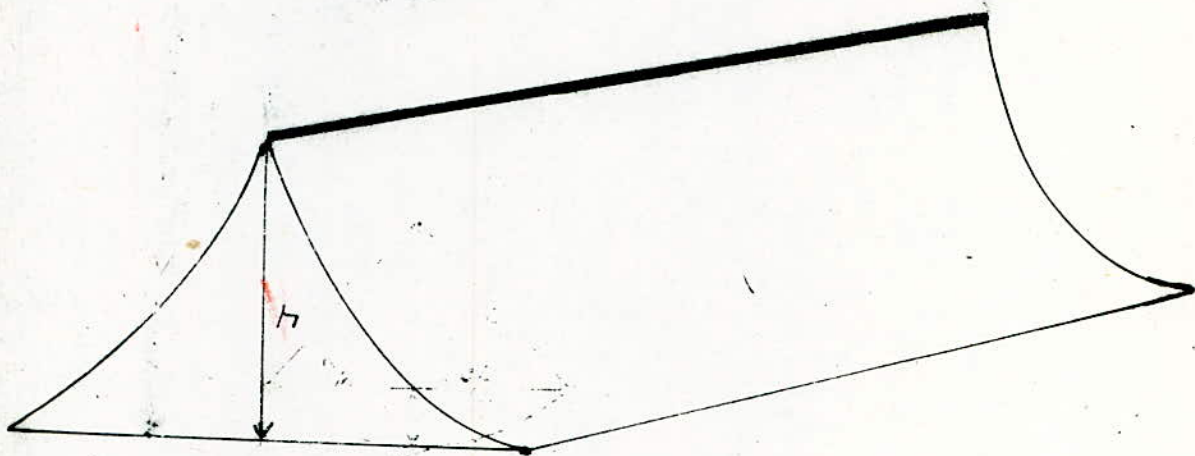
$$S = (2x + D) l \quad \text{avec} \quad x = \sqrt{2dh - h^2} \quad (\text{fig. 25})$$



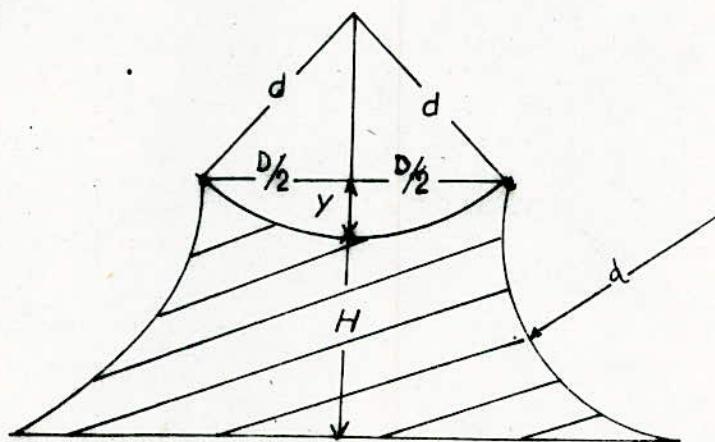
(FIG-21) ZONE DE PROTECTION DE DEUX TIGES VERTICALES



(FIG-22) ZONE DE PROTECTION DE QUATRE TIGES VERTICALES



(FIG 24) .ZONE DE PROTECTION D'UN CONDUCTEUR HORIZONTAL



(FIG 25) ZONE DE PROTECTION DE DEUX FILS HORIZONTAUX

C H A P I T R E III

DECHARGE EN SOL HETEROGENE

III. 1. INTRODUCTION

Le sol au dessus d'un nuage orageux est constitué de matériaux qui diffèrent par leur propriétés électrogéologiques. Dans ce chapitre nous allons examiner l'influence de la nature du sol sur le point d'impact de la décharge de la foudre. Cette étude sera basée sur les travaux réalisés par J.FERRAS [17] à l'E.N.P.A.

III.2. INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR LA DECHARGE DE FOUDRE

Le sol présente généralement une structure stratifiée. Les différents matériaux qui le constituent possèdent des propriétés électromagnétiques différentes:

- La perméabilité relative μ_r : ne varie pas dans une large gamme, sa valeur maximale étant égale à 5.
- La permittivité relative ϵ_r : varie de l'unité à la centaine ; liée à la polarisation électrique des matériaux.
- La conductivité γ varie dans une gamme très large: (10^{-6} à 10^{+7}) S/m, elle dépend de la porosité, l'âge et de la quantité, et la salinité de l'eau contenue dans la roche.

Des travaux antérieurs effectués par plusieurs auteurs, [10, 5] ont montré que les caractéristiques géologiques du sol sont étroitement liées à l'existence des zones préférentielles de foudroiement.

A mesure que la prédécharge de foudre progresse vers le sol par bonds successifs, il se produit un accroissement du champ électrique au niveau du sol.

Le point d'impact qui sera déterminé lors du saut final, sera le point au sol où l'intensité du champ est la plus élevée. Cette intensité dépend de la charge contenue dans le traceur et de la distance entre le traceur et le sol.

Soit γ la conductivité du sol et ϵ sa permittivité électrique, et ρ sa densité volumique de charges. Sans l'effet du champ électrique du nuage et de la prédécharge, les porteurs de charges se déplacent engendrant une densité de courant \vec{J} .

L'équation de continuité s'écrit :
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\gamma}{\epsilon} \rho = 0 \quad (\text{eqn.30})$$

Dont la solution est:
$$\rho = \rho_0 e^{-(t/t_c)} \quad (\text{eqn.31})$$

avec ρ_0 : densité de charge au sol à $t = 0$
 $t_c = \frac{\epsilon}{\gamma}$: constante de temps.

D'après l'expression (31), la densité volumique diminue en exponentielle, ce qui traduit le déplacement des charges vers la surfaces du sol; contribuant ainsi à l'augmentation de l'intensité du champ électrique à son niveau.

On voit ainsi que la vitesse de déplacement des charges est liée aux valeurs des paramètres γ et ϵ . Les valeurs extrêmes de Tc varient dans la limite suivante : [17]

$$Tc(\min)=1.4 \cdot 10^{-19} \text{ s (pour les matériaux conducteurs)}$$
$$Tc(\max)= 9.3 \cdot 10^6 \text{ s (pour les matériaux isolants).}$$

On constate ainsi que les matériaux isolants ont une constante de temps beaucoup plus grande que celle des conducteurs. D'où l'idée qu'en présence de deux sols ayant des propriétés électrogéologiques différentes, le plus foudroyé serait celui qui a une conductivité plus élevée. L'hypothèse de l'influence de l'hétérogénéité du sol sur la décharge de foudre a été clairement mise en évidence lors des récents travaux effectués à l'E.N.P.A, basés sur l'exploitation des résultats obtenus à l'aide d'un modèle mathématique, et d'un modèle expérimental que nous exposerons ci-dessous.

III.3. MODELE MATHEMATIQUE

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de MAXWELL, permettant la détermination de la répartition du champ électrique sur un sol plat et hétérogène. Le modèle du système terre-nuage est représenté à la (fig26).

- Le domaine choisi présente une symétrie cylindrique dont la base supérieure représente le nuage à un potentiel Vn, et la base inférieure le sol au potentiel zéro.

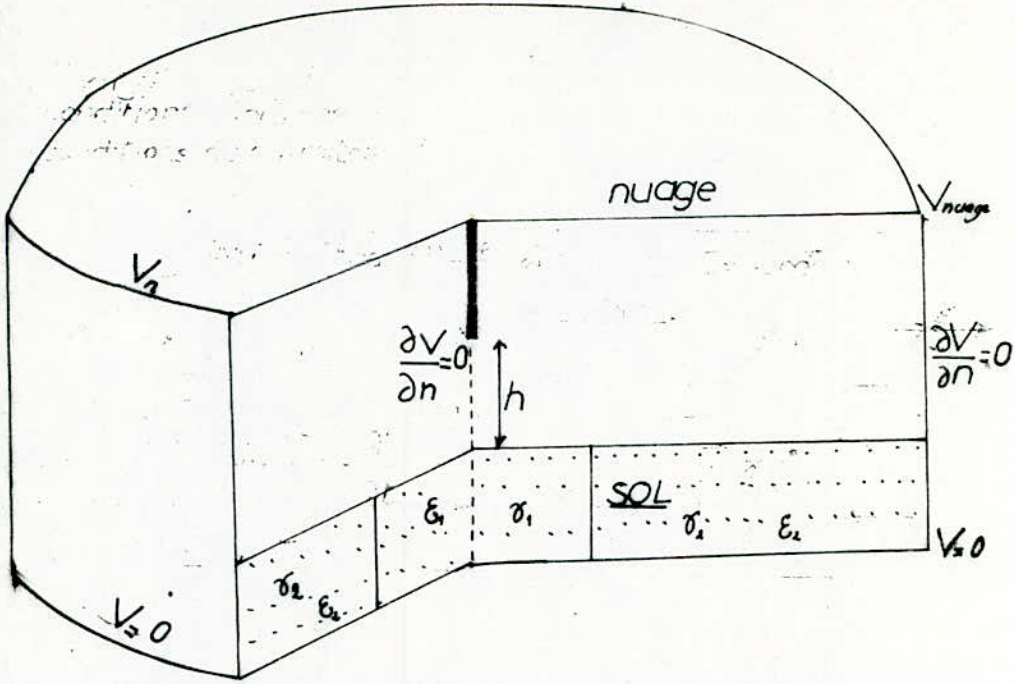
- Le sol hétérogène est composé de deux matériaux différents.

- La prédécharge de foudre est supposée se propager verticalement le long de l'axe du cylindre avec le même potentiel que celui du nuage.

- Le rayon du domaine est choisit grand devant la hauteur de la prédécharge h.

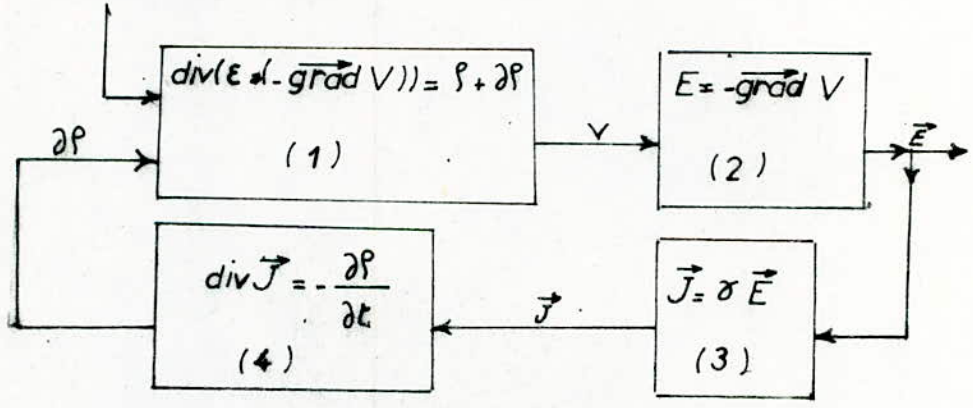
- Le système terre-nuage est assimilé à un condensateur plan de capacité C, et dont la charge est Q.

Les constantes de temps du matériau seraient choisies supérieures au temps du saut de la prédécharge qui est de 10^{-6} , pour pouvoir assimiler chaque état de la prédécharge à un état statique.



(fig 26)Système terre-nuage étudié dans le modèle mathématique [17].

$\sigma = C \frac{d\sigma}{dt}$ - $\epsilon = C \frac{d\epsilon}{dt}$
 conditions initiales : ρ
 conditions aux limites : V



(fig 27) Schéma-bloc des relations entre le potentiel, le champ électrique, la densité du courant et la variation de la densité des charges dans le sol. [17]

La méthode utilisée pour la résolution numérique est la méthode des éléments finis. Les étapes de ce calcul se résument dans le schéma de la (fig 27). Et se déroulent comme suit :

Pour une position donnée du traceur, à l'aide de l'équation de poisson on détermine la répartition du potentiel :

$$\text{div} (-\vec{\text{grad}} V) = \rho / \epsilon \quad (\text{éqn. 32}).$$

L'équation suivante nous permet de calculer l'intensité du champ : $\vec{E} = -\text{grad} V$ (eqn.33)

Ce champ va engendrer une densité de charge dans le matériau qui s'écrira en négligeant le courant de déplacement

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{eqn. 34}).$$

Le déplacement des charges va produire une variation de la densité de charge qui se traduit par :

$$\text{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{eqn. 35}).$$

Lors du saut suivant on refait les mêmes étapes de calcul, mais en prenant comme conditions initiales, les conditions calculées précédemment.

Les différents résultats obtenus avec cette simulation, pour trois cas examinés différent par leur rapport de conductivité sont :

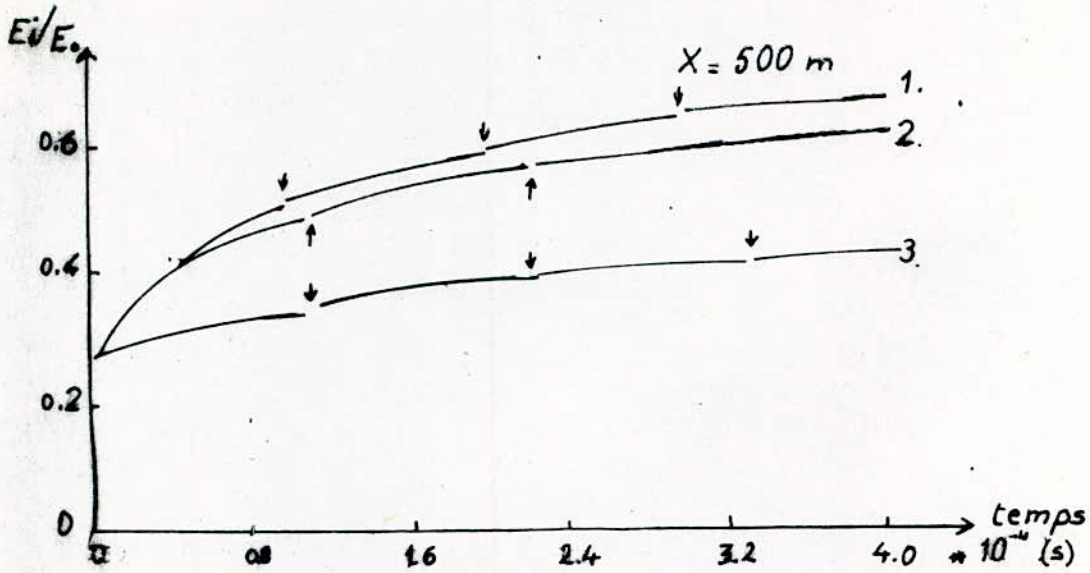
- l'intensité du champ électrique à la surface du sol augmente pendant le temps d'attente entre deux sauts successifs. Ce qui met en évidence la concentration des charges à la surface du sol.

L'augmentation du champ en fonction du temps de déplacement du traceur, comme le montre la (fig.28) dépend du rapport des conductivités des deux matériaux.

- Au niveau de l'interface entre deux matériaux différents le champ électrique possède une forte composante tangentielle.

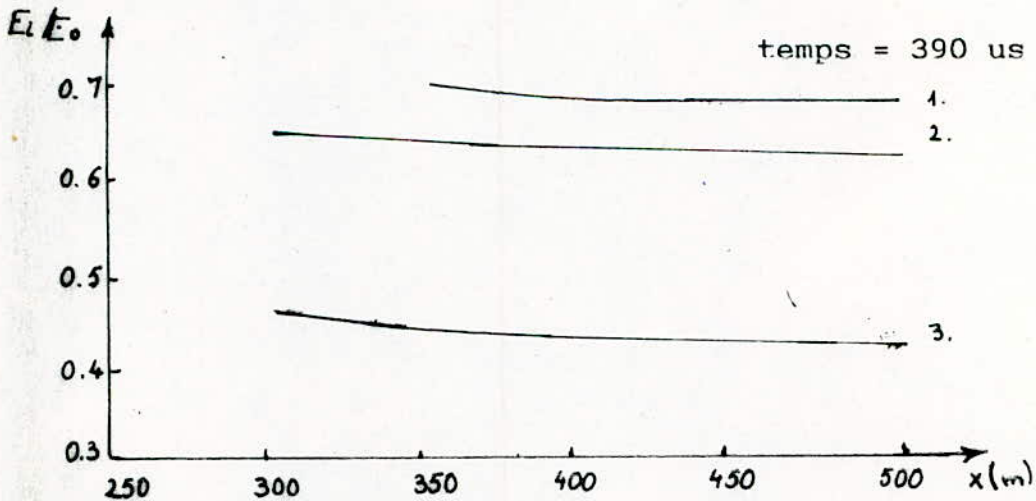
- Dans certaines conditions, le champ électrique est plus intense au niveau de l'interface que sous le traceur.

- L'intensité du champ à l'interface diminue lorsque la distance qui sépare l'axe de la décharge de l'interface augmente (fig. 29)



(fig 28) variation du champ à l'interface avec l'évolution de la prédécharge de foudre négative. [17]

$E_0 = 5 \text{KV/cm}$
 1-correspond à $\gamma_1/\gamma_2 = 10^{-3}$
 2-correspond à $\gamma_1/\gamma_2 = 10^{-6}$
 3-correspond à $\gamma_1/\gamma_2 = 10^{-5}$



(fig 29) variation du champ E_i en fonction de la position de l'interface.

$E_0 = 5 \text{KV/cm}$. [17]

IV. 4. MODELE EXPERIMENTAL

Le modèle expérimental utilisé dans les travaux précédents [17], est celui représenté à la fig (30) ; où h est la distance entre la tige et le sol, et x la position de la tige par rapport à l'interface.

L'hétérogénéité du sol sera caractérisée par le rapport des conductivités des deux matériaux utilisés. (sable et acier). Pour différentes hauteurs h de la tige et différentes distances x de l'interface à l'axe de la tige, il a été appliqué 50 chocs successifs qui ont permis de relever la distribution des points d'impact sur le sol.

A la suite de ces essais il a été établi que les fréquences de foudroiement de l'interface en fonction de la distance de l'axe de la tige à l'interface suit une loi normale. Et ce pour deux cas présentant une hétérogénéité différente :

- cas de sable sec (fig 34)
- cas de sable humide (fig 33)

D'après ces caractéristiques, la fréquence de foudroiement de l'interface diminue quand la pointe du traceur s'éloigne de l'interface.

Les deux cas de degré d'hétérogénéité étudiés montrent que la répartition de points d'impact varie avec la valeur du rapport de conductivité des constituants considérés.

Ces résultats montrent une attraction des décharges par l'interface alors qu'en sol homogène elles étaient réparties autour de l'axe de la tige suivant une loi normale comme le montre la (fig. 31)

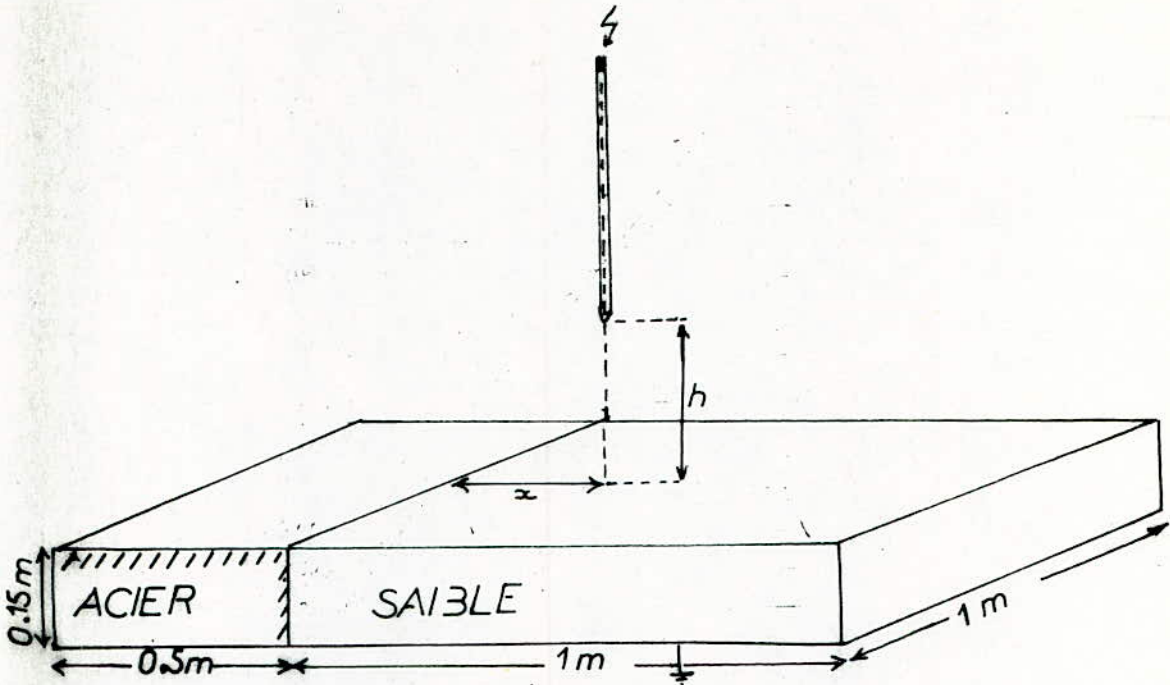
L'influence de l'interface se manifeste aussi par l'apparition d'un nouveau type de décharges qui n'existaient pas en sol homogène, dites décharges complexes. Ce sont des décharges qui frappent le sable puis glissent vers l'interface.

III. 5. CONCLUSION

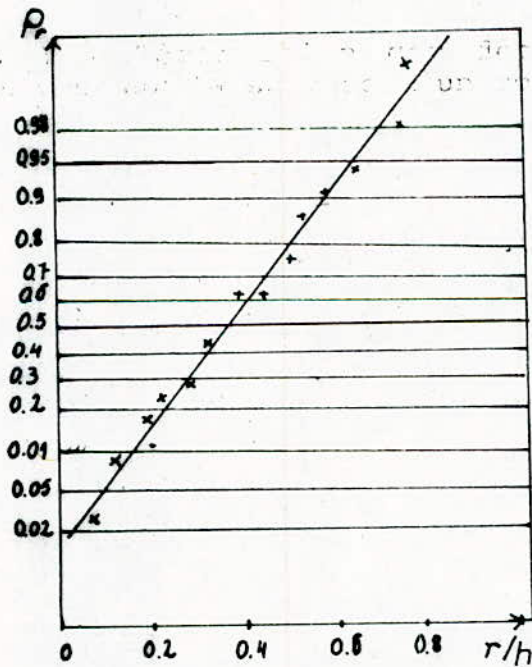
Les deux modèles précédents, expérimental et mathématique, ont montré l'influence de l'hétérogénéité du sol sur l'impact probable de la décharge de foudre.

Dans les deux modèles on a constaté que l'influence de la conductivité du sol était un facteur déterminant de cette distribution des points d'impact.

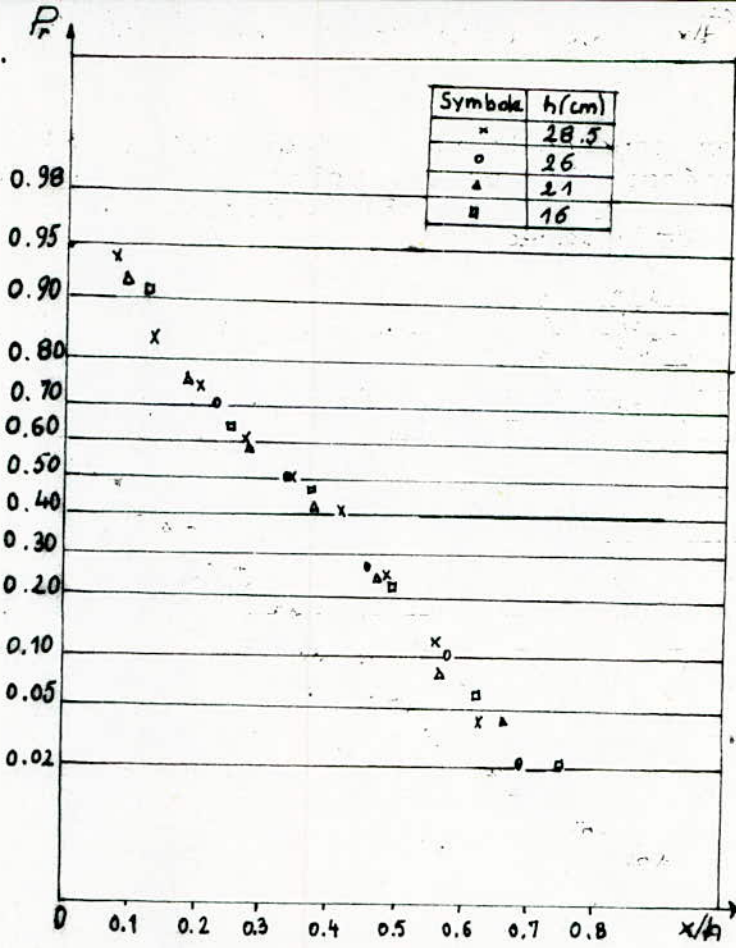
Le modèle mathématique explique la concentration des coups de foudre au niveau de l'interface par la grande intensité du champ qui y régnait.



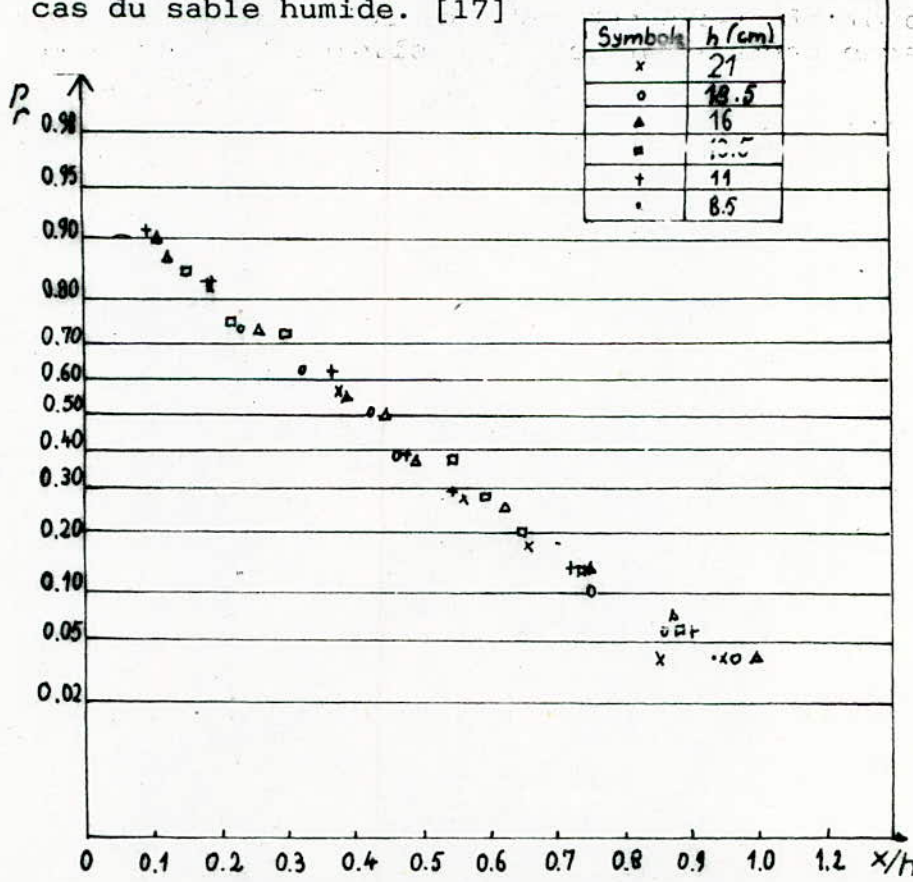
(fig 30) Schéma du modèle expérimental [17]



(fig 31) Répartition des décharges de foudre négatives sur la surface d'un sol homogène [17]



(fig 33) Distribution des décharges de foudres négatives à l'interface du sol hétérogène dans le cas du sable humide. [17]



(fig 34) Distribution des décharges de foudres négatives à l'interface du sol hétérogène dans le cas du sable sec. [17]

le rôle de l'interface est aussi mis en évidence par les résultats du modèle expérimental. Pour compléter cette étude il serait intéressant de voir comment varie la zone d'attraction d'un conducteur horizontal situé sur un sol hétérogène. Ceci va être l'objet de notre étude au chapitre suivant.

IV - 1 - INTRODUCTION

D'après le chapitre précédent, il a été constaté que les propriétés électrogéologiques du sol influent considérablement sur la distribution des points d'impact d'un coup de foudre au sol. Le but de notre travail est de voir quelle serait leur influence sur les zones d'attraction d'un conducteur horizontal.

Les différents essais ont été effectués au laboratoire de haute tension de l'E.N.P où les ondes de foudre ont été simulées par des impulsions négatives de 1.2/50µs délivrées par un générateur de choc de type MARX à huit étages, dont la tension nominale est de 600 Kv, et l'énergie de 4 Kj. (Fig 35.)

Les périodes T1 et T2 de l'onde de choc représentée à la (Fig 36) sont données en fonction des éléments constituant le générateur par :

$$T1 = 2.7 \quad R_s.C1.C2/(C1+C2) \quad . \quad (eq \ 36)$$

$$T2 = 0.7 \quad (R_s+R_p) \ C1 \quad (eq \ 37)$$

Cette onde de choc diffère de l'onde de foudre réelle, mais elle constitue néanmoins la meilleure approche qu'on peut obtenir au laboratoire conformément aux recommandations de la CEI-60.

IV - 2 - ESSAIS EFFECTUES

Nous avons déterminé les zones d'attraction pour quatre types de sols différents. le premier est un sol conducteur (acier); le second est le sable sec, le troisième est du sable humide. Le dernier cas est un sol hétérogène constitué de sable sec et d'acier.

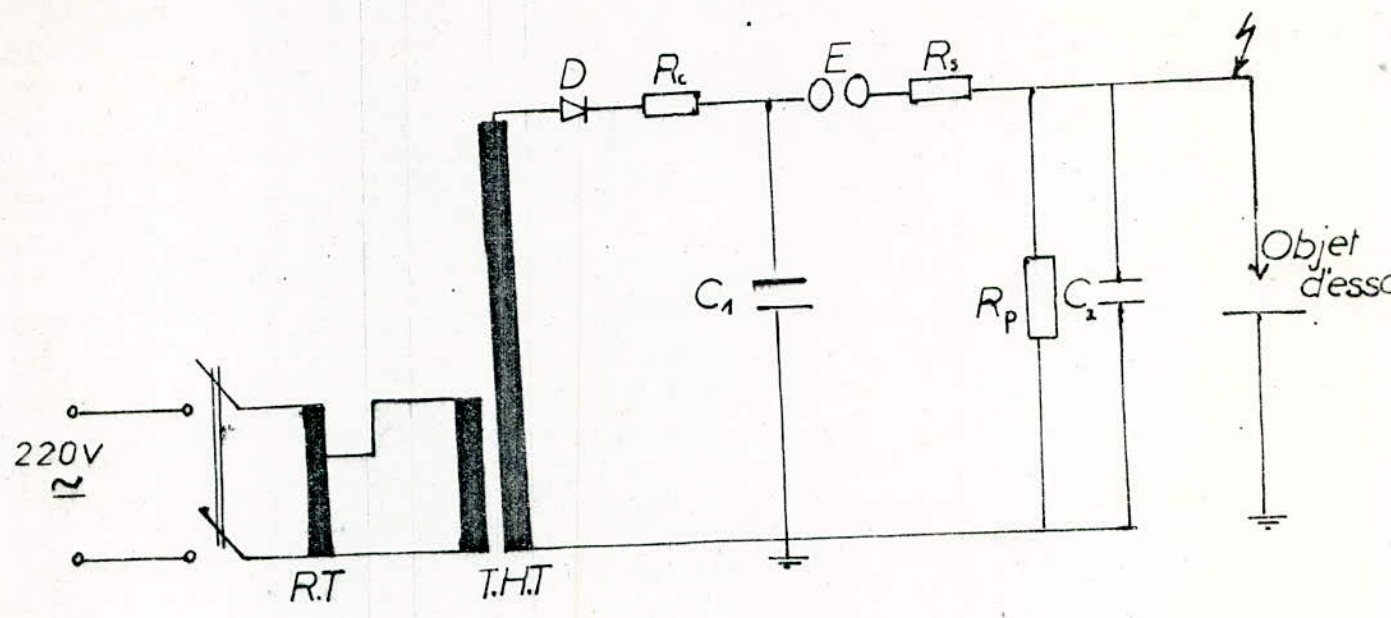
VI -2- 1. ZONE D'ATTRACTION SUR SOL CONDUCTEUR

Le but de cet essai est de vérifier que la zone d'attraction d'un conducteur horizontal situé au dessus d'un sol parfaitement conducteur est, conformément au modèle électro géométrique, l'ensemble des points à égale distance du conducteur et de la terre et dont le lieu géométrique est la parabole d'équation:

$$hc^2 - 2 * h * hc + d^2 = 0 \quad (eqn. \ 38)$$

CHAPITRE IV

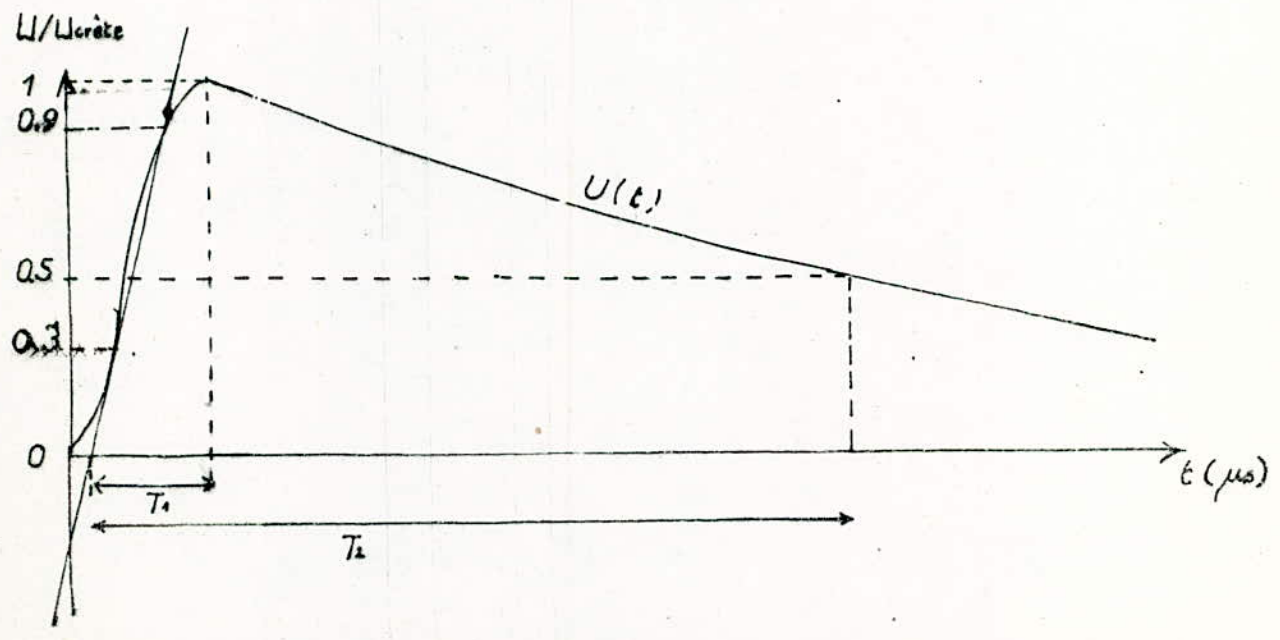
**ZONES D'ATTRACTIONS D'UN CONDUCTEUR HORIZONTAL
SUR SOL HETEROGENE**



R_r : régulateur de tension
 T.H.T. : Transformateur haute tension
 D : redresseur
 R_c : résistance de charge
 R_s : résistance série = $((8 \cdot 10) + 150) \Omega$

R_p : Résistance parallèle = $8 \cdot 430 \Omega$
 C_1 : Condensateur de charge = 2 nF
 C_2 : Condensateur de choc = 22.5 nF
 E : Eclateur à sphères

(Fig 35) Schéma simplifié du générateur de choc [20].



(Fig 36) Courbe représentative de l'onde de foudre

- hc : distance du conducteur au sol .
- h : distance de la pointe du traceur au sol .
- d : distance entre l'axe du traceur et le conducteur.

Si on pose : $X = \frac{d}{hc}$ et $y = \frac{h}{hc}$.

L'équation (38) devient :

$$X^2 - 2y + 1 = 0 \quad (\text{eq 39})$$

Le modèle expérimental utilisé comprend une plaque métallique comme sol conducteur, ayant 1m de largeur et 1,50m de longueur, et une épaisseur de 2mm . Cette plaque est mise au potentiel de la terre . L'électrode verticale simulant le traceur de foudre (juste avant le saut final) a un diamètre de 6mm présentant une extrémité hémisphérique .(fig 38)

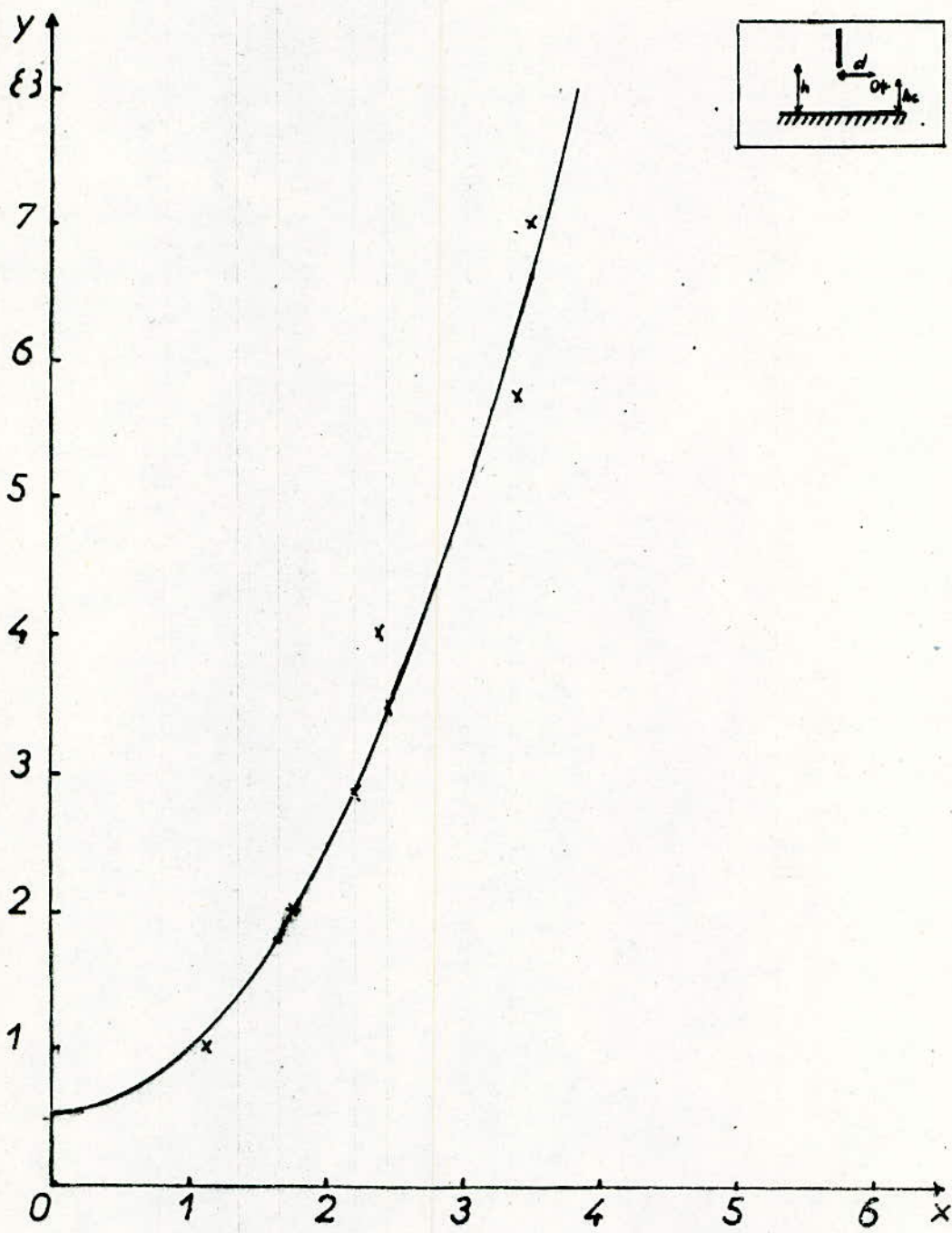
IV.2.1.1 METHODE DE TRAVAIL

La zone d'attraction correspond expérimentalement à l'ensemble des configurations (h,hc,d) pour lesquelles la probabilité d'impact du conducteur est supérieure à 90% .

Pour calculer les fréquences de foudroiment du conducteur f_c , nous effectuons 50 chocs successifs avec un intervalle de temps de 40s , chaque niveau de tension appliqué doit entraîner la disruption.

f_c sera le rapport du nombre de chocs ayant touché le conducteur sur le nombre total de chocs effectués . Pour une hauteur du conducteur h_c donnée , et une hauteur de la tige h , nous déplacerons la tige par rapport au conducteur jusqu'à obtenir la distance d pour laquelle la probabilité de décharge sur le conducteur est de 90% .

Si l'on obtient pour deux positions (h_c, h, d ,) des probabilités f_c différentes de 90%, nous déterminerons le point cherché à l'aide de la droite de régression . En effet, il a été montré lors d'une étude précédente, [18], que la variation des fréquences de foudroiment du conducteur en fonction de la distance d , suivait une loi normale. Lors de nos essais, nous avons choisi deux hauteurs h_c du conducteur et trois hauteurs h de la tige . La tension appliquée à la tige avait une amplitude suffisante pour engendrer une décharge disruptive à 100% des cas ($U_{100\%}$). (tableau 1)



(Fig 37) Zone d'attraction d'un conducteur horizontal au
DESSUS d'un sol conducteur

h_c (cm)	$h_c = 2$ cm			$h_c = 4$ cm		
h_2 (cm)	8	11.5	14	8	11.5	14
$L_{100\%}$ (kV)	188	257	274	188	257	274

(Tableau 1). Niveaux de tension appliqués dans le cas du sol conducteur.

Pendant le déroulement des essais, les conditions atmosphériques variaient dans les proportions suivantes:

Pression: $P_{max}=76,5$ mm Hg ; $P_{min}=76,4$ mm Hg .
 Temperature: $t_{max}=16^{\circ}C$; $t_{min}=13^{\circ}C$.
 Humidité relative: $h_{max}=76\%$; $h_{min}=70\%$.

Ces données nous ont permis de corriger la valeur de la tension disruptive selon les variations climatiques.

IV. 2.1.2 Types de décharges obtenues

Les différentes décharges que nous avons observées lors de cet essai sont :

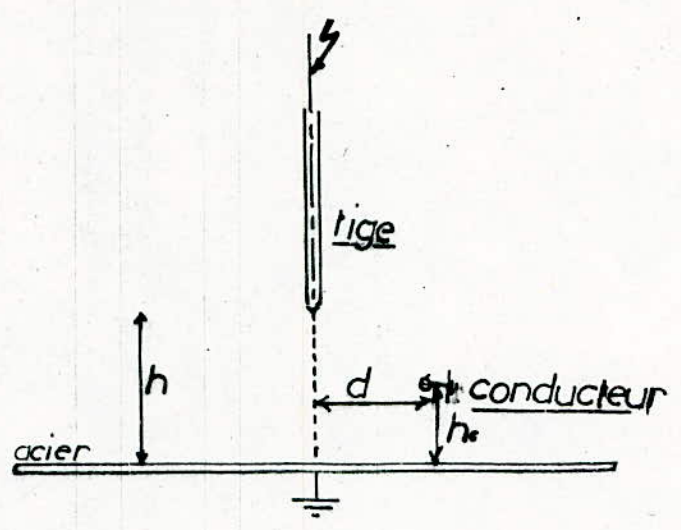
- décharge sur le conducteur (fig. 39 b)
- décharge sur l'acier (fig. 39 a)
- décharge ramifiées touchant à la fois le conducteur et l'acier (fig. 39. c)

IV. 2.1.3 Résultats obtenus

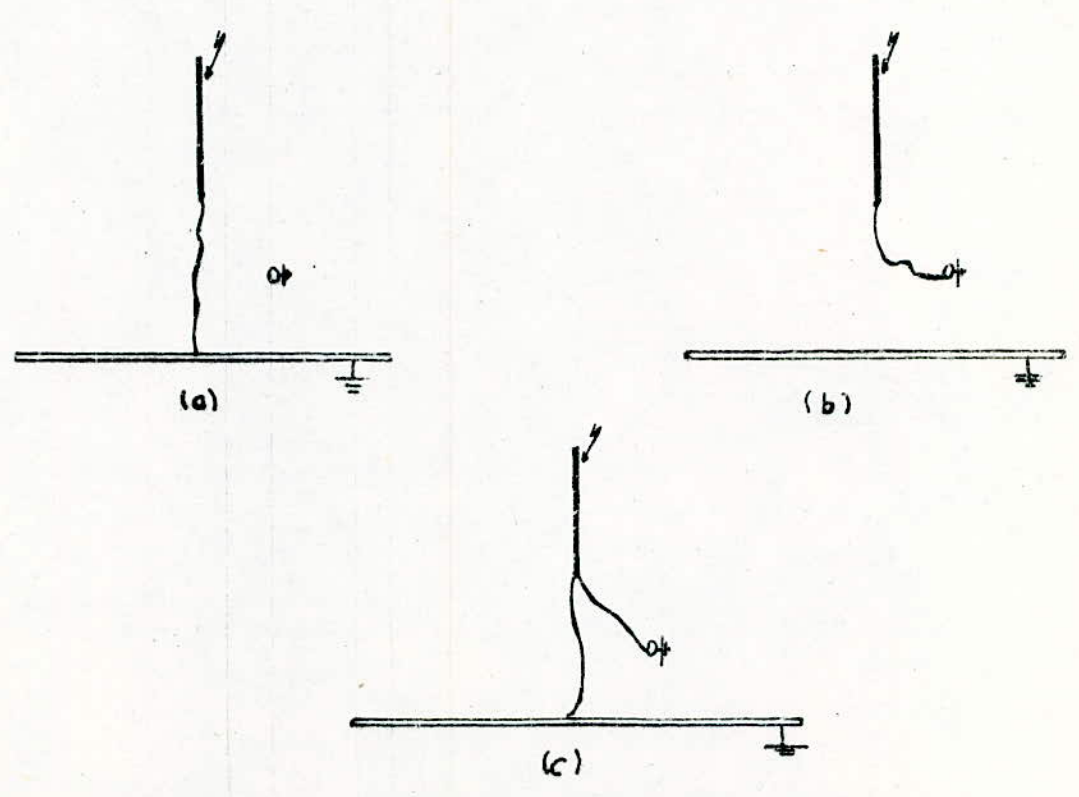
$Y = \frac{h}{h_c}$	1	2	2.875	3.5	4	5.75	7
$X = \frac{d}{h_c}$	1.13	1.15	2.25	2.5	2.4	3.4	3.5

(tableau2) zone d'attraction dans le cas du sol conducteur.

Les points obtenus expérimentalement sont représentés à la fig. 37 (points en croix), en même temps que la parabole du modèle électrogéométrique, Nous constatons qu'aux erreurs de mesure près,



(Fig 38) Modèle expérimental dans le cas d'un sol conducteur



(Fig 39) Différents types de décharges obtenues dans le cas d'un sol conducteur

Les points obtenus sont confondus avec la courbe théorique.
Le modèle électrogéométrique est donc parfaitement vérifié sur sol conducteur.

IV. 2.2 ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL SUR SOL FAIBLEMENT CONDUCTEUR

A partir de cet essai, nous étudierons l'influence de la nature du sol sur les zones d'attraction d'un conducteur horizontal.

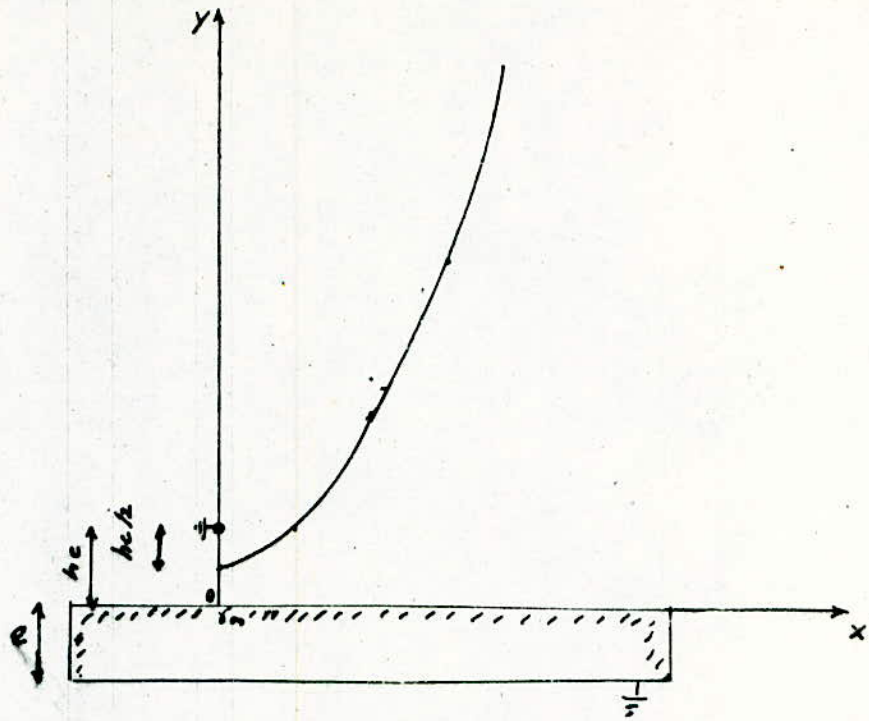
Le paramètre essentiel qui caractérisera la nature du sol sera sa conductivité .

Si nous considérons un sol de conductivité et d'épaisseur e , relié au potentiel zéro, au-dessus duquel se trouve un conducteur de hauteur h_c ; deux cas sont à envisager.

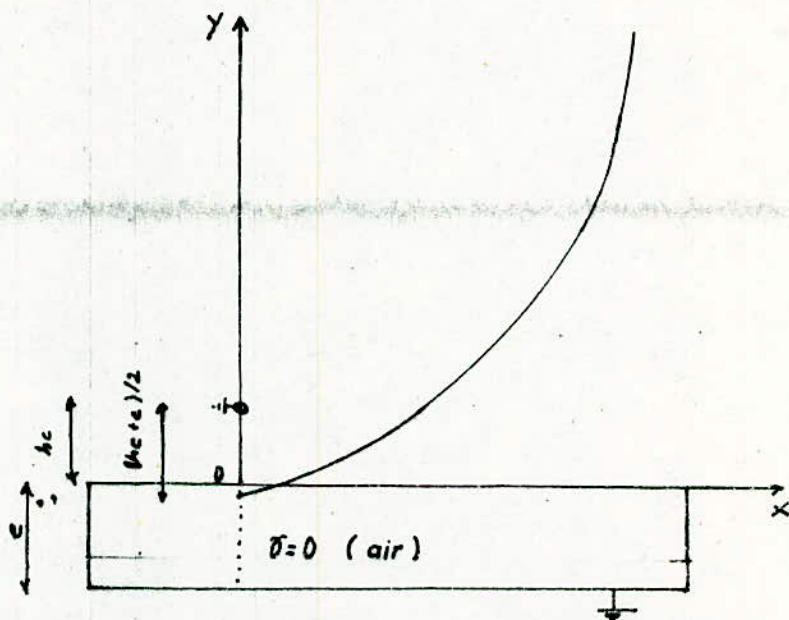
Si le matériau a une conductivité infinie (cas de l'acier), la zone d'attraction du paratonnerre horizontal situé au-dessus de ce sol, serait celle définie par le modèle électrogéométrique (sol parfaitement conducteur) (fig. 40)

Si par contre le matériau est de conductivité nulle (matériau parfaitement isolant) la zone d'attraction dépendra de la nature du matériau et de son épaisseur.

Dans le cas où le matériau n'est pas parfaitement isolant, nous pouvons considérer que la zone d'attraction serait comprise entre celles des configurations du sol parfaitement conducteur pour lesquelles la hauteur du conducteur est égale à (h_c) et $(h_c + e)$. La position $(h_c + e)$ du conducteur correspond au cas où le matériau est l'air. (fig. 41)



(Fig 40) Zone d'attraction d'un conducteur horizontal dans le cas d'un sol de conductivité infinie.



(Fig 41) Zone d'attraction d'un conducteur au dessus d'un sol de conductivité nulle.

Cette zone est limitée alors par l'équation :

$$(hc + e)^2 - 2 (hc+e) * (h+e) + d^2 = 0 \text{ (éqn. 40)}$$

Nous pensons donc que pour tout matériau de conductivité comprise entre celle de l'air et celle de l'acier, la zone d'attraction d'un conducteur situé au-dessus de ce matériau relié au potentiel zéro, serait comprise entre les deux paraboles décrites précédemment,
Son équation serait de la forme :

$$(hc + e')^2 - 2 (hc + e') * (h+e') + d^2 = 0 \text{ (eqn. 41)}$$

avec $0 < e' < e$

Donc d'après cette équation, la zone d'attraction d'un conducteur horizontal situé au-dessus d'un matériau de conductivité σ est équivalente à celle du modèle électrogéométrique sur sol conducteur, mais en mesurant la hauteur hc du conducteur au sol, non plus à partir de la surface du sol, mais à un niveau plus bas appelé "niveau de terre fictive", situé à une distance e' au-dessous de la surface du sol.

Donc la zone d'attraction pour un matériau de conductivité donnée serait le lieu géométrique de l'ensemble des points de la pointe du traceur équidistants du conducteur et de cette terre fictive

Le lieu géométrique de ces points est une parabole dont l'équation s'écrit en posant :

$$x = \frac{d}{hc} \quad \text{et} \quad y = \frac{h}{hc}$$

$$(1 - 2y + x^2) - \frac{e'}{hc} (2y + \frac{e'}{hc}) = 0 \quad \text{(eqn.42)}$$

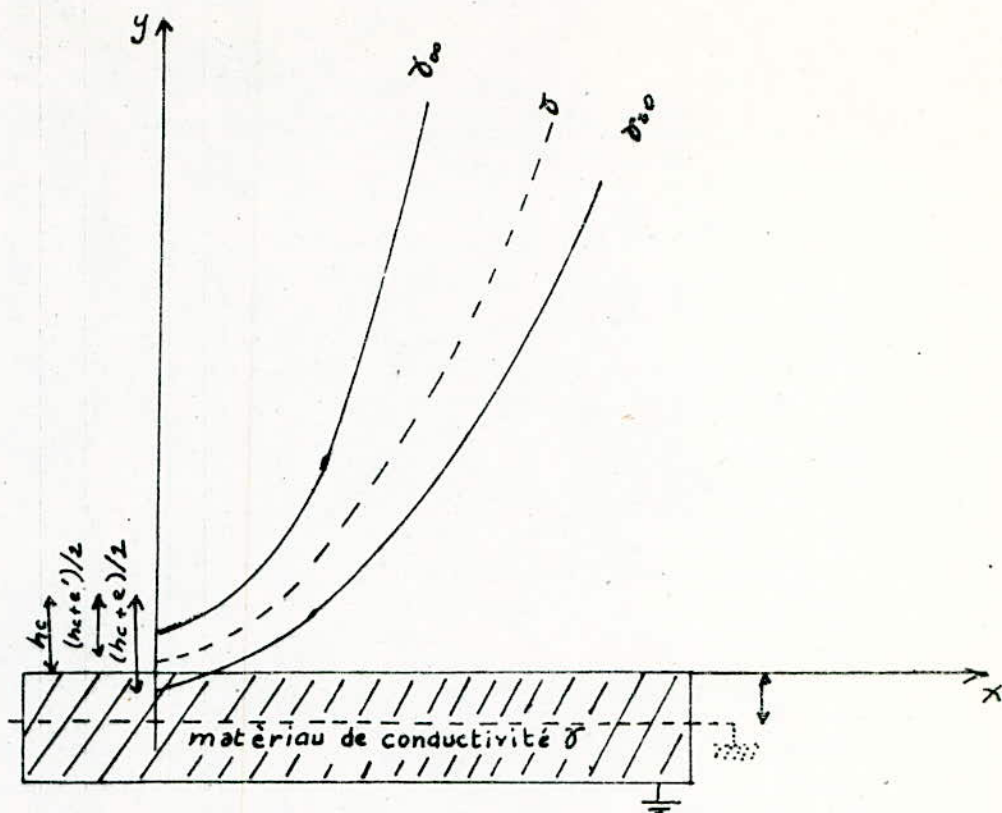
Nous constatons que les zones d'attraction dépendent de la hauteur hc du conducteur au sol.

Pour vérifier la validité de cette idée, nous effectuerons des essais sur le modèle expérimental représenté à la (fig. 43)

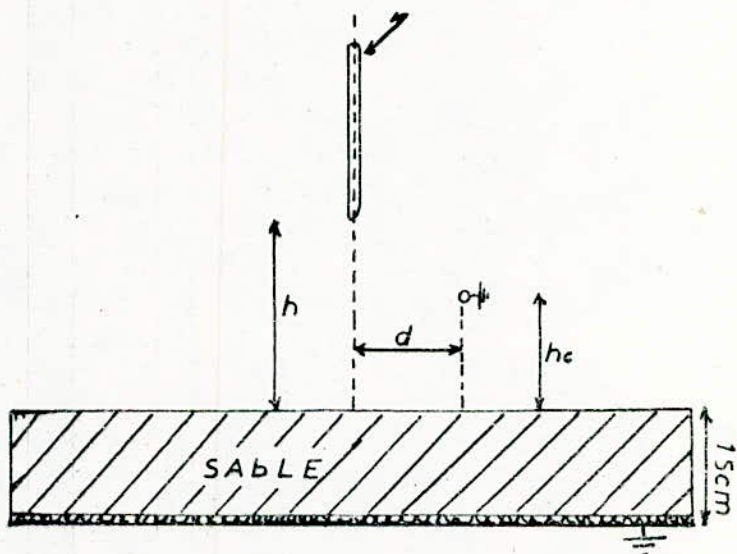
Pour mettre en évidence l'influence de la conductivité, nous avons utilisé deux matériaux de conductivités différentes :

- Le premier matériaux est le sable sec de conductivité $\sigma = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ S/m}$.

- Le second matériau est le sable humide dont la conductivité est comprise entre contenu dans une caisse en bois ; de surface carrée de $(1 \times 1) \text{ m}^2$ et d'épaisseur $e = 15 \text{ cm}$; Le sable sera disposé sur un grillage métallique relié à la terre.



(Fig 42) Zone d'attraction d'un conducteur horizontal situé au-dessus d'un sol de conductivité σ .



(Fig 43) Modèle expérimental utilisé dans le cas du sol de conductivité relativement faible (sable).

IV. 2.2.1 Méthode de travail

Comme pour le premier essai, nous nous intéresserons à la fréquence $f_c = 90 \%$ de foudroiement du conducteur.

Pour chaque position (h_c, h) du conducteur et de la pointe de la tige, nous varierons d jusqu'à obtenir le point désiré.

Ce point appartiendra à la zone d'attraction du conducteur.

Durant ces essais, les conditions atmosphériques variaient dans les intervalles suivants :

a) cas du sable sec :

pression : $P_{\max} = 76.5 \text{ mm Hg}$; $P_{\min} = 75.5 \text{ mm Hg}$

température : $t_{\max} = 17.5 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\min} = 13.5 \text{ }^\circ\text{C}$

humidité relative : $h_{\max} = 86 \%$; $h_{\min} = 79 \%$

b) cas du sable humide

pression : $p = 76.2 \text{ mm Hg}$

température : $t_{\min} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\max} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$

humidité relative : $h_{\min} = 55 \%$; $h_{\max} = 58 \%$

II. 2.2.2 Types de décharges obtenues

Dans ce cas les décharges observées sont :

- Décharges sur le sable : (fig 44 a)
- Décharges sur le conducteur : (fig 44 b)
- Décharges ramifiées sur le sable et sur le conducteur (fig.44 c) Celles-ci ont été observées uniquement dans le cas de sable sec.
- Décharges complexes : La décharge entre dans le sable et ressort pour atteindre le conducteur (fig. 44 d)

IV. 2.2.3 Résultats d'essais

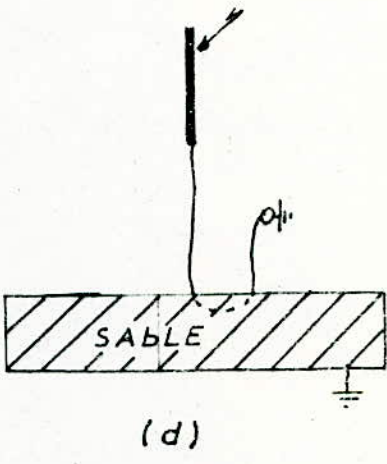
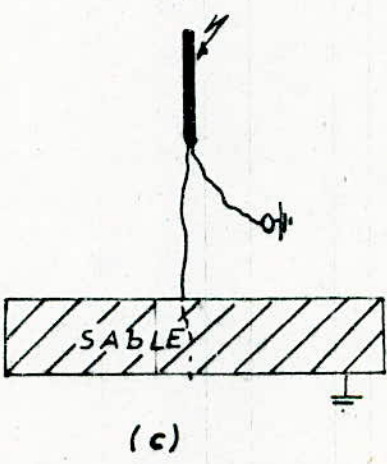
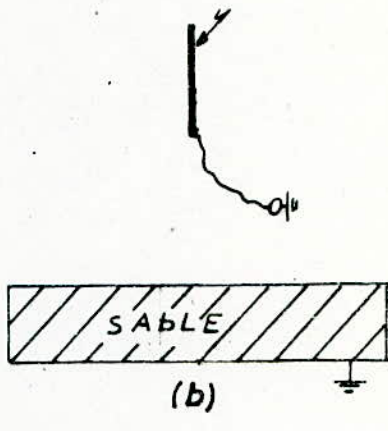
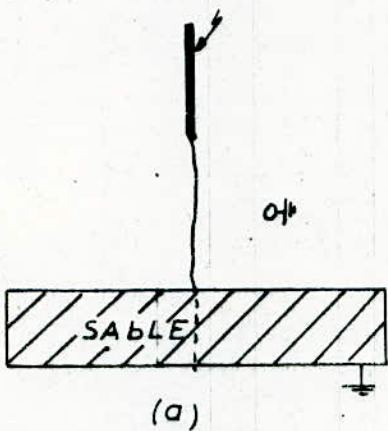
Les points à fréquence de décharge $f_c = 90 \%$ figurent dans les tableaux suivants.

- Cas du sable sec

$h_c = 2\text{cm}$

y	4	6	7
x	4.3	5.32	5.55

(a)



(Fig 44) Différents types de décharges obtenues dans le cas du sable.

hc = 4 cm

y	2	3	3.5
x	2.51	3.17	3.31

Tableau 3 : zones d'attractions dans le cas du sable sec.

- Cas du sable humide : ici les essais ont été effectués pour une seule hauteur du conducteur

hc = 2 cm

y	2	4	6	8	10
x	2.5	3.6	4.3	5.3	5.75

Tableau 4 : Zone d'attraction dans le cas du sable humide

IV. 2.2.4 Interpretation des résultats

Pour tracer les paraboles dont les équations ont été déterminées précédemment (eqn.42), il est nécessaire de connaître le paramètre e'/hc , qui dépend de la hauteur du conducteur au sol, et du "niveau de terre fictive". Cette terre fictive sera à une distance e' du sol constante, pour un même matériaux présentant une conductivité

Soit M (x.y) une position de la pointe de la tige, donnant une fréquence $f_c = 90 \%$, de foudroiement sur le conducteur.

Ce point appartient à la parabole délimitant la zone d'attraction.

Ces coordonnées vérifient l'équation :

$$(1 - 2y + x^2) - \frac{e'}{hc} (2y + \frac{e'}{hc}) = 0 \quad (\text{eqn. 43})$$

On a une équation du second degré où l'inconnue est e' :

$$(e')^2 + 2y hc e' - hc^2 (1 - 2y + x^2) = 0 \quad (\text{eqn. 44})$$

La résolution de cette équation donne en retenant uniquement la solution positive :

$$e' = hc (\sqrt{y - 2y + x^2 + 1} - y) \quad (\text{eqn. 45})$$

Les différentes valeurs obtenues de e' sont consignées dans le tableau ci-dessous pour les deux types de sables.

y	2	3	3.5	4	6	7
x	2.51	3.11	3.3	4.3	5.32	5.55
e'	2.81	2.86	2.56	2.48	2.6	2.

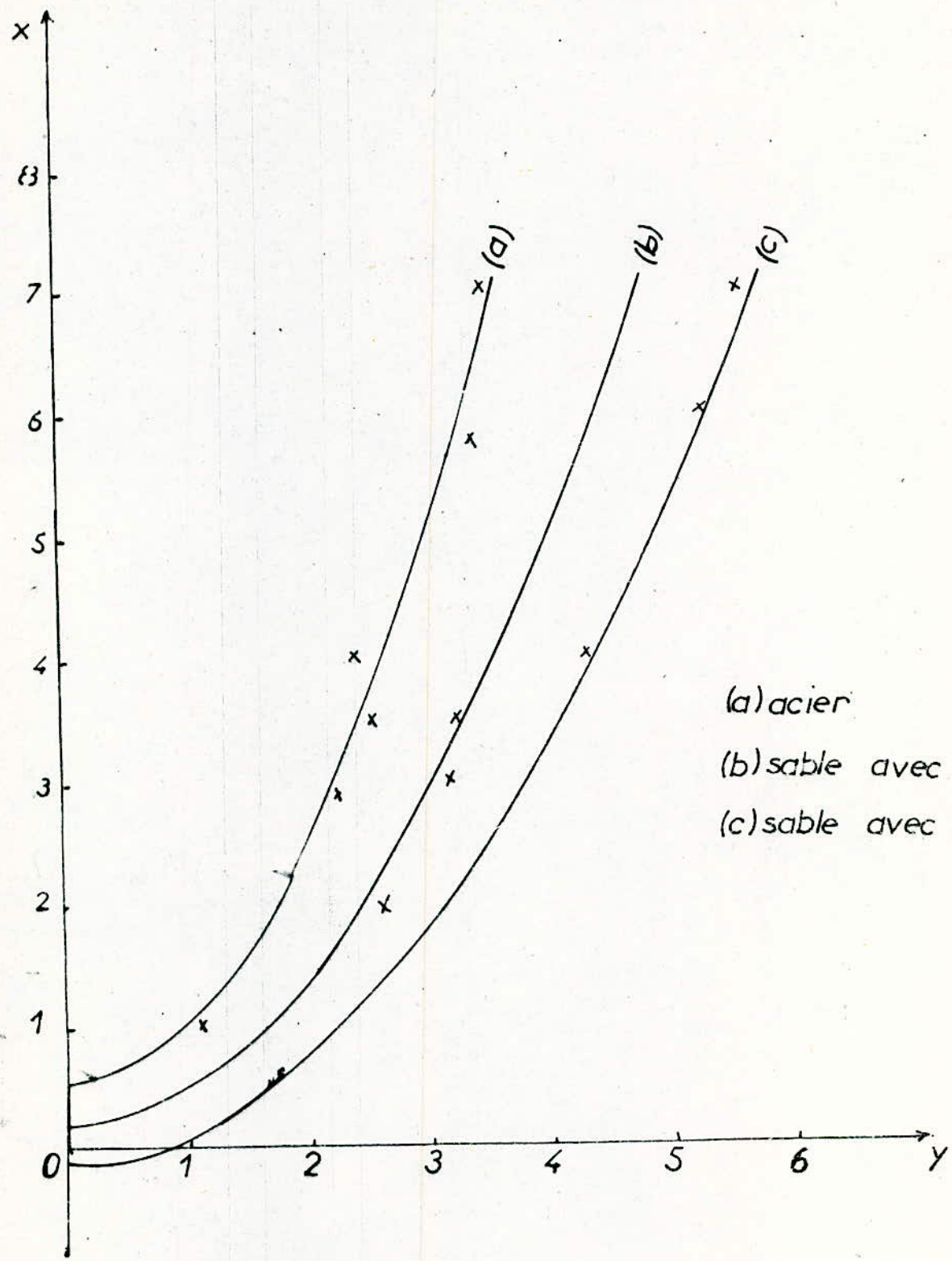
(a) $e'_{\text{moy}} = 2.6 \text{ cm}$

y	2	4	6	8	10
x	2.5	3.6	4.3	5.3	5.75
e'	1.38	1.37	1.18	1.56	1.36

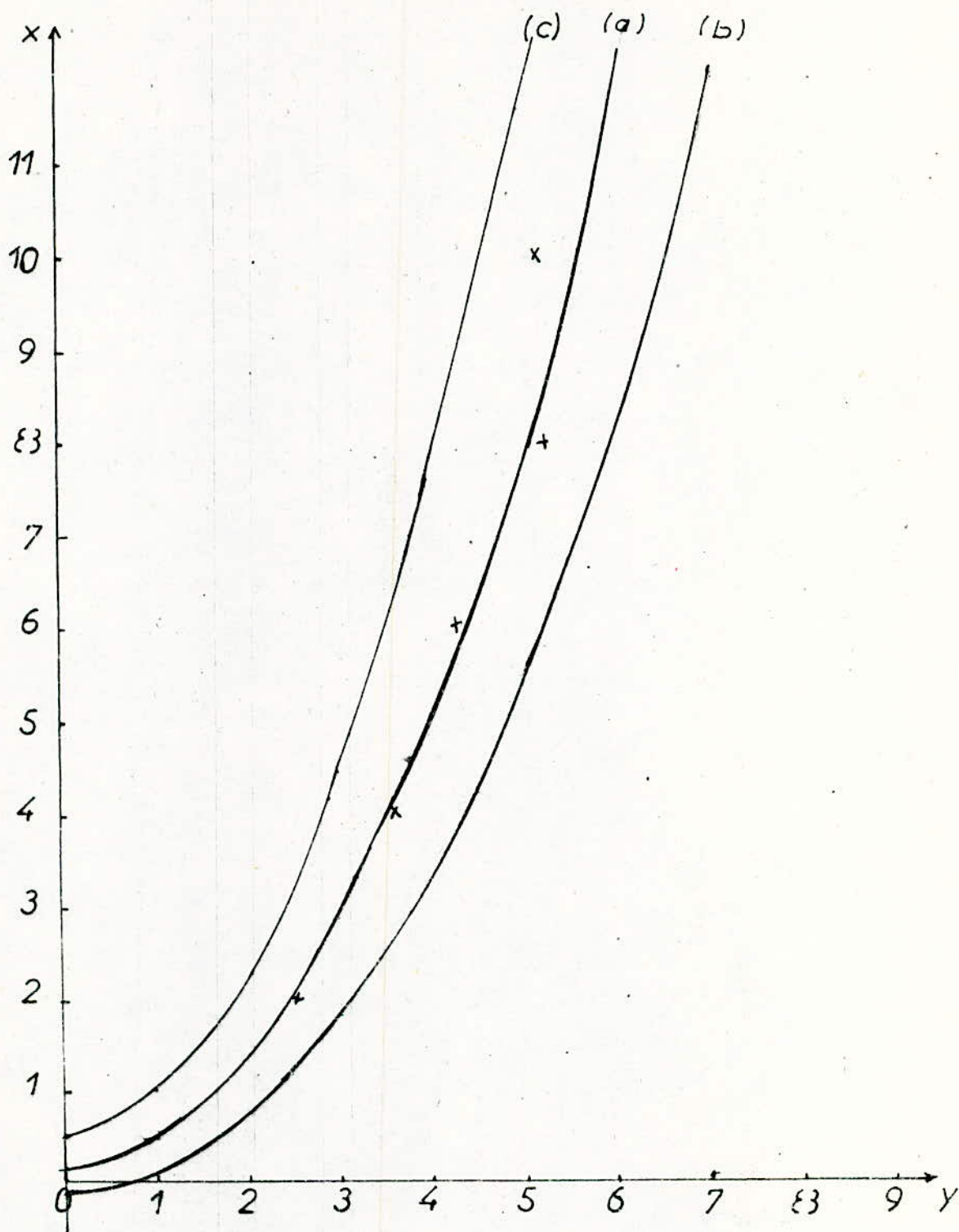
(b) $e'_{\text{moy}} = 1.37 \text{ cm}$

Tableau 5 : niveau de terre fictive

- cas du sable sec
- cas du sable humide



(Fig 45) Zones d'attraction d'un paratonnerre
situé au dessus d'un sol faiblement conducteur.



(Fig 46) Zone d'attraction d'un conducteur horizontal dans le cas du sable humide
 (a) sable humide : $h_c = 2\text{ cm}$
 (b) sable sec : $h_c = 2\text{ cm}$
 (c) acier

Nous constatons que les valeurs de e' sont pratiquement constantes et que les légères dispersions autour de la valeur moyenne sont dues aux erreurs d'incertitudes sur les mesures des distances h , h_c et d .

Pour chaque hauteur h_c du conducteur et pour chaque matériau considéré correspondra une zone d'attraction délimitée par les paraboles d'équation :

Sable sec :

$$h_c = 2 \text{ cm} \quad y = \frac{x^2}{4.6} - 0.15 \quad (\text{eqn. 46}) \quad (\text{fig. 45 c})$$

$$h_c = 4 \text{ cm} : \quad h = \frac{x^2}{3.3} - 0.175 \quad (\text{eqn. 47}) \quad (\text{fig. 45 b})$$

Sable humide :

$$h_c = 2 \text{ cm} \quad y = \frac{x^2}{3.37} + 0.157 \quad (\text{eqn. 48}) \quad (\text{fig. 46 a})$$

D'après les résultats obtenus nous pouvons dire que :

- Le "niveau de terre fictive" du sable sec est situé plus bas par rapport à la surface du sol, que celui du sable humide.

Ce qui confirme l'hypothèse que e' tendrait vers zéro pour un sol parfaitement conducteur.

- Pour une hauteur donnée h_c du conducteur, la zone d'attraction est d'autant plus large que la conductivité du matériau est plus faible.

Pour un matériau de conductivité donnée, la zone d'attraction est plus large pour $h_c = 2 \text{ cm}$ que pour $h_c = 4 \text{ cm}$.

Ainsi pour les petits rapport e'/h_c , la zone d'attraction tend à se rapprocher de celle sur acier.

Nous constatons pour une hauteur donnée du conducteur, que pour les courants de foudre intenses (h/h_c) grand, l'écart entre la zone d'attraction sur sable et celle sur acier est plus important que pour les faibles courants (h/h_c petit)

IV. 2.3 3e Essai : Variation des zones d'attraction en présence d'une interface séparant deux matériaux de conductivités différentes

Après avoir étudié les variations de la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal au-dessus d'un sol homogène, il serait intéressant de compléter cette étude en disposant maintenant le conducteur au-dessus d'un sol constitué de deux matériaux différents.

Cet essai sera une approche pour déterminer les zones de protection lorsqu'un coup de foudre tombe sur un sol présentant une discontinuité électrogéologique, notamment à la séparation d'une terre bonne conductrice et d'une terre mauvaise conductrice.

Le modèle expérimental que nous avons utilisé est constitué d'une caisse en bois de dimension $(1.0 \times 1.50 \times 0.15) \text{ m}^3$, remplie de deux matériaux différents.

Le premier matériau étant de sable sec, utilisé dans le cas précédent et qui occupe une surface de $(1 \times 1) \text{ m}^2$.

Le second matériau sera l'acier recouvrant la surface restante de la caisse.

Le degré d'hétérogénéité de ce système sera caractérisé par le rapport ϵ_1/ϵ_2 des deux matériaux

Ces deux matériaux seront au même niveau de surface ; un grillage relié au potentiel de la terre et disposé au fond de la caisse.

iv. 2.3.1 Méthode de travail

Suivant la position du conducteur et de la tige par rapport à l'interface, nous distinguerons 4 configurations différentes :

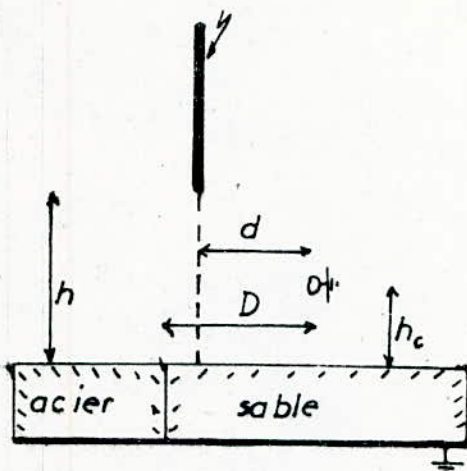
- conducteur au-dessus de l'acier et la tige entre le conducteur et l'interface (fig.48 d)
- conducteur au-dessus du sable et compris entre la tige et l'interface (fig. 48 a)
- conducteur au-dessus de l'acier et compris entre la tige et l'interface (fig.48 c)
- conducteur au-dessus du sable et la tige entre le conducteur et l'interface (fig.48 b)

La position du conducteur sera repérée par sa distance D entre son axe et l'interface (fig 47)

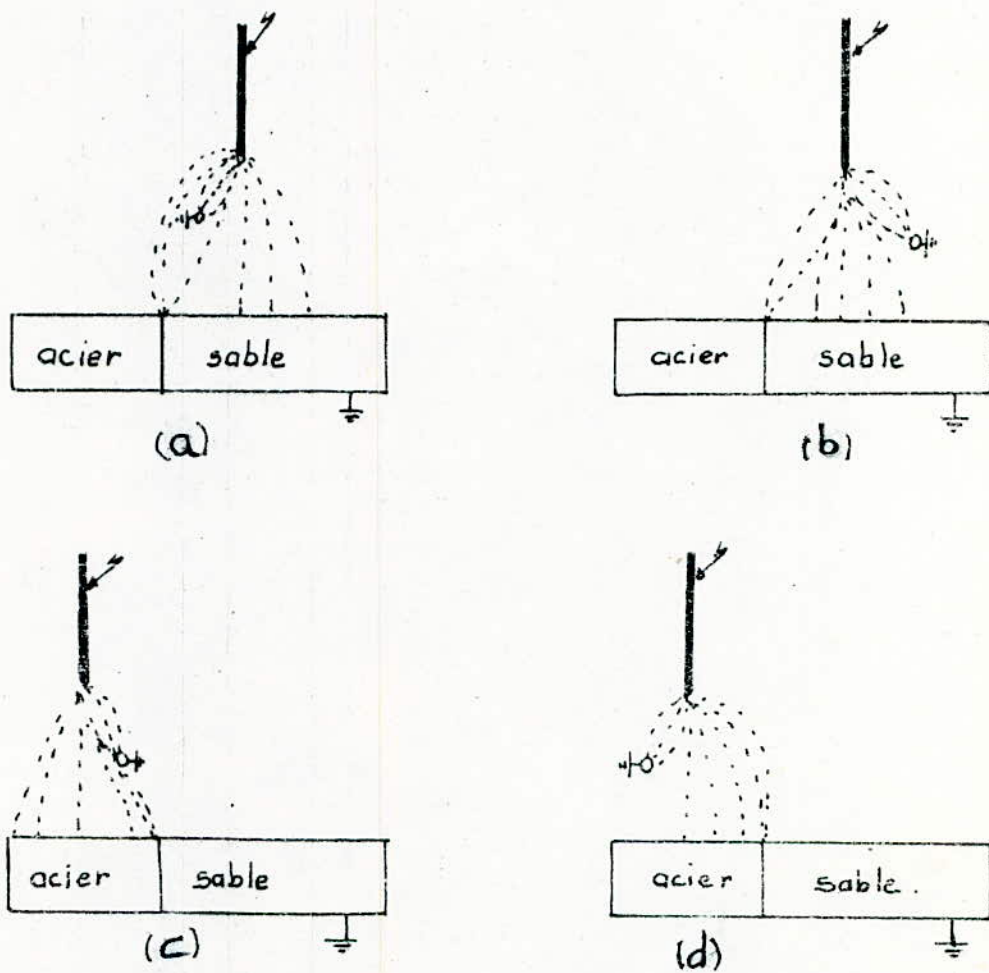
Pour chacune des configurations citées précédemment, nous avons déterminé les zones d'attraction correspondantes pour différentes valeurs de D/hc .

Pour pouvoir étendre les résultats obtenus par ce modèle expérimental aux grandeurs réelles, il est préférable d'utiliser des grandeurs relatives à une grandeur donnée, que nous choisirons comme étant la hauteur hc du conducteur au sol, on posera :

$$x = \frac{d}{hc} \quad \text{et} \quad y = \frac{h}{hc}$$



(Fig 47) Modèle expérimental de l'essai sur sol hétérogène



(Fig 48) Différentes configurations du modèle expérimental utilisé dans le cas de sol hétérogène.

Lors de nos essais, nous avons utilisé 2 hauteurs de conducteur :

$h_c = 2 \text{ cm}$ et $h_c = 4 \text{ cm}$

Pour chaque hauteur h_c , nous avons pris trois hauteur h de la pointe de la tige au sol : $h = 8 \text{ cm}$; $h = 12 \text{ cm}$, $h = 14 \text{ cm}$
Ce qui nous permet d'avoir six valeurs du rapport h/h_c .

Pour chaque configuration nous avons pris 5 valeurs du rapport D/h_c : $D/h_c = 15$; $D/h_c = 11.25$; $D/h_c = 6.5$; $D/h_c = 3.75$;

$D/h_c = 0$.

Ainsi pour chaque valeur du rapport D/h_c , caractérisant l'éloignement du conducteur par rapport à l'interface nous déterminerons six positions de la tige (repérée par les coordonnées x et y), donnant une fréquence de foudroiement sur le conducteur de 90 %.

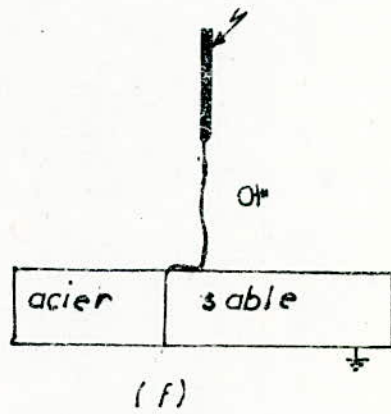
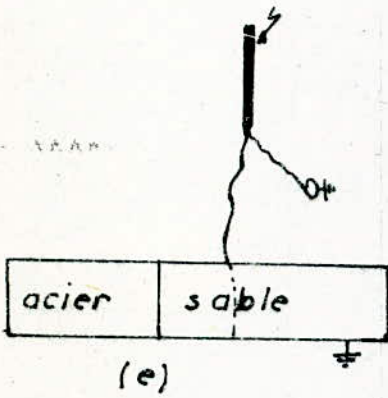
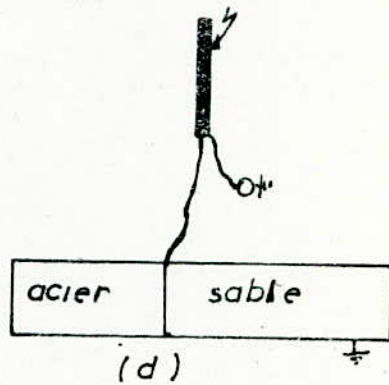
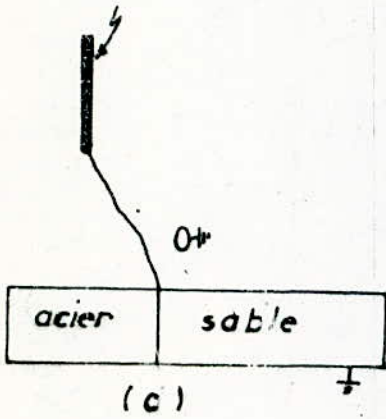
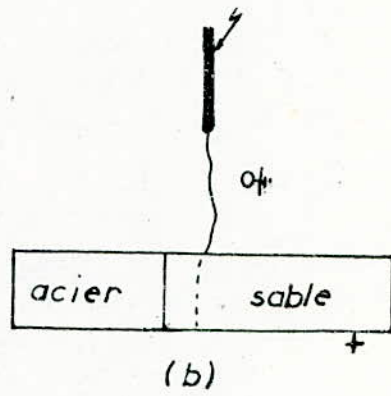
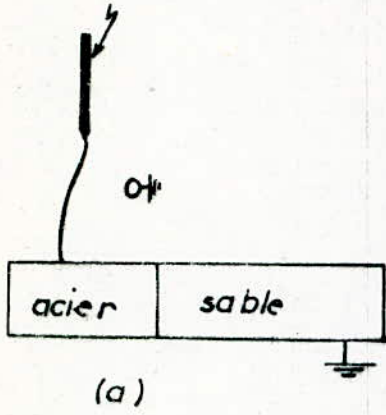
Ces points nous permettront d'analyser la variation des zones d'attraction suivant le rapport D/h_c

Lors des essais les conditions atmosphériques variaient entre les limites manière suivantes.

$p \text{ max} = 77.5 \text{ mm Hg}$;	$p \text{ min} = 75.5 \text{ mm Hg}$
$t \text{ max} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;	$t \text{ min} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$
$h \text{ max} = 79 \%$;	$h \text{ min} = 70.5 \%$

Les types de décharge observés lors des essais sont :

- décharge directe sur l'acier fig. 49 a
- décharge directe sur le sable fig 49 b
- décharge sur l'interface fig 49 c
- décharge conducteur - interface fig 49 d
- décharge conducteur sable fig 49 e
- décharge sable interface (glissante)fig 49 f



(Fig 49) Différents types de décharges obtenues dans le cas d'un sol hétérogène.

II .3.3.2 Résultats obtenus

Selon les cas de configuration et les valeurs de nous résumons les résultats de nos essais dans les tableaux suivants :

TABLEAU: 6:

Configuration (a):

Conducteur au dessus du sable et compris entre la tige et l'interface.

$$\frac{D}{h_c} = 15$$

$Y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$X = \frac{d}{h_c}$	4.65	3.12	3.5	4.55	5.45	5.55

$$\frac{D}{h_c} = 11.15$$

$Y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	2.66	3.12	3.4	4.55	5.45	5.65

$$\frac{D}{h_c} = 6.5$$

$Y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	2.7	3.15	3.37	4.7	5.6	5.9

$$\frac{D}{h_c} = 3.15$$

$Y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	2.75	3.2	3.6	4.75	5.75	6

$$\frac{D}{h_c} = 0$$

$Y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	2.3	2.85	3.1	3.45	4.68	4.8

TABLEAU 7: Configuration b:

Conducteur au-dessus du sable et la tige entre le conducteur et l'interface.

$$\frac{D}{h_c} = 15$$

$y = \frac{h}{h_c}$	4	6	7	8
$x = \frac{d}{h_c}$	4.55	5.3	5.85	6

$$\frac{D}{h_c} = 11.25$$

$y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	5	7
$x = \frac{d}{h_c}$	2.5	2.95	3.5	4.21	5	5.43

$$\frac{D}{h_c} = 6.5$$

$y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	2.35	2.9	3.2	3.5	3.7	3.75

$$\frac{D}{h_c} = 3.75$$

$y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	2.1	2.5	3	3.14	3.5	3.75

TABLEAU: 8: Configuration c:

Conducteur au-dessus de l'acier et compris entre la tige et l'interface.

$$\frac{D}{h_c} = 15$$

$y = \frac{h}{h}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h}$	1.96	2.18	2.25	2.83	3.35	3.5

$$\frac{D}{h_c} = 11.25$$

$y = \frac{h}{h}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h}$	1.87	2.4	2.45	2.7	3.51	3.45

$$\frac{D}{h_c} = 6.5$$

$y = \frac{h}{h}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h}$	2.04	2.4	2.5	2.93	3.6	3.6

$$\frac{D}{h_c} = 3.75$$

$y = \frac{h}{h}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h}$	2.15	2.5	2.75	2.6	3.7	3.81

$$\frac{D}{h_c} = 0$$

$y = \frac{h}{h}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h}$	2.2	2.75	2.8	2.85	3.8	3.9

TABLEAU : TABLEAU 9:

Configuration (d) : Conducteur au dessus de
L'acier et la tige entre le conducteur et l'interface.

$$\frac{D}{h_c} = 15$$

$y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	1.85	2.25	2.3	2.75	3.5	3.55

$$\frac{D}{h_c} = 11.25$$

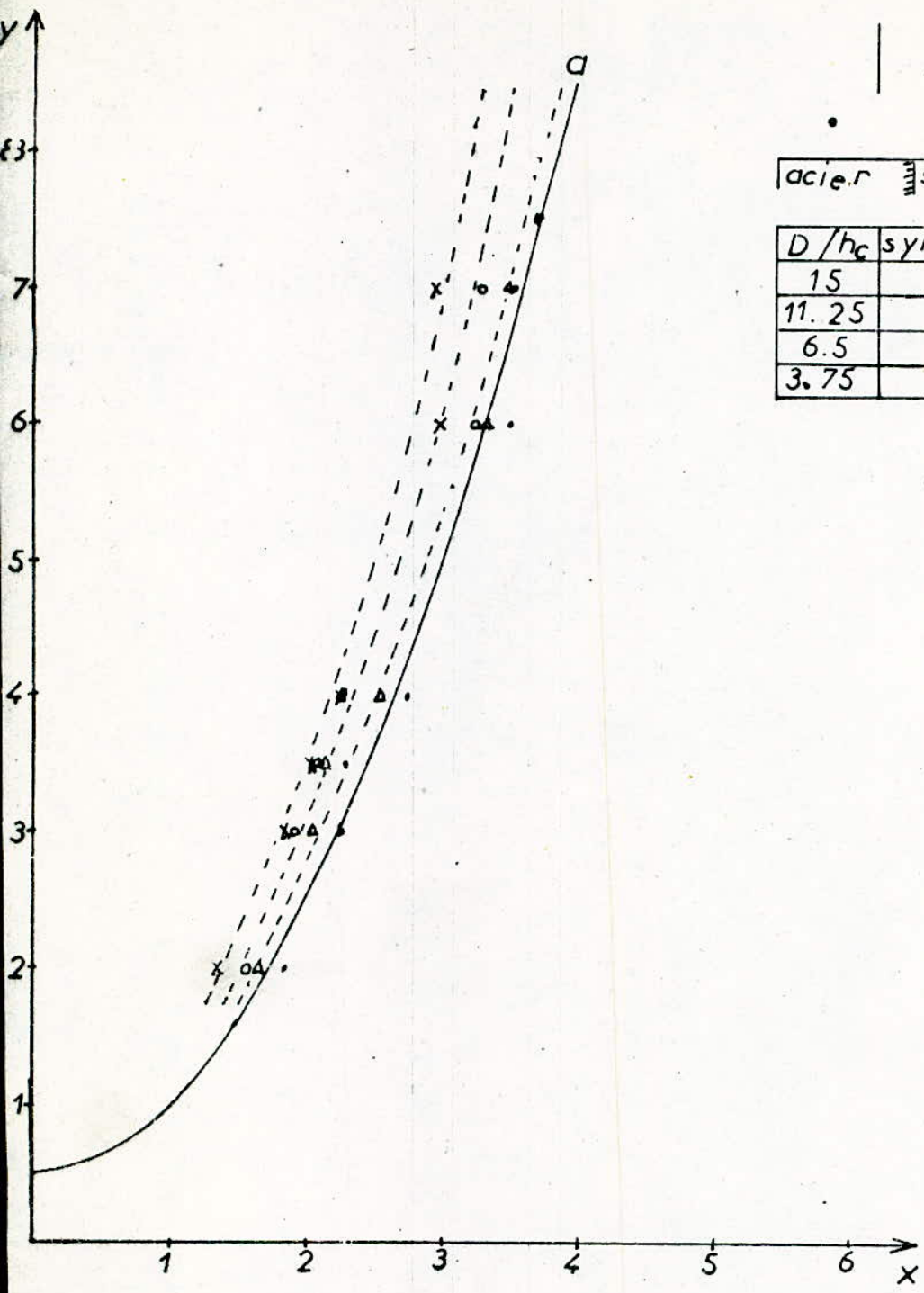
$y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	1.65	2.05	2.17	2.55	3.35	3.5

$$\frac{D}{h_c} = 6.5$$

$y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	1.55	1.89	2.12	2.25	3.25	3.3

$$\frac{D}{h_c} = 3.75$$

$y = \frac{h}{h_c}$	2	3	3.5	4	6	7
$x = \frac{d}{h_c}$	1.35	1.85	2.05	2.25	3	2.95

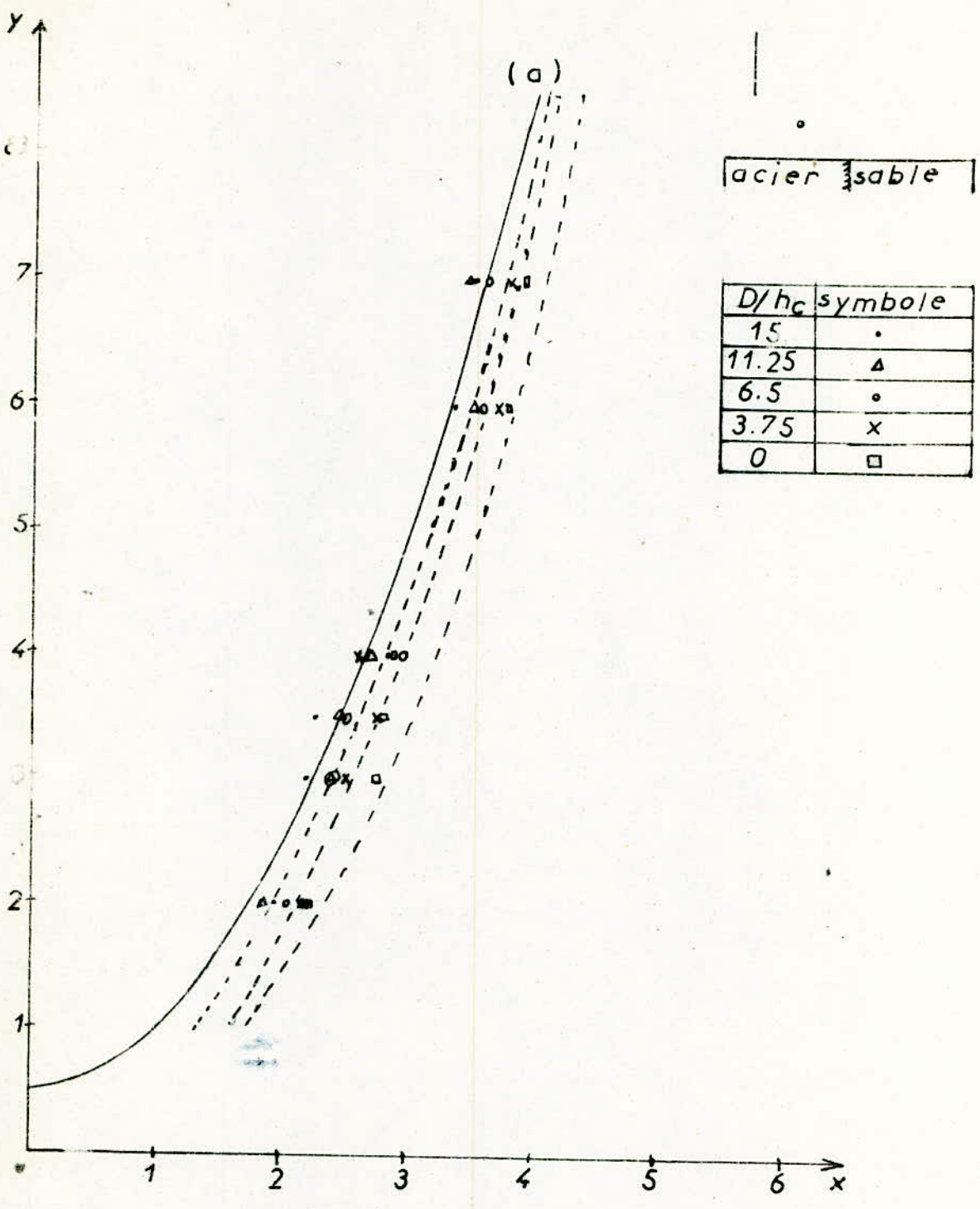


acier sable

D/h_c	symbole
15	•
11.25	Δ
6.5	◦
3.75	x

50) Zones d'attraction d'un conducteur au dessus de l'acier

(a) modele electrogeometrique sur acier



(Fig 51) Zones d'attraction d'un conducteur au dessus de l'acier

a: modèle électrogeométrique sur acier

INTERPRETATION DES RESULTATS

Pour une même configuration, nous allons examiner les variations des zones d'attraction lorsque le conducteur se rapproche de l'interface :

- Conducteur sur acier et la tige entre le conducteur et l'interface fig 50 - fig 52 :

$\frac{D}{h_c} = 15$: Les points obtenus sont pratiquement confondus avec le modèle électrogéométrique sur l'acier. Donc à ce niveau, l'interface n'a aucun effet sur l'impact de la décharge

$\frac{D}{h_c} = 11.25$; Pour ce rapport, l'interface a une légère influence, comme on le voit sur la fig (50) où la zone d'attraction est légèrement déplacée vers la gauche du modèle électrogéométrique.

$\frac{D}{h_c} = 6.5$ Dans ce cas de configuration, l'influence de l'interface s'accroît, se traduisant par une diminution de la zone d'attraction par rapport à celle obtenue pour $\frac{D}{h_c}$:

$\frac{D}{h_c} = 3.75$ La zone d'attraction se trouve ici diminuée par rapport à celle obtenue pour $\frac{D}{h_c} = 6.5$. En effet, pour cette structure, la tige se trouve pratiquement au-dessus de l'interface, ce qui fait qu'un grand nombre de décharges iront vers elle.

- Conducteur sur acier entre la pointe et l'interface (fig 51 - 52)

$\frac{D}{h_c} = 15$ Les points obtenus sont confondus avec le modèle électrogéométrique, et avec les points de la structure précédente pour le même $\frac{D}{h_c}$.

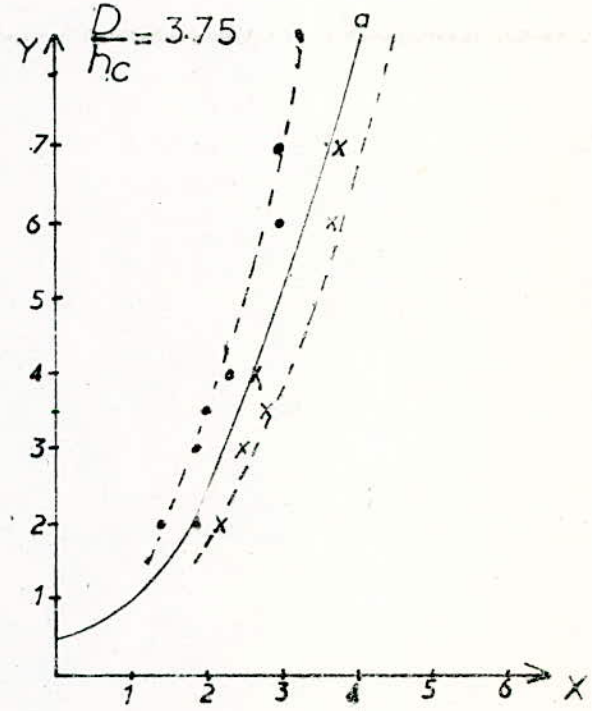
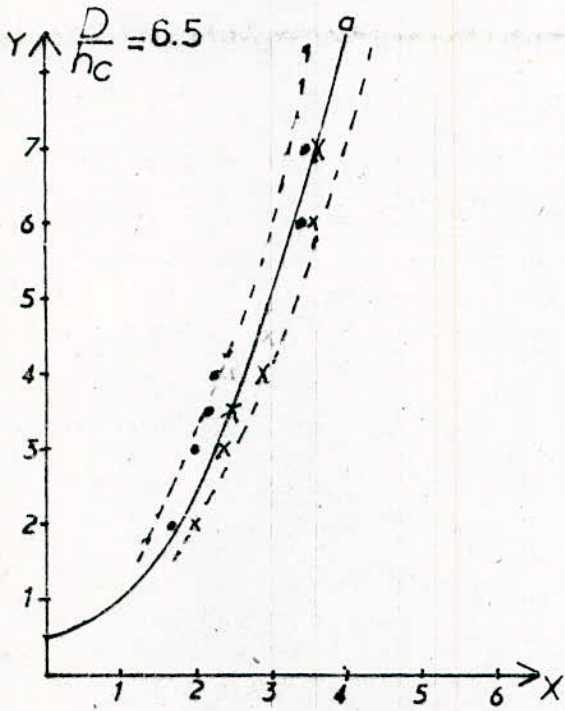
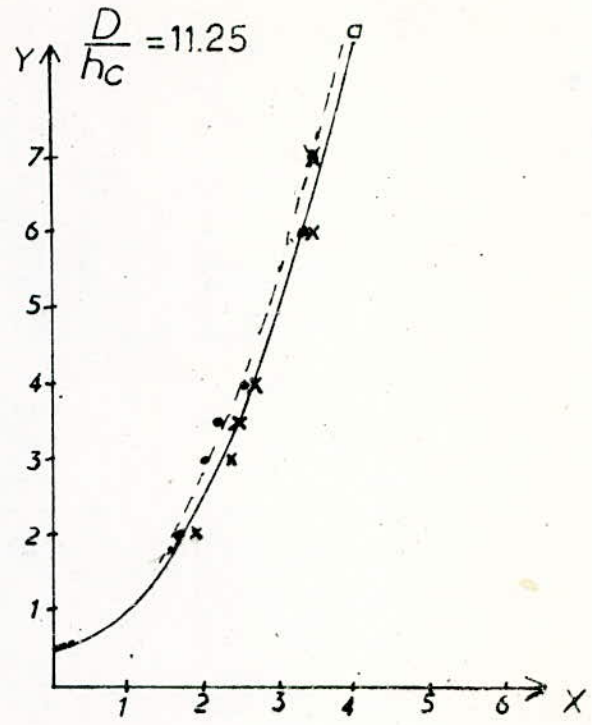
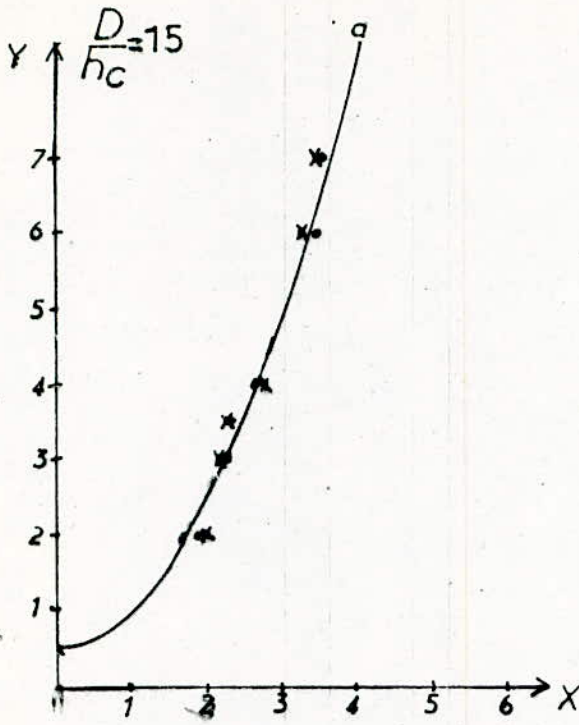
On peut donc dire qu'à $\frac{D}{h_c} = 15$ l'interface ne modifie pas la zone d'attraction quelque soit la position de la tige par rapport au conducteur (fig. 51)

$\frac{D}{h_c} = 11.25$: On observe une légère déviation de la zone d'attraction vers la droite du modèle théorique.

Nous pouvons dire qu'à ce niveau la zone d'attraction reste pratiquement inchangée par rapport au modèle sur acier (fig. 51 et fig. 52).

$\frac{D}{h_c} = 6.5$: La tige (traceur) est plus proche de l'interface que dans le cas précédent et la zone d'attraction est plus large que celle de la configuration précédente (fig. 52.)

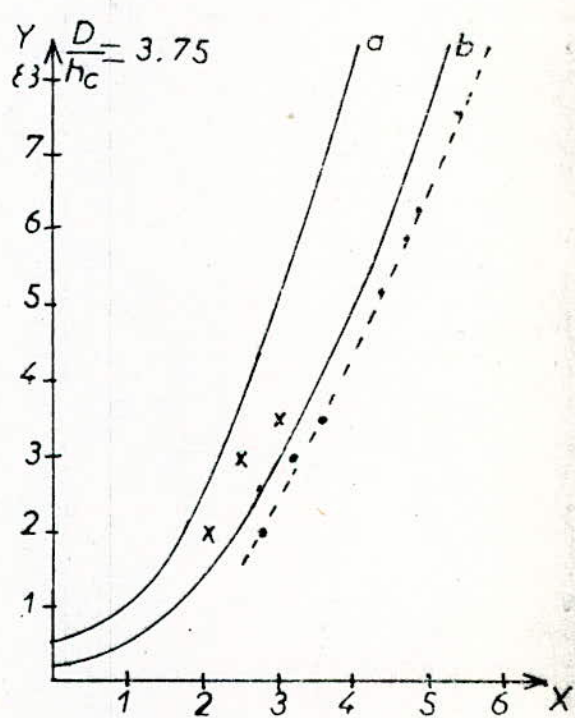
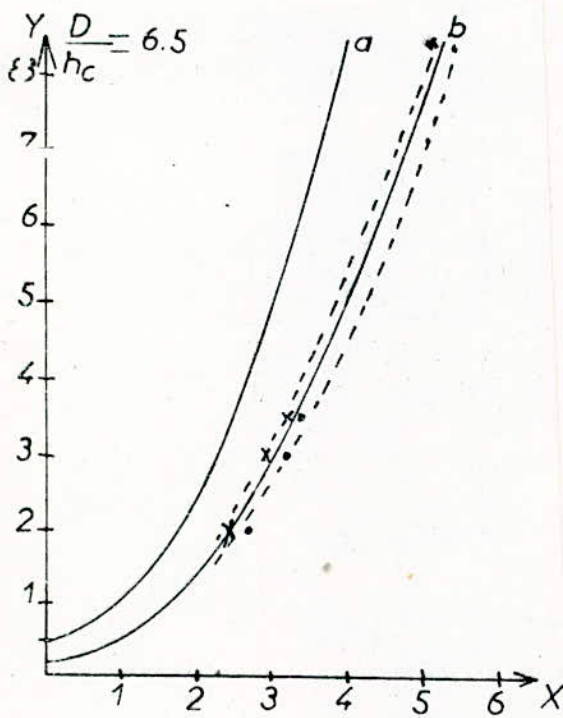
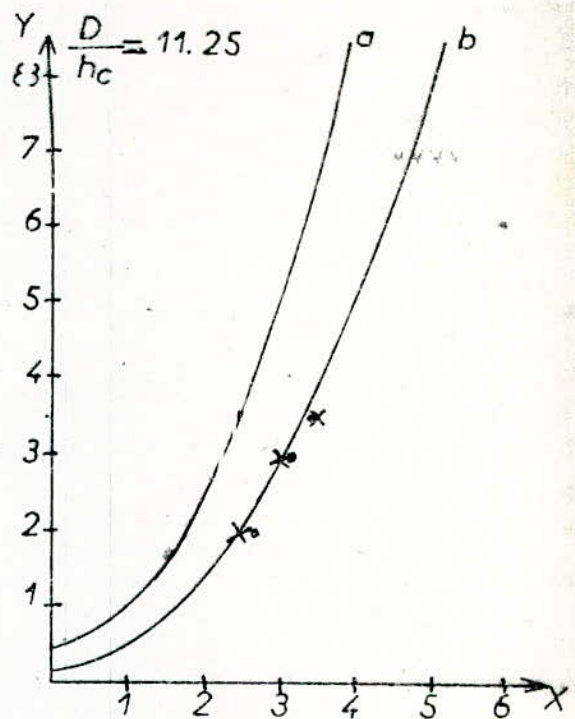
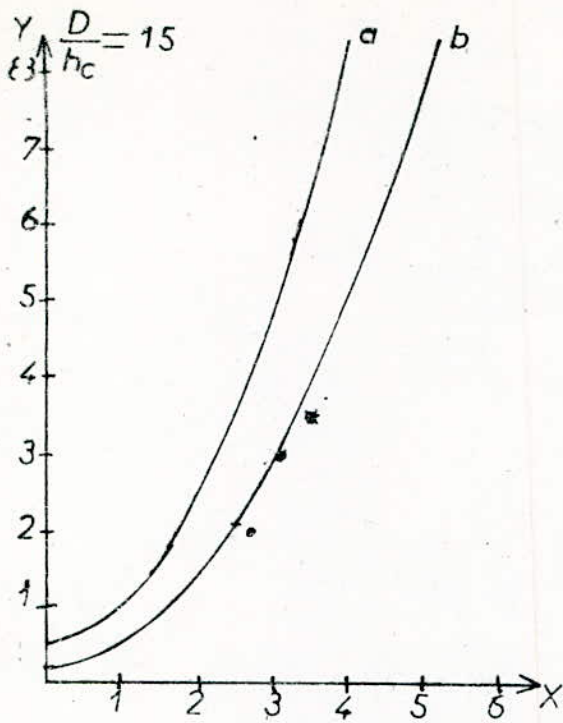
Pour ce même rapport, l'écart par rapport au modèle électrogéométrique sur l'acier est plus prononcé quand la tige est entre le conducteur et l'interface que pour cette structure, car dans ce dernier cas, la pointe est plus éloignée de l'interface (fig. 51).



o	o	o
x	a	s
	a	s

(Fig 52) Zones d'attraction d'un conducteur horizontal au dessus de l'acier

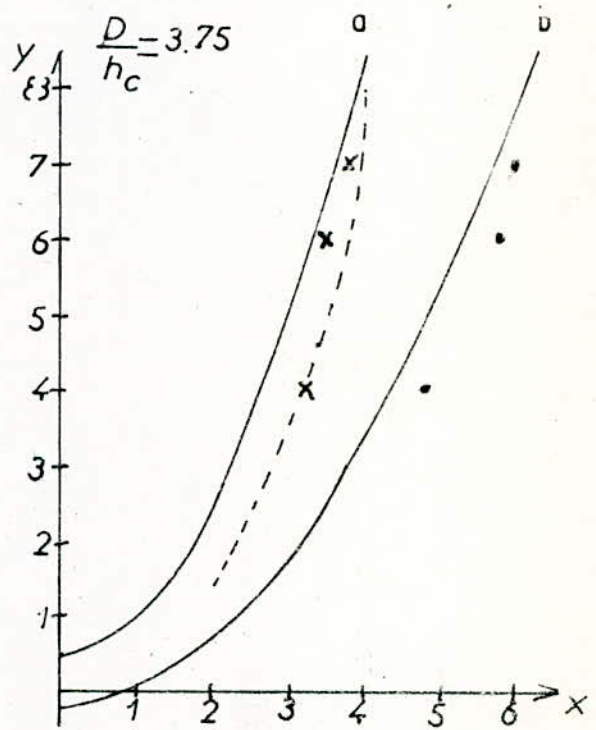
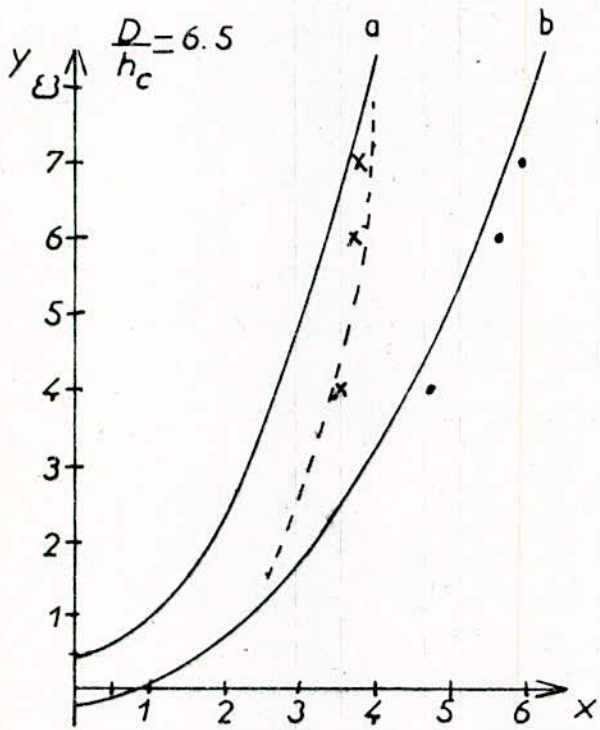
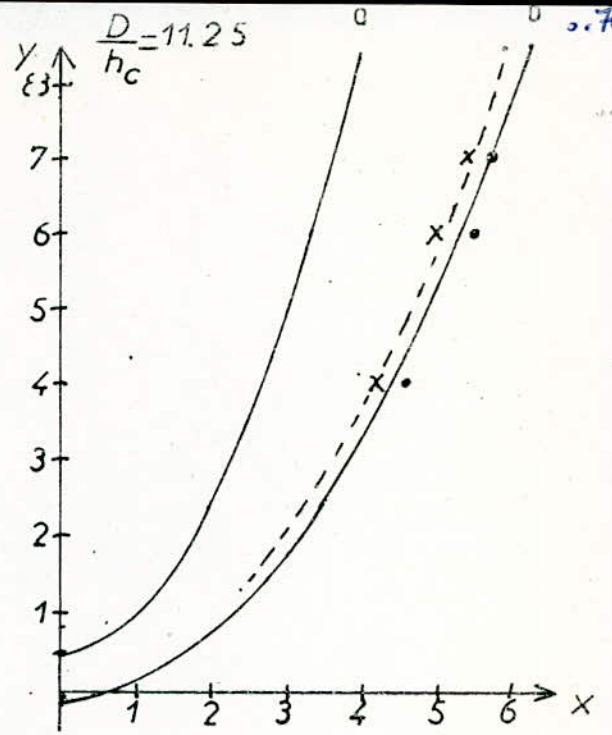
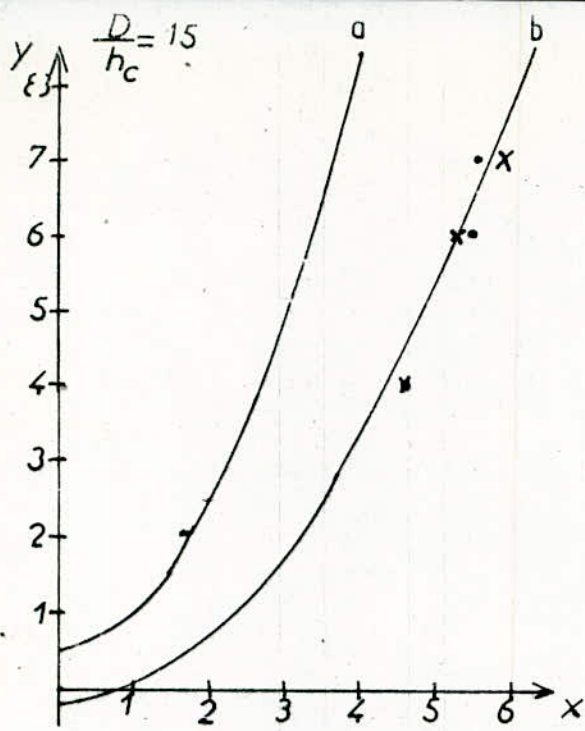
a: modèle électrogéométrique sur l'acier



$hc = 4 \text{ cm}$	
X	$\frac{Y}{\epsilon_3}$
0	0

FIG.53a : ZONES D'ATTRACTION D'UN CONDUCTEUR HORIZONTAL AU DESSUS DU SABLE SUIVANT LA POSITION DE LA TIGE

a: modèle électrogeométrique sur acier.



$h_c = 2 \text{ cm}$	
x	to
o	of

(Fig 536) Zones d'attraction d'un conducteur horizontal au dessus du sable suivant la position de la tige

a: modèle electrogeometrique sur acier
 b: modèle electrogeometrique sur sable ($h_c = 2 \text{ cm}$)

$\frac{D}{hc} = 3.75$: La zone d'attraction s'élargit encore plus par rapport au modèle électrogéométrique (fig. 51)

Et l'écart entre les points de la configuration (c.) et (a.) s'accroît (fig. 52)

$= 0$: pour cette position du conducteur, l'influence de l'interface est maximale par rapport aux autres positions (fig. 58) et (fig. 51).

- Conducteur sur sable entre la tige et l'interface

$\frac{D}{hc} = 0$ Dans ce cas, la tige se trouve au-dessus du sable, la zone d'attraction est comprise entre les deux paraboles limites (celle du sable et celle de l'acier sans interface, déterminées précédemment).

Ici, il faut considérer les différentes hauteurs : $hc = 4$ cm (fig. 57) et $hc = 2$ cm (fig. 54.). On observe que l'écart est plus prononcé par la hauteur du conducteur la plus basse.

Pour ce cas particulier on observe une diminution de la zone d'attraction alors que les autres positions de conducteur il y a une augmentation.

Ceci est dû à l'apparition de décharges glissantes.

$\frac{D}{hc} = 3.75$: Dans ce cas, la zone d'attraction se trouve éloignée vers la droite de la parabole sur sable, pour les deux hauteurs hc considérées. (fig. 55 et fig 54).

Ici l'élargissement de la zone d'attraction est plus prononcé que pour les autres positions de la même configuration (fig.53 a) et (fig 53 b).

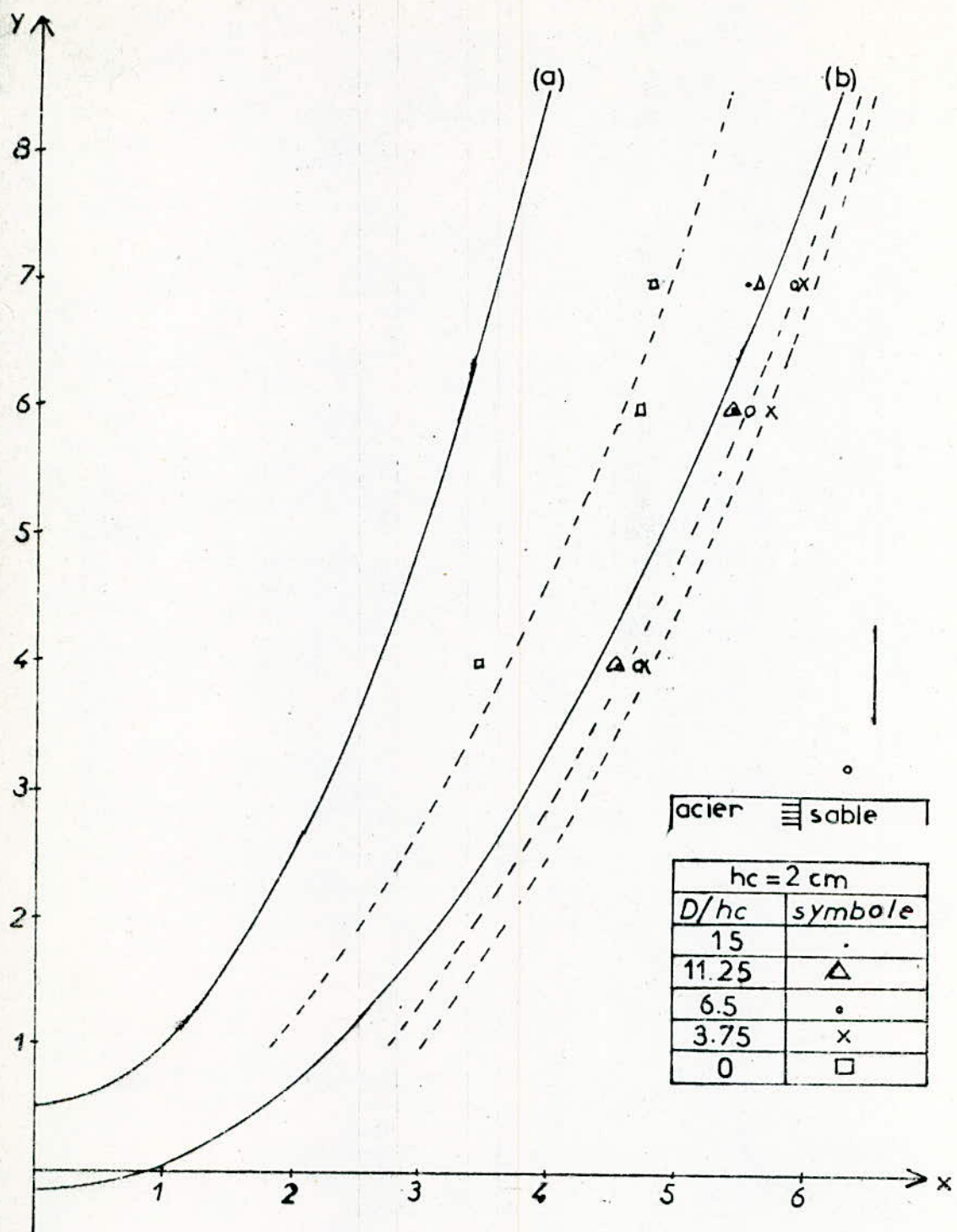
$\frac{D}{hc} = 6.5$: La variation de la zone d'attraction est dans le même sens que précédemment (b), mais l'écart est plus petit. (fig.55 fig.54). L'écart par rapport au modèle sur acier est plus prononcé pour $hc = 2$ cm

$\frac{D}{hc} = 11.25$: A cette distance, l'influence de l'interface a disparu et les points rejoignent le modèle électrogéométrique sur sable. (fig. 55) et (fig. 54)

$\frac{D}{hc} = 15$: A cette distance du conducteur de l'interface, les résultats des essais nous permettent de dire que l'interface n'a pratiquement aucune influence sur la zone d'attraction d'un conducteur (fig 55) et (fig 54)

- Conducteur sur le sable et la tige entre le conducteur et l'interface

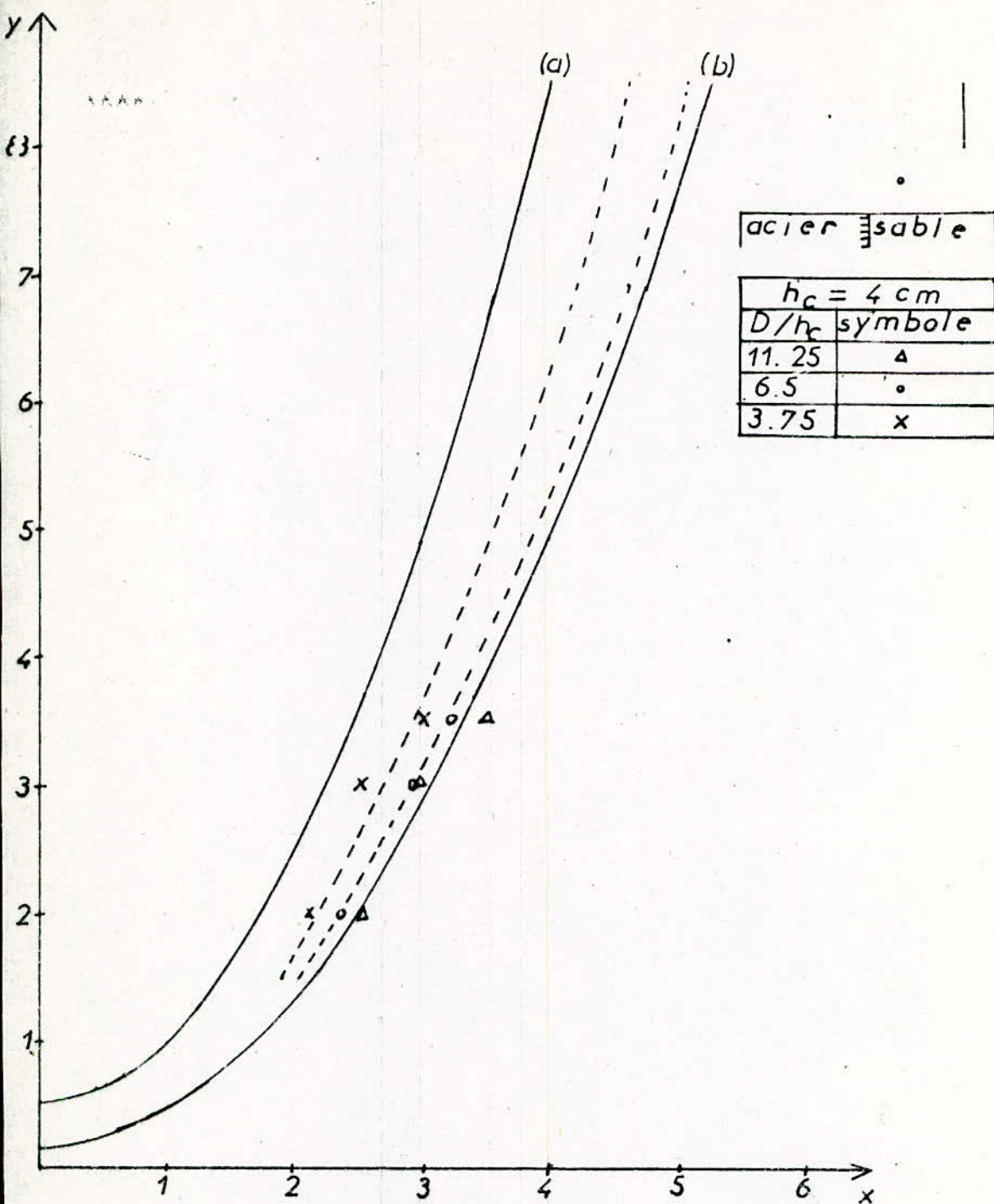
$\frac{D}{hc} = 3.75$: Pour les faibles rapports $\frac{D}{hc}$, la tige est sur le sable et les points tendent vers les paraboles limites, déterminés précédemment sur sable pour $hc = 2$ cm 4 cm



(Fig 54) Zones d'attraction d'un conducteur
au dessus du sable

a: modèle électrogéométrique sur acier

b: modèle électrogéométrique sur sable



(Figs 5) Zones d'attractions d'un conducteur
au dessus du sable

(a): modèle électrogeométrique sur acier
(b) modèle électrogeométrique sur sable

A mesure que le rapport $\frac{h}{h_c}$ augmente la pointe se retrouve au-dessus de l'acier et les points tendent vers la parabole du modèle électrogéométrique, nous obtenons ainsi une zone d'attraction qui est comprise entre les deux paraboles limites (fig 57) et (56 .)

$\frac{D}{h_c} = 6.5$: L'effet de l'interface se manifeste par une diminution de la zone d'attraction limite sur sable de la même manière que précédemment : cependant cette diminution est moins prononcée pour $h_c = 4$ cm (fig 57) et (fig 58)

$\frac{D}{h_c} = 11.25$: L'influence de l'interface dans ce cas n'est visible que pour $h_c = 2$ cm où une légère diminution de la zone d'attraction sur sable se manifeste (fig.56)

Alors que pour $h_c = 4$ cm, les points se retrouvent pratiquement sur le modèle électrogéométrique sur sable (fig.57)

D'après les résultats de cet essai nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- l'influence de l'interface est importante lorsque le conducteur est à son voisinage. Elle est maximale quand celui-ci se trouve au-dessus d'elle.

- Lorsque le conducteur est sur l'acier et que la tige est entre lui et l'interface, les zones d'attraction diminuent par rapport au modèle sur acier à mesure que l'on se rapproche de l'interface.

- Si par contre le conducteur est sur l'acier et la tige à sa gauche, les zones d'attraction augmentent par rapport au modèle sur acier au même temps que l'on se rapproche de l'interface.

- A partir de $\frac{D}{h_c} = 11.25$, on peut négliger l'influence de l'interface.

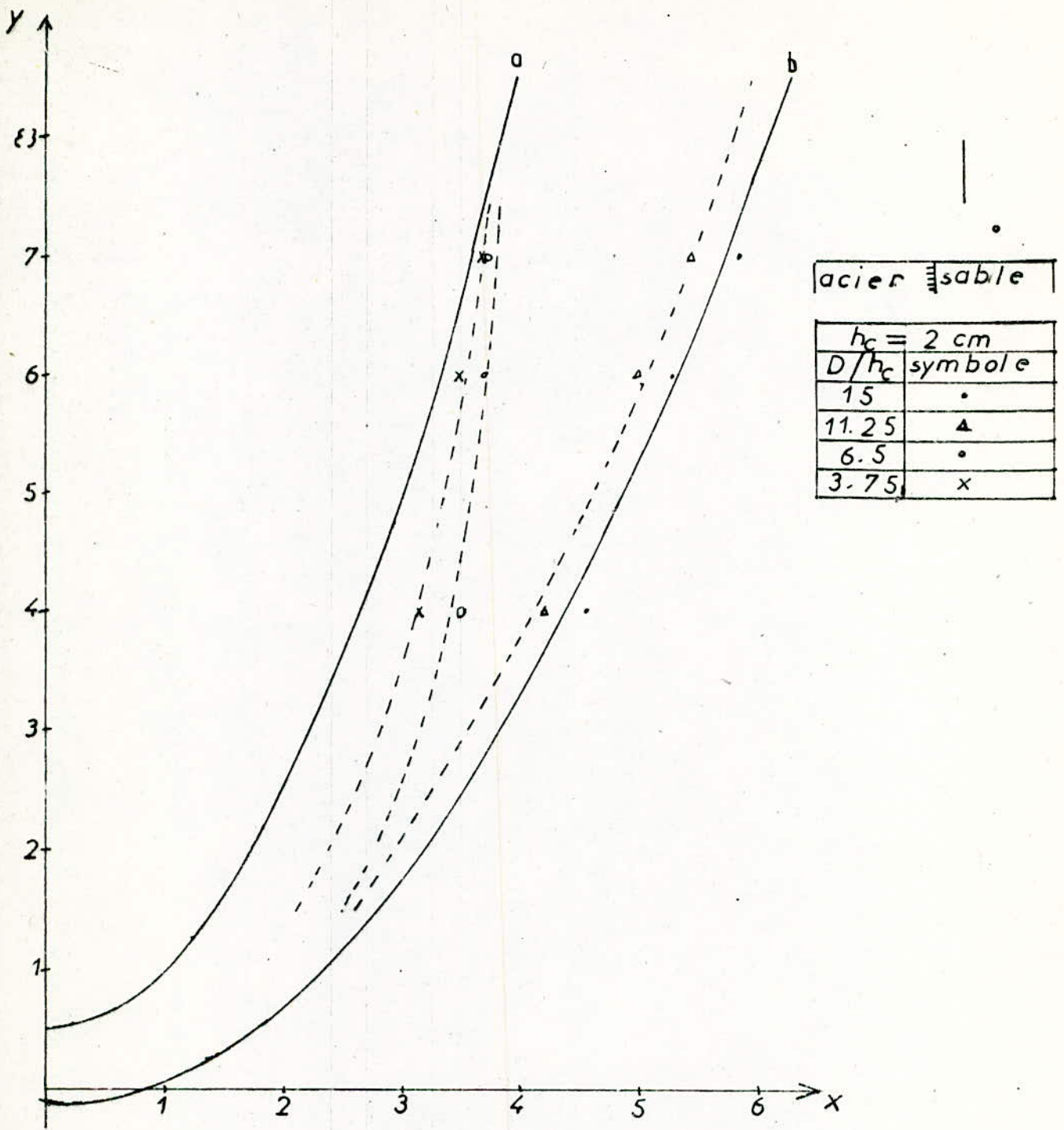
- Quand le conducteur est sur le sable et que la pointe est entre lui et l'interface, les zones diminuent par rapport au modèle sur sable en se rapprochant de l'interface. Les zones d'attraction sont comprises dans ce cas entre le modèle sur acier et le modèle sur sable.

- Si le conducteur est sur le sable et la tige se trouve à sa droite, la zone d'attraction augmente quand on se rapproche de l'interface.

- L'influence de l'interface est plus marquée pour les petites hauteurs h_c du conducteur au sol.

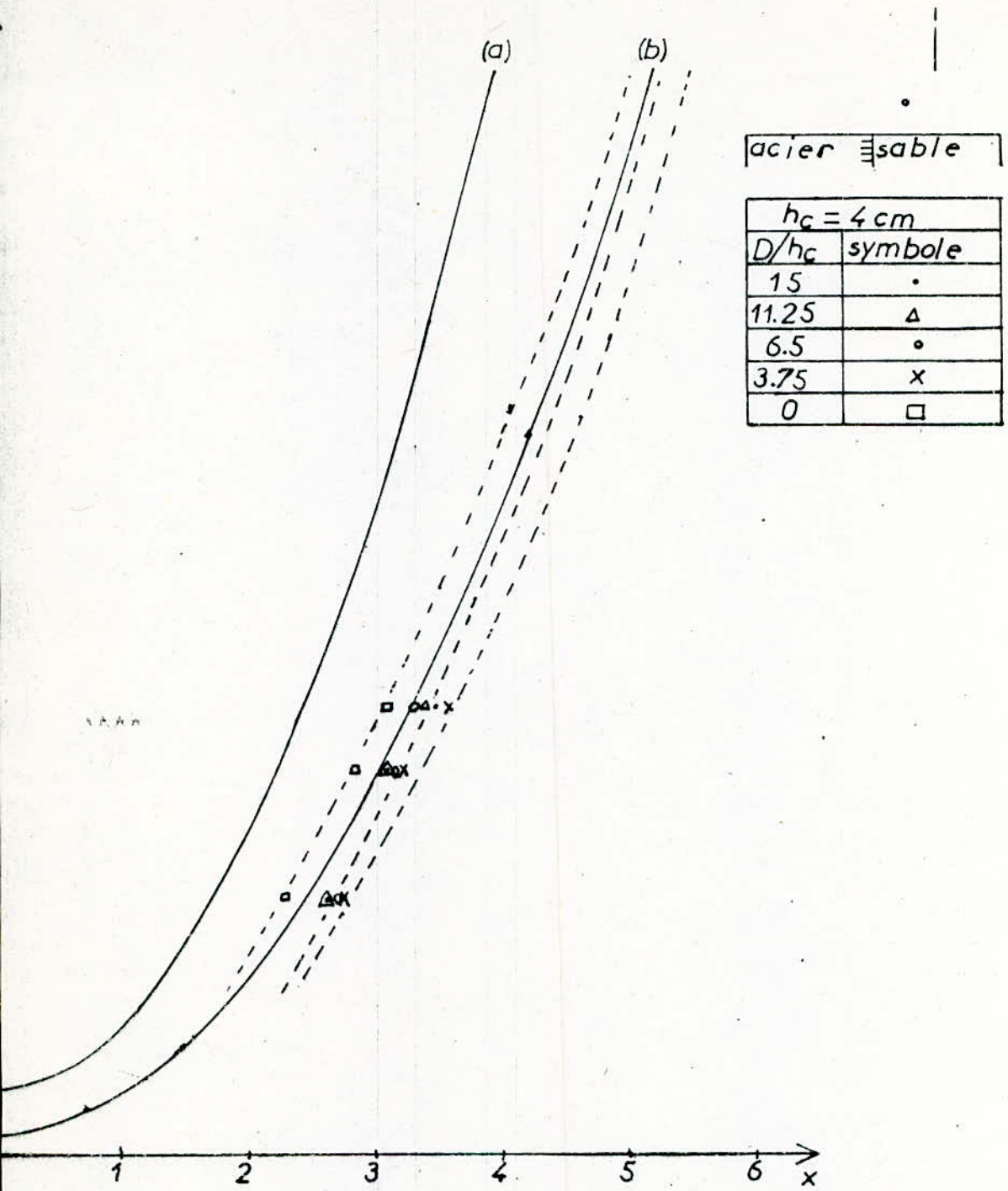
- Quand le conducteur est sur l'interface ($\frac{D}{h_c} \rightarrow 0$), la zone d'attraction diminue toujours par rapport au modèle sur sable. Ceci est dû à l'apparition des décharges glissantes.

- Pour le sable, on peut négliger l'influence de l'interface à partir de $\frac{D}{h_c} = 11.25$ pour $h_c = 2$ cm et à $\frac{D}{h_c} = 6.5$ pour $h_c = 4$ cm.



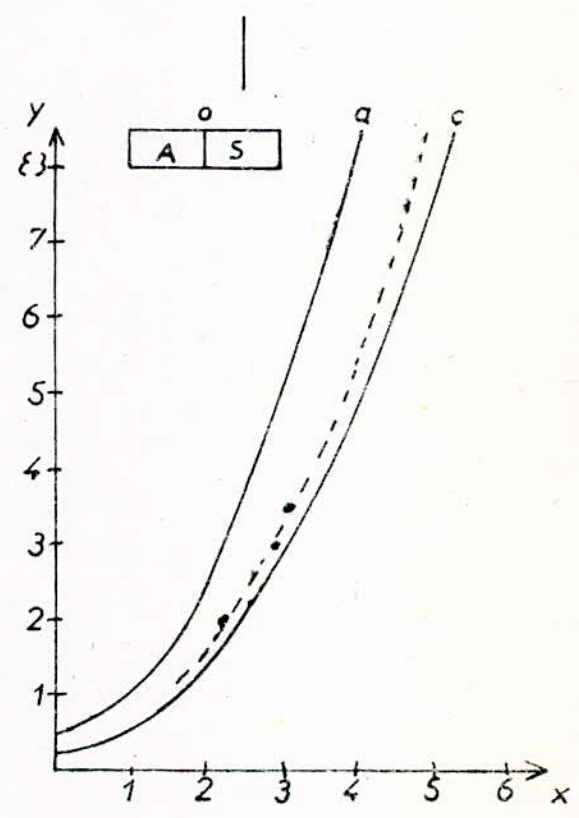
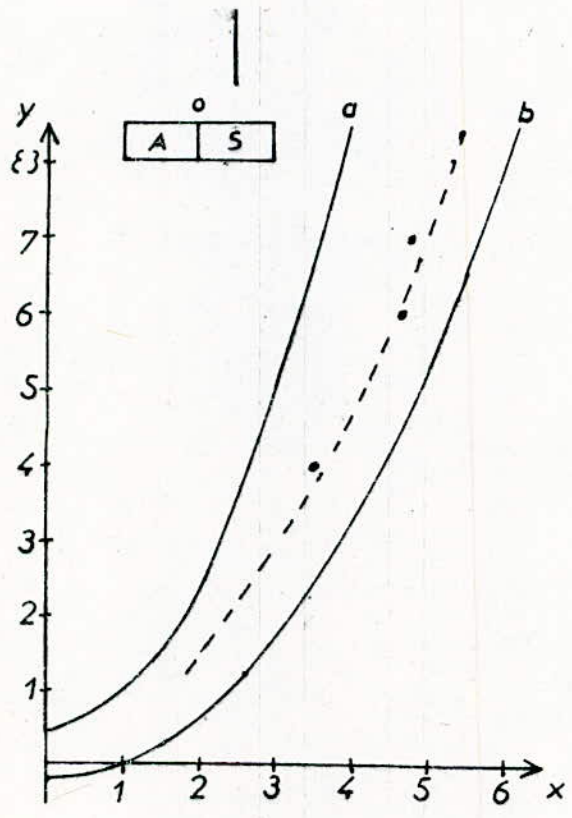
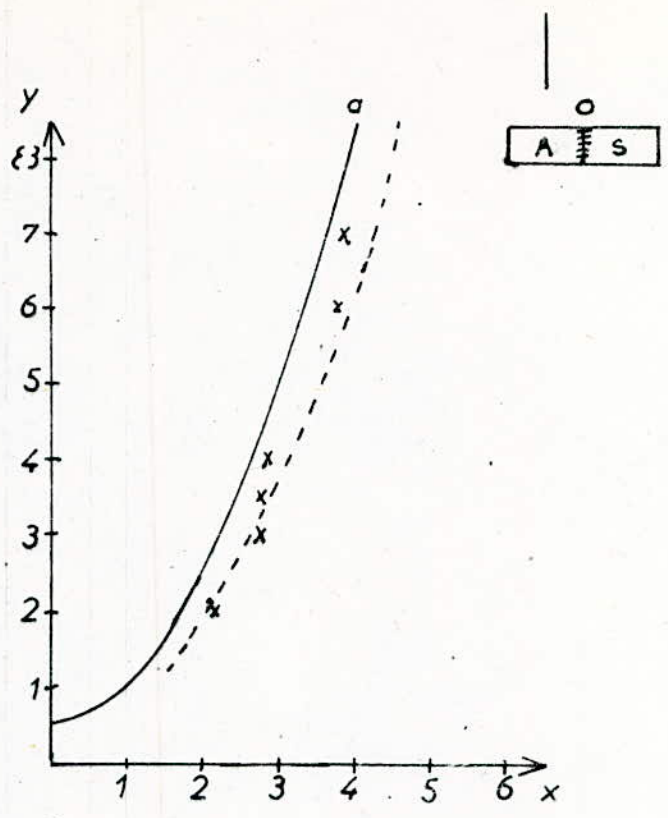
(Fig 56) Zones d'attraction d'un conducteur au dessus du sable

a: modèle electrogeometrique sur acier
 b: modele electrogeometrique sur sable ($h_c = 2 \text{ cm}$)



(Fig 57) Zones d'attraction d'un conducteur au dessus du sable

(a) modele electrogeometrique sur acier
 (b) modele electrogeometrique sur sable



(Fig 58) Zone d'attraction d'un conducteur
au dessus de l'interface

- a: modèle électrogéométrique sur acier
- b: modèle électrogéométrique sur sable (hc = 2 cm)
- c: modèle électrogéométrique sur sable (hc = 4 cm)

Lorsque la tige se trouve entre l'interface et le conducteur, l'influence de celle-ci est plus marquée par rapport aux autres configurations.

IV 3- PROTECTION SUR SOL HOMOGENE DE CONDUCTIVITE δ :

- En se basant sur les considérations développées dans les essais précédents, nous aborderons une approche de la protection pour un sol homogène de conductivité donnée et d'épaisseur e .

a) Cas du paratonnerre horizontal

Soit un conducteur horizontal situé à une hauteur hc d'un sol de niveau de terre fictive.

D'après l'équation (43), la zone d'attraction de ce conducteur est limitée par la parabole d'équation (fig 59) :

$$x^2 - 2y(hc + e') + hc^2 - e'^2 = 0 \quad (\text{eqn.49})$$

- Si le traceur de foudre survient dans la zone I, il ira directement au sol.

- S'il vient dans la zone II, il sera capté par le conducteur si sa distance au câble (AM) est inférieure à la distance d'amorçage d .

Le cas limite a lieu quand le traceur est sur parabole.

Le coup de foudre sera capté par le conducteur si:

$$AM = D.$$

Puisque $AM = ME$; donc si $ME = d$.
 $MH + HE = d$.
 $y + e' = d \Rightarrow y = d - e'$.

En portant la valeur de y dans l'équation (44), on a;

$$x^2 - 2(d - e')(hc + e') + hc^2 - e'^2 = 0 \quad (\text{eqn. 50})$$

soit:

$$x^2 - 2d(hc + e') + (hc + e')^2 = 0 \quad (\text{eqn. 51}).$$

Le rayon de protection au sol vaut donc:

$$x_0 = \sqrt{2d(hc + e') + (hc + e')^2} = \sqrt{2dh' + h'^2}$$

$$\text{avec } h' = hc + e'.$$

Nous constatons que le rayon de protection au sol à exactement la même expression que pour le modèle électrogéométrique sur acier en ajoutant à la hauteur h_c du conducteur l'épaisseur fictive e' .

Nous pouvons étendre ce résultat au paratonnerre verticale et au modèle de la sphère roulante en ajoutant comme précédemment e' à la hauteur H du paratonnerre.

D'où les zones de protection suivantes:

- Paratonnerre horizontal:

$$x_0 = \sqrt{2d(H+e')^2 + (H+e')^4}$$

- Paratonnerre vertical:

$$x_0 = \sqrt{2d(H+e')^2 + (H+e')^4} \quad \text{Si } d > H+e'$$

$$x_0 = d \quad \text{Si } d < H+e'$$

- 2 tiges verticales:

$$x_0 = \sqrt{2d(H+e') - (H+e') - D^2} \quad \text{Si } d > H+e'$$

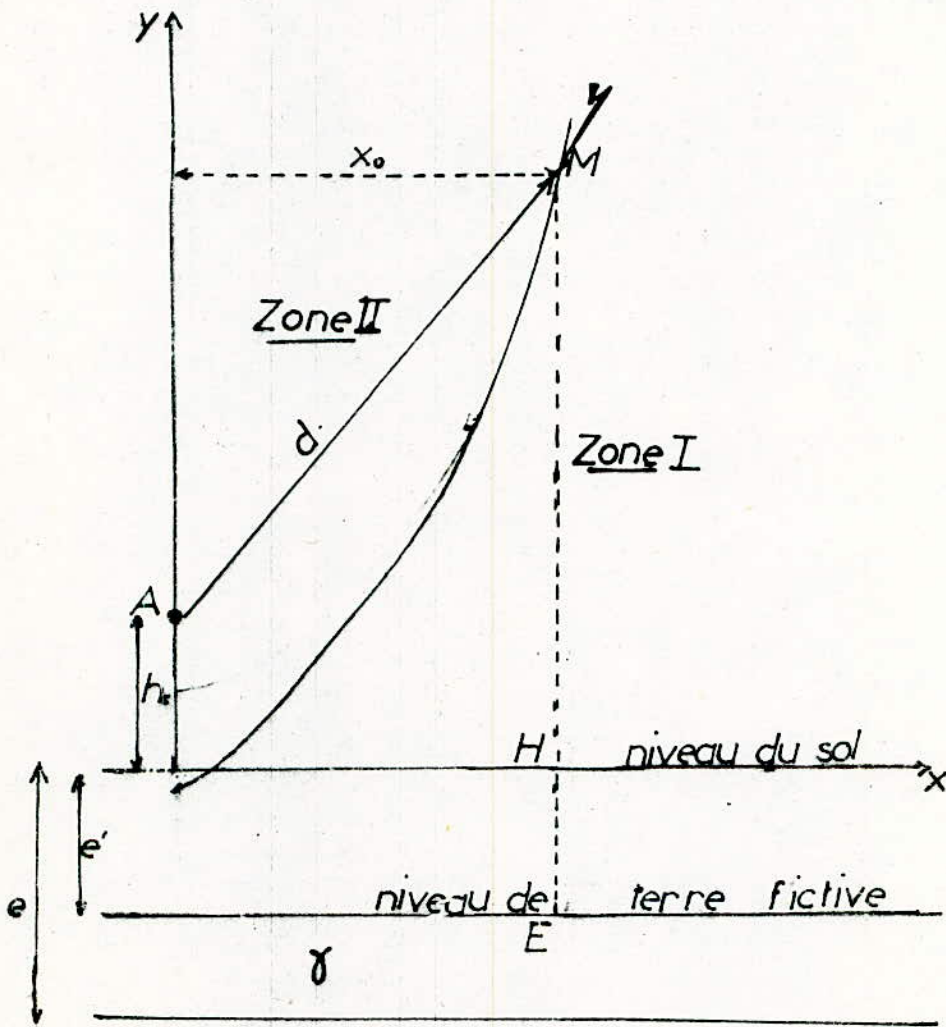
$$x_0 = \sqrt{d^2 - D^2} \quad \text{Si } d < H+e'$$

avec D la distance entre 2 tiges verticales.

- Protection d'une ligne à l'aide d'un cable de garde:

L'angle de protection devient:

$$\theta = \arcsin \left[1 - \frac{(H+e')}{d_0} \right] - \arcsin \frac{AC}{2d_0} \quad \text{(eqn.52)}$$



(Fig 59) Zone d'attraction d'un conducteur horizontal au dessus d'un sol de conductivité σ .

On constate que pour un sol de conductivité σ , les méthodes de détermination des zones d'attraction restent inchangées et que le rayon de protection au sol x_0 est plus grand que dans le cas du modèle électrogéométrique sur acier.

Si le dimensionnement de la protection d'un objet a été effectué sans tenir compte de la nature électrogéologique du sol, celle-ci serait toujours efficace.

En effet, dans tous les cas, la zone de protection est plus large dans le cas d'un sol conducteur de conductivité σ que dans le cas du modèle électrogéométrique sur acier.

IV .4 Protection en sol présentant une discontinuité géologique.

Ce cas de figure est le plus défavorable, car on a observé qu'au voisinage de l'interface, les zones d'attraction peuvent être plus petites que dans le cas du modèle électrogéométrique du matériau de plus grande conductivité.

Donc, si on ne tient pas compte de l'influence de l'interface lors du dimensionnement de la protection d'un objet au sol ou d'une ligne passant à proximité, cette protection serait défailante.

Pour remédier à cet inconvénient, il faut diminuer le rayon de protection au sol calculé à l'aide du modèle électrogéométrique en le multipliant par exemple par un coefficient de sécurité qu'on pourrait déterminer empiriquement par des essais.

C O N C L U S I O N

La zone d'attraction d'un conducteur horizontal dépend de sa hauteur au sol et de la conductivité du matériau qui constitue ce sol.

Pour la détermination des zones d'attraction, le modèle électrogéométrique reste vérifié par rapport au niveau de terre fictive du matériau considéré.

En présence d'une discontinuité géologique, les zones d'attraction tendent, soit à augmenter, soit à diminuer par rapport à leurs modèles électrogéométriques respectifs.

Et ceci, suivant la position du traceur de foudre par rapport au conducteur et à la discontinuité.

Ce résultat doit être pris en compte pour le dimensionnement des dispositifs de protection contre la foudre.

Il serait intéressant de compléter ce projet en déterminant les zones d'attraction pour différentes épaisseurs d'un matériau donné et pour des matériaux de conductivités différentes.

- 1 -G.Leroy et C.Gary: "Propriétés dielectriques de l'air et
et les tres Hautes tensions"
Editions eyrolles-Paris 1984
- 2 -M.Aguet et M.Ianovici: "Traité d'électricité-Haute tensi
Editions Georgie-1982
- 3 -Diesendorf: "Insulation co-ordination in high voltage
electric power system"
Butterworth and Co 1974
- 4 -E.Kuffel and W.S.Zangel: "High voltage engeneering
fundamental"
Pergamont press 1984
- 5 - V.Fritsch: "Einiges über Beziehungen der Funkgeologie
zur Blitzforschung"
Akademische Verlagsgesellschaft 1940
- 6 -C.Gary: "Les principes physiques guidant la protection
des batiments contre la foudre"
RCE Tome 85 -mai 1980
- 7 -Albert Mayer Baden: "Protection contre les surtensions
dans les reseaux de moyenne tension"
Revue Brown Boverie. 5.79
- 8 -C.Gary: "Electricité de france"
Fascicule n°8
- 9 -H.Gigot: "Lignes et postes.Choix et coordination des
Isolements"
Technique de l'ingenieur
- 10 -H.Norinder et O.Salka: "The proprieties of artificial
lightning discharges against a geo-
gically heterogenous surface"
Cigre-1950, rapport 313

II -Bernard Hutzler:"Scientific American"
Paris Janvier 1989

I2-Popolansky:"Frequence de distribution des amplitudes
des courants de foudre
Revue Electra n°22 mai 1972

I3 -D.W.Gilman et Whithead:"Mecanismes des amorçages dus à
la foudre sur les lignes à Haute tension"
Electra n°27-Mai 1973

I4 -A.J.Eriksson:"Surtension de foudre sur les lignes de
transport à haute tension"
Electra n°47 - Juillet 1976

I5 -K.Berger et R.B.Anderson:"Parametres de coups de foudre"
Electra n° 41 -Juillet 1975

I6 -R.B.Andersen et J.B.Eriksson:"Les parametres de la foudre
en vue d'une application industrielle"
Electra n°69-mars 1980

I7 -J.Ferras:"Influence des propriétés électrogeologiques
du sol sur le point d'impact de la decharge de
de foudre"
These de magister E.N.P.A 1987

I8 -K.Miloudi:"Utilisation d'un paratonnerre horizontal sur
un sol heterogene"
Projet de fin d'etude 1987 E.N.P.A

I9 -C.E.I 364-5.54:"Mise à la terre des conducteurs de pro-
tection"
Norme C.E.I

20 -M.Dobardic:"Station d'essais au choc à haute tension"
Projet de fin d'etude E.N.P.A juin 1973

21 -N.Sahali et N.Nouiat:"Etude du foudroiement direct d'une
ligne de transport d'energie electrique à
Haute tension mal protégée"
P.F.D E.N.P.A 1988