

وزارة الجامعات والبحث العلمي
Ministère aux Universités et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة - BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR D'UN SOL
MAUVAIS CONDUCTEUR SUR LES ZONES
D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE
VERTICAL*

Proposé par :

Mr A. BOUBAKEUR

Etudié par :

K. MEDJADI

R. ALLAL

Dirigé par :

Mr A. BOUBAKEUR

PROMOTION

JUIN 1992

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

وعلما
وعلما
وعلما

وقل رب زدني علما

صلى الله العظيم

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

مكتبة المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

DEDICACES

Je dédie ce travail :

- A ma mère.
- A mon père, qui ne peut goûter la satisfaction de voir ce grand moment, de son fils reconnaissant.
- A mon oncle Kamr-Eddine
- A ma tante Yasmina
- A mes frères et Lamine
- A toute ma famille, ainsi qu'à tous mes amis.

MEDJADI KAMEL-EDDINE

Je dédie ce travail

- A mes parents
- A mes frères et soeurs
- A toute ma famille et à tous mes amis.

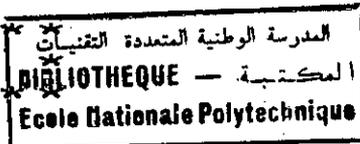
ALLAL REDHOUANE

REMERCIEMENTS :

Nous remercions profondément Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'E.N.P d'Alger pour, ses encouragements, ses précieux conseils, et pour sa bienveillante attention; lesquels nous ont aidé à l'élaboration de ce projet

Nous n'oublions pas de remercier Monsieur R.BELAICHA pour ses conseils et son aide moral. Ainsi qu'à tout ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

* S O M M A I R E *



INTRODUCTION

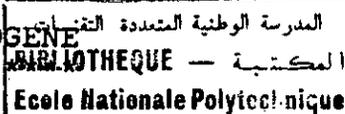
CHAPITRE 1 MECANISME DE Foudre *****

- 1-1 Nuage Orageux
- 1-2 Le champ électrique au sol et l'effet de couronne
- 1-3 classification des coups de foudre
- 1-4 Déroulement d'un coup de foudre
 - 1.4.1 Coup de foudre Ascendant.
 - 1.4.2 Coup de foudre Descendant.
- 1-5 Localisation des coups de foudre.
- 1-6 Paramètres électriques des coups de foudre.
 - 1.6.1 Formes de composantes impulsionnelles de la foudre
 - 1.6.2 Distribution des amplitudes
 - 1.6.3 Raideur des fronts d'onde
- 1-7 Effets d'un coup de foudre.

CHAPITRE 2 DECHARGE EN SOL HOMOGENE *****

- 2-1 Protection contre la foudre en sol homogène
 - 1.1.1 Surtension de foudre dans un réseau
- 2-2 Sévérité orageuse
 - 2.2.1 Niveau Kerannique
 - 2.2.2 Densité de coup de foudre au sol
- 2-3 Moyens de protection contre la foudre
 - 2.3.1 Protection par parafoudre
 - 2.2.2 Protection par paratonnerre
 - 2.2.3 Efficacité des paratonnerres
- 2-4 Mécanismes d'impact et le modèle électrogéométrique
 - 2.4.1 Mécanisme d'impact
 - 2.4.2 Modèle électrogéométrique
- 2.5 Mise en oeuvre du modèle électrogéométrique
 - 2.5.1 méthode graphique de la détermination des zones de protection

CHAPITRE 3 DECHARGE EN SOL HETEROGENE



3-1 Introduction

3-2 Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la décharge de foudre

3-3 Influence de l'hétérogénéité du sol sur les décharges de foudre

3.3.1 Distribution sur une surface homogène

3.3.2 Distribution sur une surface hétérogène

3-4 Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène

3.4.1 Zones d'attraction du paratonnerre situé au dessus du sable

3.4.2 Zones d'attraction du paratonnerre situé au dessus de l'acier.

3.5 Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol hétérogène.

3.6. Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical et horizontal sur sol conducteur.

CHAPITRE 4. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA TERRE SUR LES ZONES D'ATTRACTION.

4.1. Introduction.

4.2. Essais effectués

4.3 Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sur sol homogène faiblement conducteur (sable).

4.3.1. Méthode de travail

4.3.2. Différentes décharges observées.

4.3.3. Résultats d'essais.

4.3.4. Interprétation des résultats.

CONCLUSION.

Bibliographie

Annexes.

Annexe A : Variation de la fréquence des décharges en fonction de la tension.

Annexe B : Variation de la fréquence des décharges sur le paratonnerre en fonction de la distance séparant l'axe de la tige à celui du conducteur.

INTRODUCTION/

Depuis longtemps, l'homme a été impressionné par les décharges de foudre. Il a essayé de les expliquer et les interpréter différemment.

Les dégâts causés par les chocs de foudre sont assez nombreux; on peut en citer : foudroiement de hauts édifices publics, mâts de bateaux et hautes tours de radars et télévision, lignes de transport d'énergie électrique détérioration des systèmes de commandes dans les avions, incendies de forêts etc...

Ces dégâts occasionnent ainsi des pertes matérielles et humaines.

Ce n'est qu'au début du vingtièmes siècles que les chercheurs se sont consacrés à étudier ce phénomène naturel, néanmoins, des recherches continuent toujours à s'effectuer pour se protéger contre la foudre.

Parmis les travaux effectués, l'influence des propriétés électrogéologiques du sol sur la fréquence de foudroiement d'un lieu donné, est d'une importance primordiale.

En effet, l'existence de région à haute fréquence de foudroiement a amené les chercheurs à envisager l'hypothèse de la dépendance entre la nature du sol et la localisation des coups de foudre.

La contribution de notre travail est d'étudier l'influence de l'épaisseur d'un sol homogène (sable sec) mauvais conducteur sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical.

* CHAPITRE 1 *
* *
* MECANISME DE Foudre *
* *

I.1 NUAGES ORAGEUX

Un nuage orageux est généralement de type "cumulo-nimbus", occupant une surface de plusieurs dizaines de km² et ayant une épaisseur de plusieurs km. Sa base se trouve à environ deux à trois km au dessus du sol, et son volume peut dépasser les centaines de km³. Sa partie inférieure est constituée par des gouttelettes d'eau chargées négativement, la partie supérieure est constituée de cristaux de glace chargés positivement (fig.1). Souvent un îlot de charges positives est inséré dans la masse négative. Leur formation est due à l'apparition des courants atmosphériques ascendants.

Si les conditions de température et d'humidité sont convenables il se produit une détente de l'air humide au cours de son ascension avec refroidissement entraînant la condensation [3].

Ce nuage constitue un véritable dipole dont les charges vont induire entre le sol et le nuage un champ électrique d'intensité variable. Les mécanismes de séparation des charges électriques dans les nuages sont très complexes [1].

I.2 LE CHAMP ELECTRIQUE AU SOL ET L'EFFET DE COURONNE

Les charges négatives étant plus près du sol, il en résulte la formation de charges positives à la surface du sol, par effet d'induction [1]. Ceci va créer un champ électrique variant dans de fortes proportions. Alors qu'il était positif et de l'ordre de la centaine de volts par mètre par beau temps il va commencer à s'inverser puis croître considérablement pour atteindre des valeurs comprises entre 15 et 20 kV/m (fig 2).

Cette valeur de 15 à 20 kV/m se mesure sur un sol parfaitement plan. Lorsqu'il y a des aspérités (tours, arbres, montagnes, pylones...) le champ se renforce à leur sommet. Le renforcement du champ électrique peut être calculé simplement par les lois de l'électrostatique; quand l'aspérité est géométriquement de forme simple (hémisphère) posée sur un plan, le renforcement du champ est le triple du champ homogène (fig3). Quand la sphère se développe pour devenir un ellipsoïde de plus en plus pointu, le renforcement du champ est de plus en plus fort [1]

I.3- CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre

Il existe autour du globe terrestre entre 2000 et 5000 orages produisant une centaine de décharges électriques par seconde; Un tiers de celles ci frappe la terre, c'est la foudre, et deux tiers jaillissent entre nuages ou à l'intérieur d'un même nuage on parle alors d'éclairs, ou de décharges intra-nuage (fig4).

La première phase d'un coup de foudre est toujours une prédécharge lumineuse appelée "traceur". Cette prédécharge, à son origine, soit au niveau du sol et elle progresse vers le nuage, d'où leur classification :

- coup de foudre descendant.
- coup de foudre ascendant.

.../...

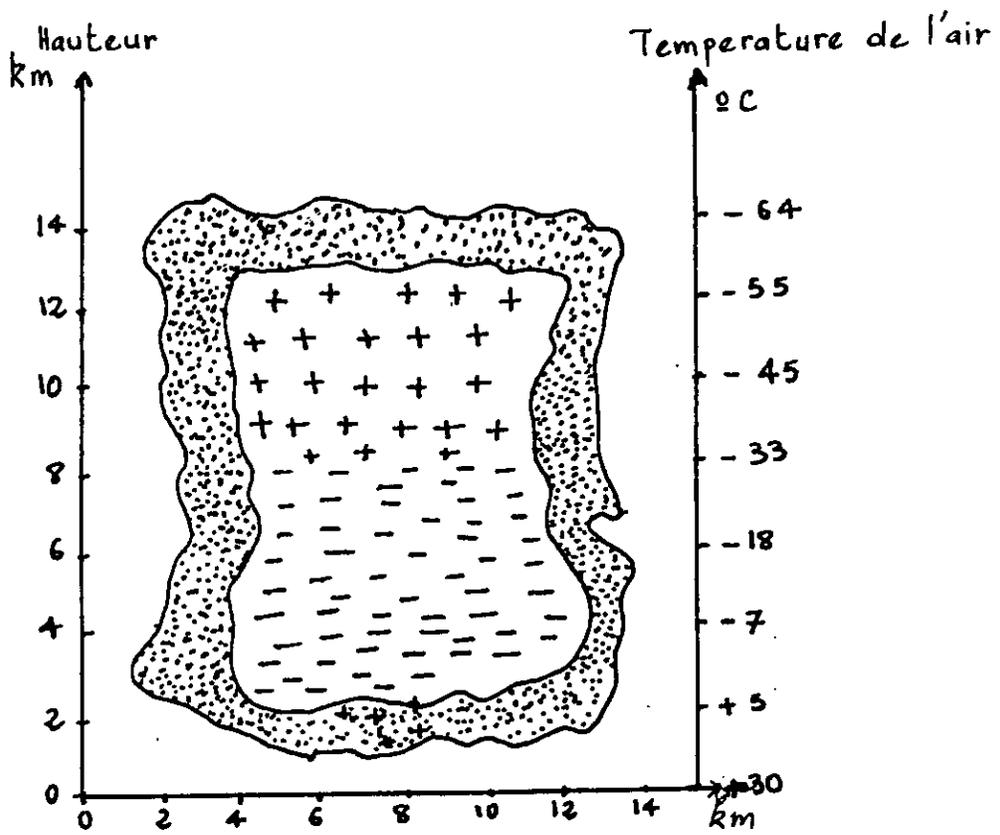


Fig1 : structure Générale d'un nuage orageux [1]

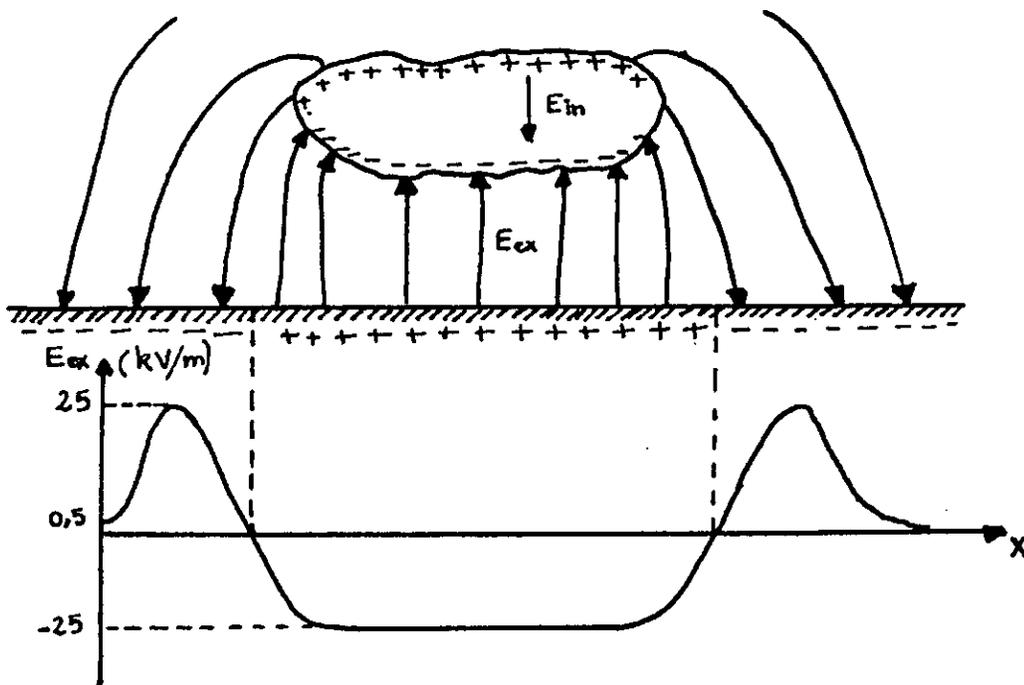


Fig2: Répartition spatiale et au niveau de la terre des champs électriques durant un orage [2].

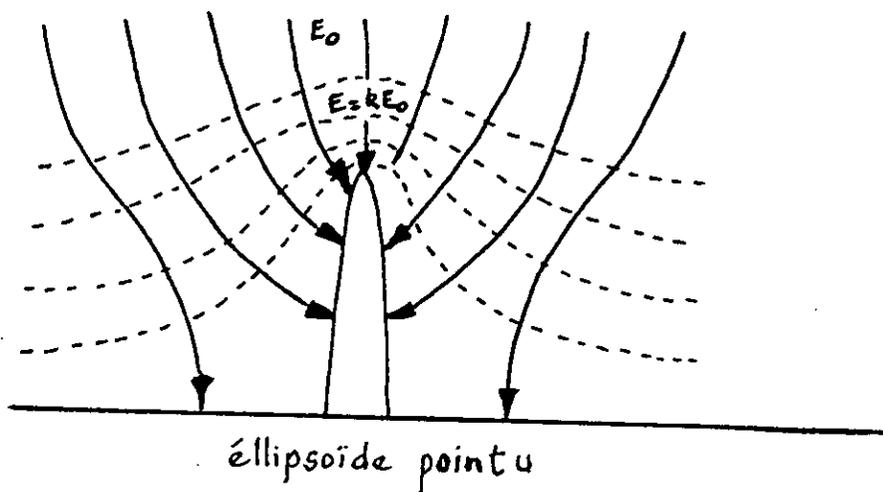
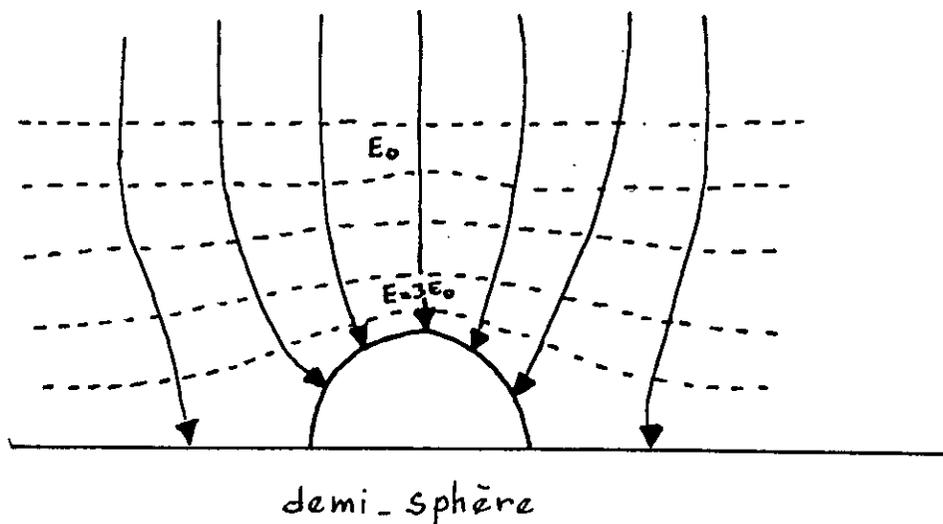
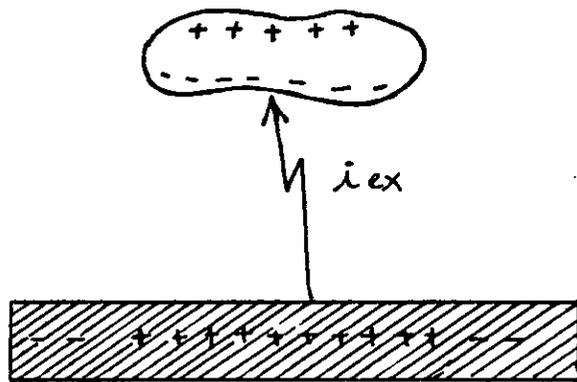
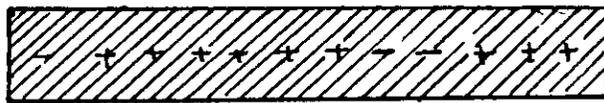


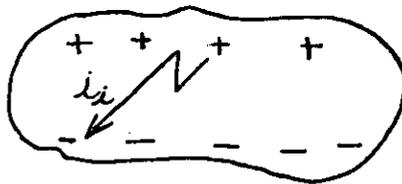
Fig 3: Déformation des lignes de force du champ au voisinage d'une aspérité et renforcement du champ [1]



(a) : Décharge nuage - terre (et réciproquement).



(b) : Décharge entre nuage



(c) : Décharge à l'intérieur des nuages.

(Fig 4) : Types de décharges de foudre [2]

En second lieu, on classe les coups de foudre selon la polarité du traceur (fig5).

- Un coup de foudre est négatif si la charge du traceur est négative.

- Un coup de foudre est positif si la charge du traceur est positive

[1].

Dans les régions à climat tempéré, la majorité des coups de foudre environ (80%) est du type descendant négatif. [1].

1.4 LE DEROULEMENT D'UN COUP DE Foudre :

1.4.1 coup de foudre ascendant :

Les effluves d'effet de couronne apparaissant au sommet des aspérités peuvent se développer d'autant plus loin et avec d'autant plus d'intensité que les dimensions de la proéminence sont importantes.

A partir d'une certaine intensité d'effluves le phénomène se modifie brusquement et peut se développer suffisamment loin pour atteindre le nuage, c'est le coup de foudre ascendant (fig.6)

Ces coups ascendants sont fréquemment observés à partir de tours de télévision dont la hauteur dépasse 300 m. Au cours de sa progression, le traceur se ramifie plusieurs fois et on assiste à la formation d'une arborescence dont la croissance jusqu'au nuage peut durer d'une dizaine à quelques dizaines de millisecondes [1].

Au moment où les ramifications atteignent la base du nuage, il s'établit une décharge qui écoule des courants dont l'intensité est de l'ordre de milliers d'Ampers [1]

1.4.2) coup de foudre descendant :

Celui ci 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.

A l'inverse du traceur positif, le traceur négatif se développe en progressant par bonds successifs de quelques dizaines de mètres séparés par des temps d'arrêt de 40 à 100 μ S. C'est le "stepped leader". (fig.7)

Au fur et à mesure de sa progression, on assiste à une ramification et la luminosité de canal s'accroît, sa pointe porte une forte concentration de charges. Dès que la pointe du traceur approche le sol, des prédécharges ascendantes se développent à partir de celui ci, le champ électrique sera très intense au niveau du sol surtout au voisinage des aspérités des objets pointus.

.../...

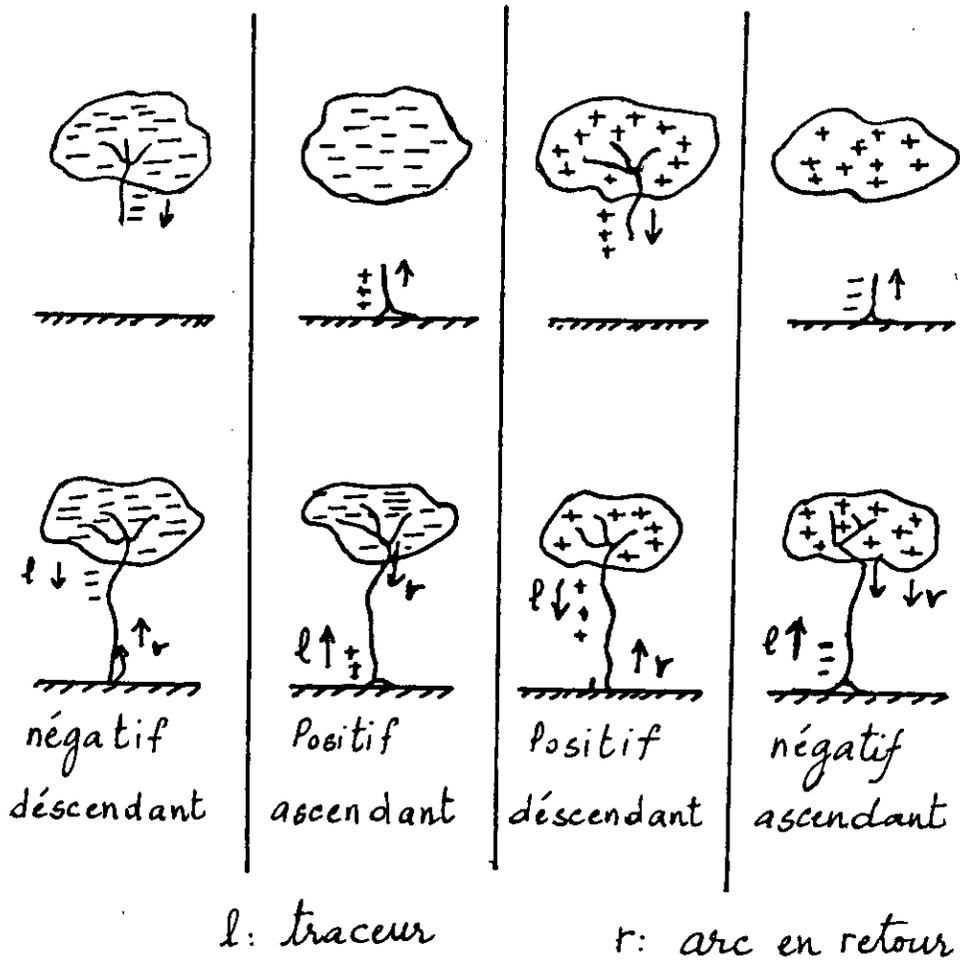


FIG 5 : Classification des Coups de foudre
selon K. BERGER [3]

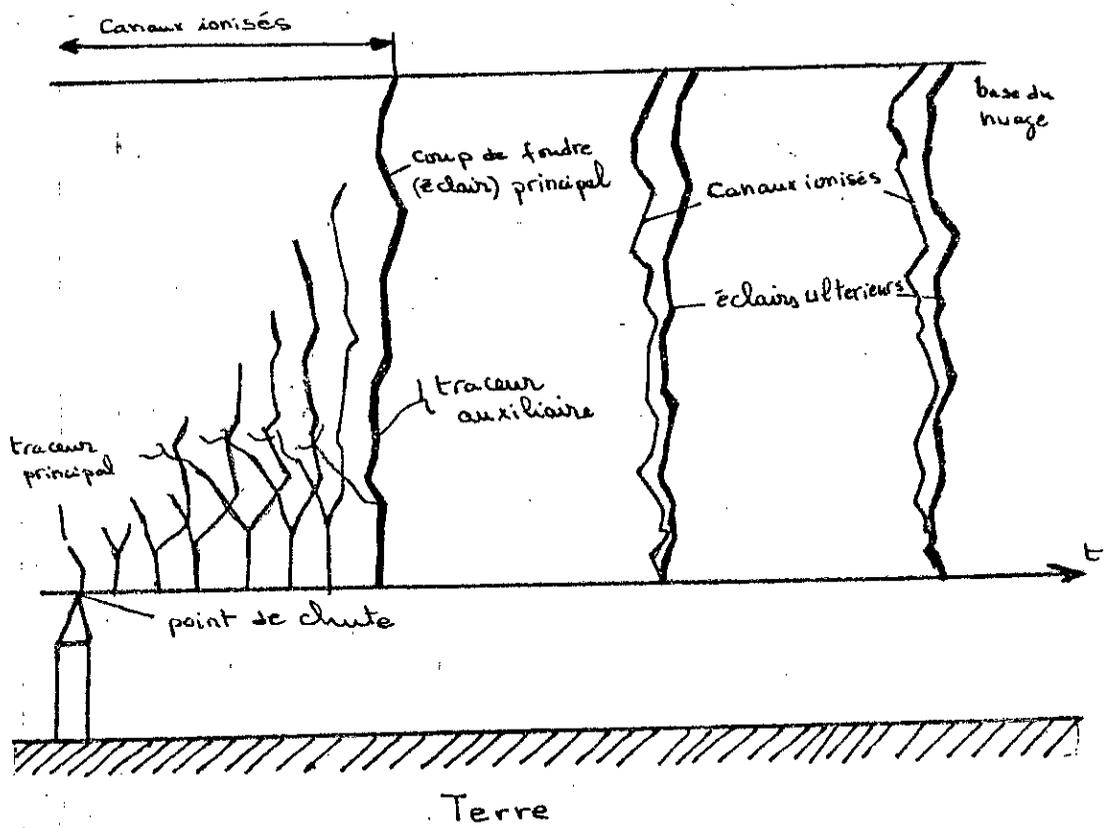


FIG 6: Coup de foudre ascendant [2]

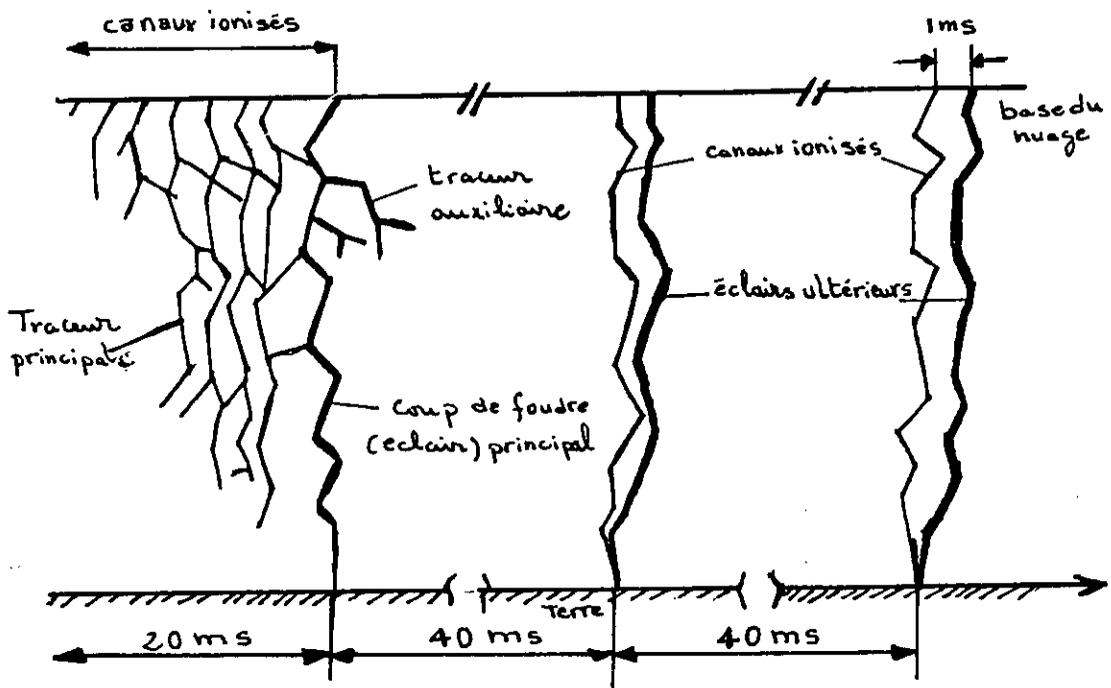


FIG 7: Coup de foudre descendant
Terrain plat. [2].

La distance, entre la pointe du traceur et le sol juste avant le saut final, est appelée distance d'amorçage. [3]

Lorsque l'une de ces prédécharges ascendantes et le traceur par bonds se rejoignent il s'établit un court-circuit entre le nuage et le sol qui va permettre le passage d'un courant à forte intensité constitué par les charges superficielles positives du sol. On observe alors un trait fortement lumineux qui va du sol au nuage c'est l'arc en retour ou "return strok" le courant dans le return strok est de l'ordre de quelques kA à 250 kA. [3]

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 le canal du traceur par bond : c'est le "dart leader". Cette décharge est ensuite suivie d'un return strok comme précédemment [3].

1.5) LOCALISATION DES COUPS DE Foudre :

Il existe sur terre, des zones localisées particulièrement fourdroyées qu'on appelle "nids d'orage". Trois facteurs peuvent expliquer cette concentration de coup de foudre.

* FACTEURS GEOLOGIQUES :

Nous pouvons dire que la fréquence de foudroiement du sol dépendrait 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 [4].

* FACTEURS TOPOLOGIQUES :

L'existence de certaines conditions atmosphériques caractéristiques à une région donnée, favorisent la formation des orages de chaleur. La présence de vallées et de fleuves canalise le mouvement de l'air, favorisant la formation des orages [4].

* CONCENTRATION IONIQUE DE L'AIR :

Elle peut expliquer la présence de nids d'orage mais aucune donnée expérimentale n'existe jusqu'à présent pour affirmer ce phénomène [4].

1.6 PARAMETRES ELECTRIQUES DES COUPS DE Foudre :

1.6.1 formes de composantes impulsionnelles de la foudre

a) formes des décharges négatives:

Les coups de foudre négatifs présentent une très grande variété de combinaisons de courants impulsionnels et de courants "continus" chacun d'entre eux ayant des amplitudes et des durées diverses [3].

.../...

La durée de front de la première décharge est de l'ordre de 5 à 15 μ S ; La durée de queue est de l'ordre de la centaine de micro-secondes [3]. (fig 8.a)

Pour les décharges secondaires "subséquentes" la durée de front est très courte, inférieure à la micro-seconde mais la queue d'onde est bien plus régulière que dans la première décharge. (fig 8.b)

b) forme de décharges positives:

Les coups de foudre positifs sont constitués d'une seule décharge durant de 0.1 à 0.2 S. La durée du front de l'onde varie entre 20 et 50 μ S, mais l'amplitude du courant est supérieure à 100 kA [1]. (fig 8.c)

1.6.2) distribution des amplitudes:

La distribution des amplitudes des courants de foudre obéit à une loi normale; en effet, si l'on porte en abscisse le logarithme de l'intensité (en kA) du coup de foudre et en ordonnée la probabilité qu'a un coup de foudre de dépasser une intensité donnée (en échelle gaussienne), on obtient sensiblement des droites [3]. Diverses expressions ont été proposées pour calculer cette probabilité.

$$-\text{Log}(\psi) = 2 - I/60 \quad \text{eq 1}$$

I : courant de crête en kA

ψ : probabilité pour que le courant soit supérieur ou égale à I en (%).

Les conséquences les plus importantes que l'on peut tirer de ces courbes de distributions (fig.9) sont:

-L'amplitude des courants de foudre positifs peut atteindre de très fortes valeurs supérieures à 150 kA dans 10 % des cas.

-L'amplitude des courants de foudre négatifs est en générale plus faible, la valeur à 10% étant de l'ordre de 50 kA.

-La valeur médiane de l'intensité des coups positifs (valeur de 50% de distribution globale) se situe autour de 50 kA

-La valeur médiane de l'intensité des coups négatifs se situe vers 18 kA [3].

1.6.3 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.

Les courants de foudre négatifs ont une raideur de front supérieure à celle des coups de foudre positifs. Pour 50% des coups de foudre négatifs la raideur de front est supérieure à 20 kA/ μ S, alors que pour les coups foudre positifs la moyenne est de 2 kA/ μ S (fig.10)

D'autres grandeurs électriques caractérisant la foudre ; La charge totale Q d'un coup de foudre, l'énergie présumée. [1]

.../...

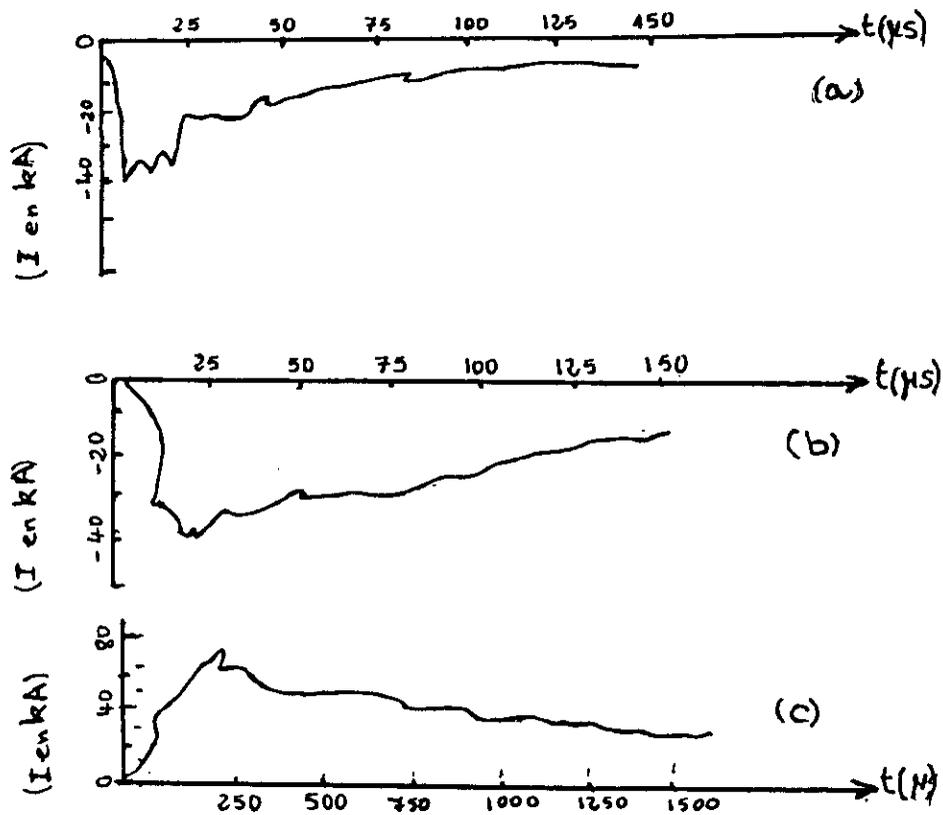


FIG 8: Forme d'onde d'un Courant de Foudre. [1]

- (a): Courant de la 1^{ère} décharge (coup de Foudre négatif).
- (b): Courant de la 2^{ème} décharge (coup de Foudre négatif).
- (c): Coup de Foudre Positif.

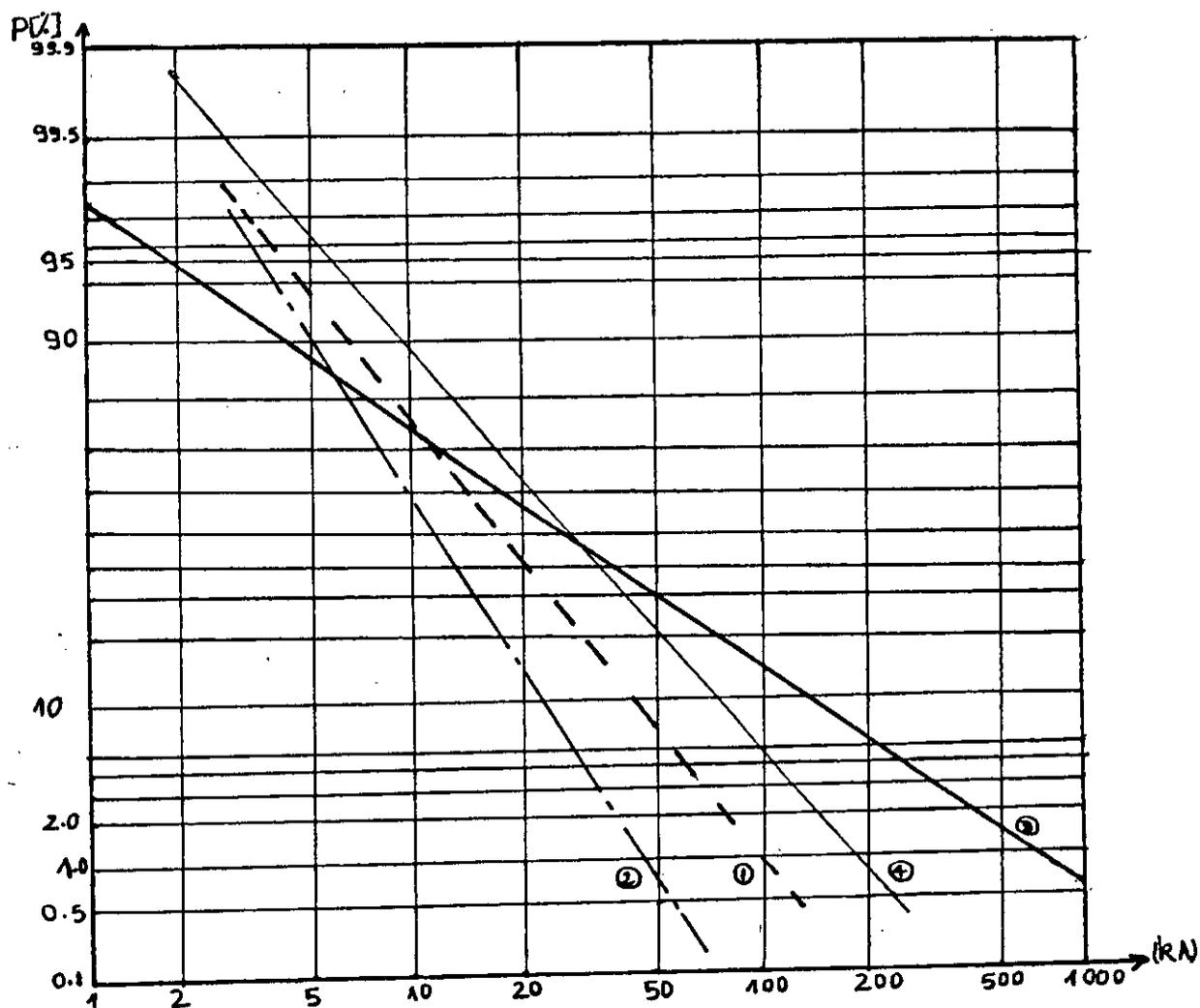


FIG 9: Distribution statistique des amplitudes des courants de foudre [3].

① coup de foudre - 1^{ère} décharge

③ coup de foudre

② coup de foudre - 2^{ème} décharge

④ moyenne.

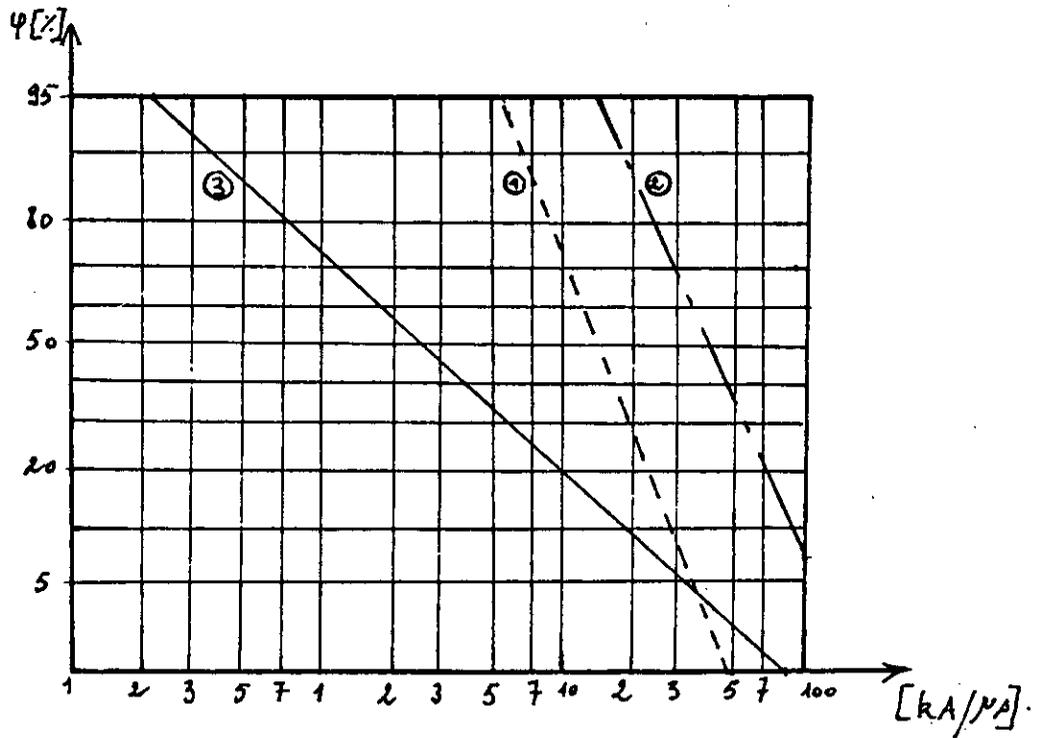


FIG 10: Distribution statistique des
Raideurs de front. [1].

- ① 1^{ère} décharge négative.
- ② 2^{ème} décharge négative.
- ③ décharge positive.

1.7) EFFETS D'UN COUP DE Foudre :

1.7.1 effets de la charge:

Elle varie entre 10 à 300 C , ses effets sont caractérisés par la fusion des conducteurs [2].

1.7.2 effets de l'intégrale d'action:

Elle représente l'énergie dépensée par effet Joule dans une résistance d'un OHM [2].

1.7.3 effets dynamiques:

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

1.7.4 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 [2].

1.7.5 effets électrochimiques:

Il y a création d'ozone suivant la réaction :



1.7.6 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 [2].

.../...

* CHAPITRE 2 *
* DECHARGE EN SOL HOMOGENE *

2.1 LA PROTECTION CONTRE LA Foudre EN SOL HOMOGENE

Le problème majeure qu'ont à confronter les ingénieurs dès les débuts du transport de l'énergie électrique est : la foudre et ses effets, représentant ainsi un danger pour les personnes et pour le matériel surtout au niveau des réseaux électriques. Il est donc indispensable de connaître, pour une protection efficace, les surtensions engendrées par un coup de foudre dans ces réseaux.

2.1.1 Surtension de foudre dans un réseau

Quand un réseau d'exploitation est exposé à un coup de foudre, une surtension est provoquée et son effet diffère suivant le point d'impact.

Quatre cas peuvent alors se produire :

a)- Coup de foudre direct sur un conducteur de phase.

Lorsqu'un coup de foudre tombe sur une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact (fig 11) entraînant ainsi une surtension dont la valeur est $u(t) = Z \frac{di(t)}{dt}$ équa. 2

Z étant l'impédance d'onde du conducteur de phase.

L'Amorçage de la chaîne d'isolateurs du pylone foudroyé est assuré par l'augmentation de la tension.

L'onde de tension qui continue la propagation sera donc :

-Soit une onde pleine si $I (Z/2) <$ tension d'amorçage au pylone

-Soit une onde coupée si $I (Z/2) \geq$ tension d'amorçage au pylone

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

b)- Coup de foudre sur un pylone ou sur un câble de garde

L'amorçage en retour :

Concernant la protection contre des coups de foudre directs sur les conducteurs actifs, on peut placer au dessus de ces conducteurs, des câbles de garde reliés électriquement à la terre et qui ont pour fonction de trainer les coups de foudre vers eux.

Lorsque la foudre tombe sur un câble 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'isolateurs dépend de l'impédance du pylone et du courant qui le traverse.

$$u(t) = R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad \text{Equ 3. (fig 12)}$$

Lorsque cette tension atteint la tension disruptive de l'isolement de la ligne, il se produit un amorçage dit "en retour"

.../...

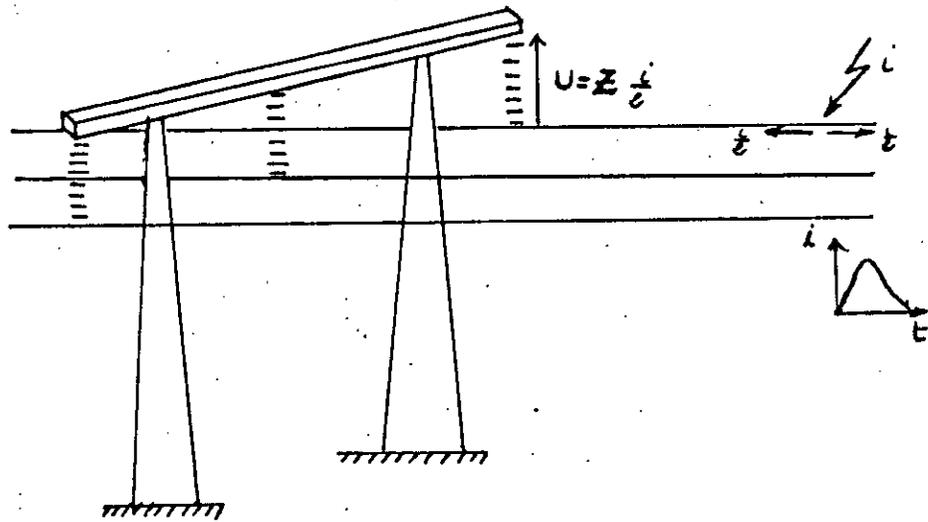


FIG 11: Foudroiement d'un Conducteur de phase [6]

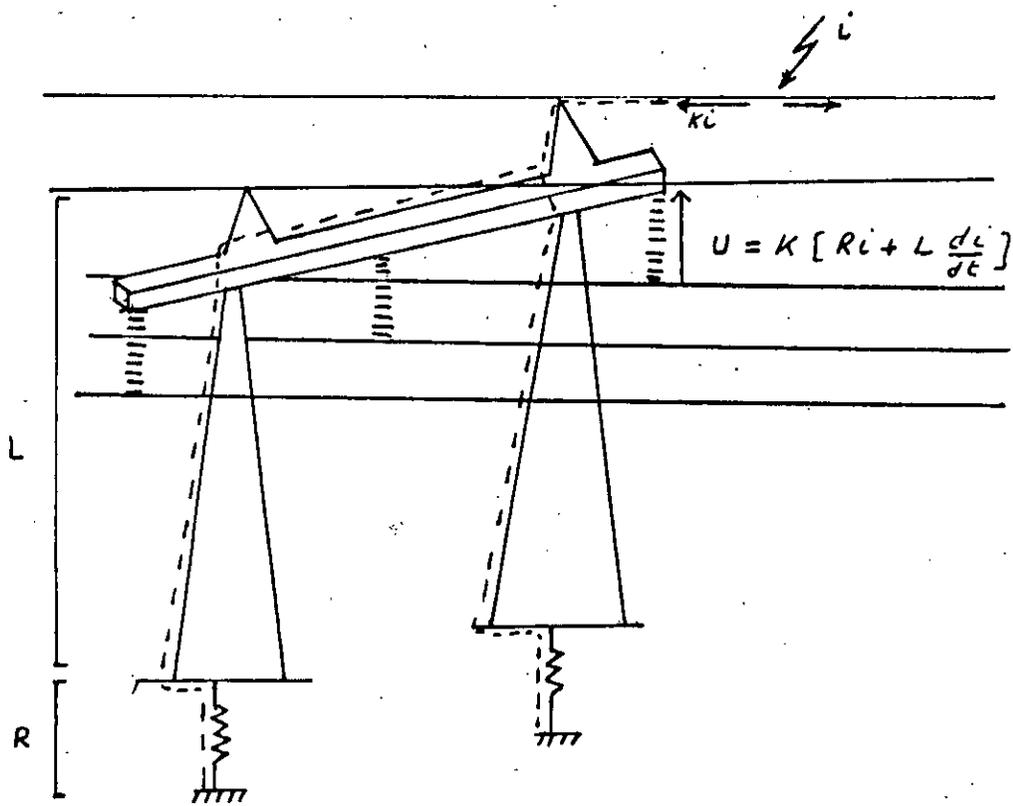


FIG 12: Foudroiement d'un Cable de garde. [6].

c)- Surtension dans un poste

quand un coup de foudre frappe une partie vive d'un poste raccordé à une ou plusieurs lignes extérieures, la surtension sur les barres est donnée par :

$$u(t) = \frac{Z}{n} i(t) \quad \text{ou} \quad \frac{2 U_c}{n} = U(t)$$

Z : impédance caractéristique des lignes
n : nombre de lignes arrivant au poste

Le cas le plus défavorable est pour $n=1$, il y a un dédoublement de la surtension qui risque de produire un amorçage même si celui-ci n'a pas eu lieu en ligne. Pour cette raison la mise en place de parafoudre ou éclateurs est indispensable.

Le doublement de surtension a également lieu à l'arrivée de l'onde au poste, si la disjonction (ou le sectionneur) de la ligne est ouvert. Cette surtension est la somme de l'onde de choc de foudre et la tension entre phases à fréquence industrielle sur le poste. Sa valeur est : $U_T = 2 U_c + U_c \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$

Equ 4 (fig 13)

d)- 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 deux causes essentielles :

- annulation rapide du champ électrique au moment du coup de foudre qui induit une surtension
- le couplage électromagnétique entre la ligne et le canal de foudre qui se produit lors de la formation de l'arc en retour.

2.2 SEVERITE ORAGEUSE

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

2.2.1 Niveau Kéranique

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 plusieurs facteurs extérieurs, cependant elle est suffisante pour avoir une distribution statistique des coups de foudre dans une région donnée.

2.2.2 Densité de coups de foudre au sol

La notion de densité de coups de foudre par Km^2 et par an a été introduite à cause de la mauvaise connaissance de la notion du niveau kéranique.

A partir des résultats fournis par des compteurs CIGRE, des chercheurs ont proposé des formules empiriques.

.../...

$$N_g = \frac{Y_g \cdot K}{\pi R_g^2} \quad \text{Equa 5. [11]}$$

N_g : nombre de coups de foudre par Km^2 et par an

* Y_g : facteur de correction =

$$\frac{\text{Nbre coups de foudre ayant actionné le compteur}}{\text{Nbre total enregistré par le compteur}}$$

K : Nombre total de coups enregistrés

R_g : Rayon d'action du compteur

Une autre expression proposée par Gary est :

$$N_g = N_s(0.1 + 0.35 \sin \alpha)(0.4 \pm 0.2) \quad (\text{Equ 6 [1]})$$

N_s est le niveau Keraunique

α est la latitude de l'endroit considéré en degrés

2.3 MOYENS DE PROTECTION CONTRE LA FOUDRE

Les dispositifs les plus employés sont les parafoudres et les paratonnerres. Les parafoudres sont utilisés pour la protection de l'appareillage dans un réseau, les paratonnerres servent à protéger une certaine portion de l'espace des coups de foudres directes.

2.3.1 Protection par parafoudre

L'importance de ces appareils réside dans la protection des réseaux H.T; ils se placent en général entre une phase et la terre (fig 14).

Les parafoudres 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.

Il existe deux types de parafoudre:

-les parafoudres anciens.(parafoudre électrolytiques à jet d'eau et le parafoudre à expulsion recommandé par la C.E.I (publication 99.2)

-Les parafoudres à résistances variables: Les plus répandus constitués d'un ou plusieurs éclateurs connectés en serie avec une ou plusieurs résistances à caractéristique non linéaires.

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. [12].

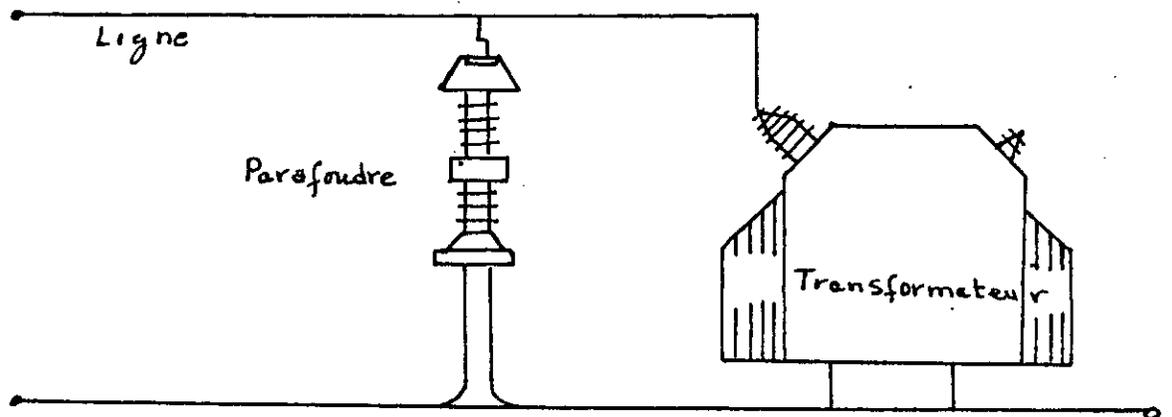


FIG 14: SCHEMA D'UN PARAFONDRE. [4]

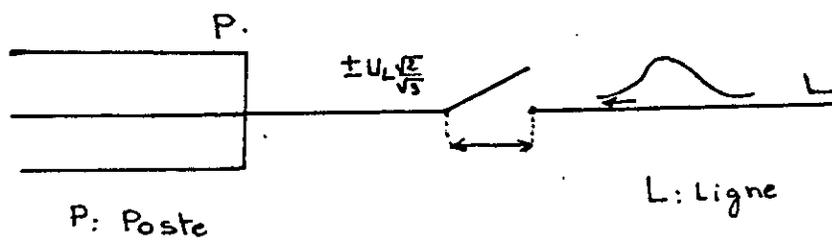


FIG 13: Tension aux bornes d'un disjoncteur ou d'un sectionneur, ouvert, en cas de surtension sur une ligne. [6].

2.3.2 Protection par paratonnerre

La protection des personnes et des batiments peut-etre assurée grâce à l'installation de paratonnerres pour lesquels on veillera à ce que le paratonnerre et sa descente soient bien dimensionnés et installés en ligne droite et à ce que l'impédance de terre soit faible.

Le paratonnerre est constitué d'organe capteurs, de conducteurs de descente et de prise de terre.

*ORGANES CAPTEURS :

Il sont constitués d'une ou plusieurs tiges verticales servant à capter la foudre.

*LES CONDUCTEURS DE DESCENTE :

On appelle descente de paratonnerre la liaison entre l'extrémité du paratonnerre et la prise de terre, elle doit être la plus courte possible afin de maîtriser le trajet du courant, et conçue pour supporter des courants de fortes intensités.

Leur section est calculée suivant la formule:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{K} \quad \text{équ 7 [13]}$$

S : section du conducteur (mm²)

I : courant en A

t : durée d'application du courant (sec)

K : facteur dépendant de la nature du matériau utilisé

*LES PRISES DE TERRE :

Leurs résistance doit être très 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 crée une couche de terre isolante (vitrification)

- *Veiller à ne pas atteindre les canalisations à proximité.

2.3.3 efficacite des paratonnerres:

Le modèle électro-géométrique basé sur la distance d'amorçage du traceur principal montre que des courants de foudre:

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

Des travaux de recherches basés sur l'analyse du foudroiement des lignes ont conduit ARMSTRONG GOLD et WHITEHEAD à l'élaboration d'un modèle électro-géométrique pour les zones d'attractions d'un paratonnerre.

.../...

2.4 LE MECANISME D'IMPACT ET LE MODELE ELECTROGEOMETRIQUE:

2.4.1 le mecanisme d'impact:

Le traceur par bond est un canal ionisé comportant un excédent de charges négatives s'il est issu de la partie négative d'un nuage. Lorsque le traceur se rapproche du sol il y a apparition de décharges ascendantes positives dues à l'accroissement du champ électrique au niveau du sol.

L'une des décharges la plus proche, ou celle qui a progressé le plus rapidement, entre en contact avec le traceur. Le canal ionisé est dès lors continu depuis le sol jusqu'au nuage [3].

Dans le cas du traceur positif nous pouvons considérer que sa pointe est l'origine d'un certain nombre de filaments couronne ou "streamers", et dont la longueur est liée au potentiel de la pointe [6]. Lorsque le traceur se rapproche du sol, il n'y a pas de précharges ascendantes, ou, du moins elles se forment beaucoup plus difficilement que dans le cas précédent. L'un des filaments couronne va entrer en contact avec une aspérité située à la surface du sol. Le chemin conducteur est alors réalisé avec le nuage, permettant de la même sorte le passage de l'arc en retour.

2.4.2 le modele electrogeométrique:

Ce modèle a pour objet la prédétermination des points d'impacts les plus probables de la foudre afin de prévoir si nécessaire les dispositifs de protection. Selon ce modèle, c'est l'objet qui se trouve en premier à la distance d'amorçage de la pointe du 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 :

$$d = 10 I^{4/3}$$

I : courant de foudre en (kA)

d : distance d'amorçage en (m)

2.5 MISE EN OEUVRE DU MODELE ELECTRO GEOMETRIQUE :

2.5.1 la methode de la sphere fictive:

Le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera le premier à la distance d'amorçage D du traceur descendant même si l'objet est le sol lui-même. Tout ce passe comme si la pointe du traceur était entourée d'une sphère fictive de rayon D, centrée sur elle, et comme si cette sphère accompagnait rigidement la pointe du traceur dont la trajectoire est aléatoire. À l'approche du sol, le premier objet que touchera la sphère déterminera le point d'impact du coup de foudre.

On imagine que la sphère fictive de rayon D peut atteindre le sol sans perdre le contact soit avec ce dernier, soit avec un objet proéminent. Donc si au cours du mouvement, la sphère entre en contact avec les dispositifs de protection (tige verticale, fil horizontal, cage de Faraday...) sans jamais pouvoir toucher l'objet à protéger, la protection est assurée, dans le cas contraire où la sphère entre en contact avec l'objet à protéger, le dispositif de protection devra être revu de telle sorte qu'aucun contact avec l'objet ne puisse se produire [3].

A ce titre d'exemple, appliquons la méthode de la sphère fictive au fonctionnement d'un paratonnerre. ce dernier est une tige de hauteur H placée sur le sol plan. Soit alors un traceur de charges négatives, et soit D le rayon de la sphère fictive associée. Au cours de sa trajectoire de descente, la sphère pourra atteindre le sol suivant trois possibilités [3].

-Si la sphère entre en contact uniquement avec la tige verticale (cas A), c'est celle ci qui constituera le point d'impact du coup de foudre.

-Si la sphère entre en contact avec le sol sans toucher la pointe (cas B), le coup de foudre touchera le sol au point s.

-Enfin si la sphère entre en contact simultanément avec la tige et avec le sol, le coup de foudre pourra toucher soit l'une soit l'autre, mais l'impact ne pourra jamais se produire dans la zone de protection de la tige verticale. Cette zone est obtenue avec la sphère de rayon D1 correspondant au courant I de foudre. (fig 15)

Il est évident que la zone de protection assurée par un paratonnerre dépend essentiellement du rayon D de la sphère et par conséquent de l'intensité du coup de foudre. Si D1 est inférieur à H, hauteur de la tige, le contact entre la sphère et la tige peut avoir lieu bien au dessous de la pointe, ce qui explique parfaitement des impacts à mi hauteur.

Si on considère l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol : le lieu des centres de ces sphères déterminera la zone d'attraction de la tige. (fig 16)
Tant que $D < H$, le lieu est une droite issue du pied de la tige et inclinée à 45° . A l'instant où D atteint la valeur H, et pour $D > H$ ce lieu devient une parabole P.

Si l'on considère un système de coordonnées xoy ou ox représente le niveau du sol et oy la verticale et si on place la tige verticale oA de hauteur H nous pourons tracer la parabole P (citée précédemment) définie par les points à égale distance de la pointe H, de la tige et du sol. Son équation est donnée:

$$H^2 - 2Hy + x^2 = 0 \quad \text{équ 8 [1]}$$

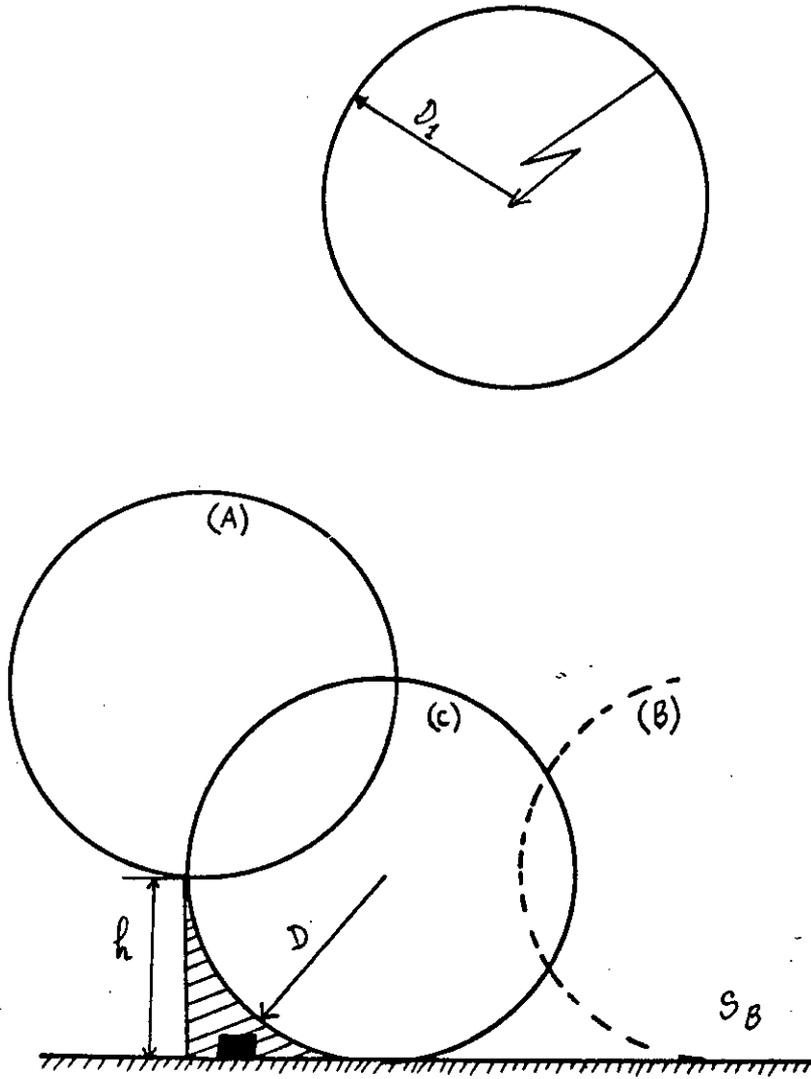


FIG 15: Zone de protection d'une tige verticale selon la méthode de la sphère fictive [3].

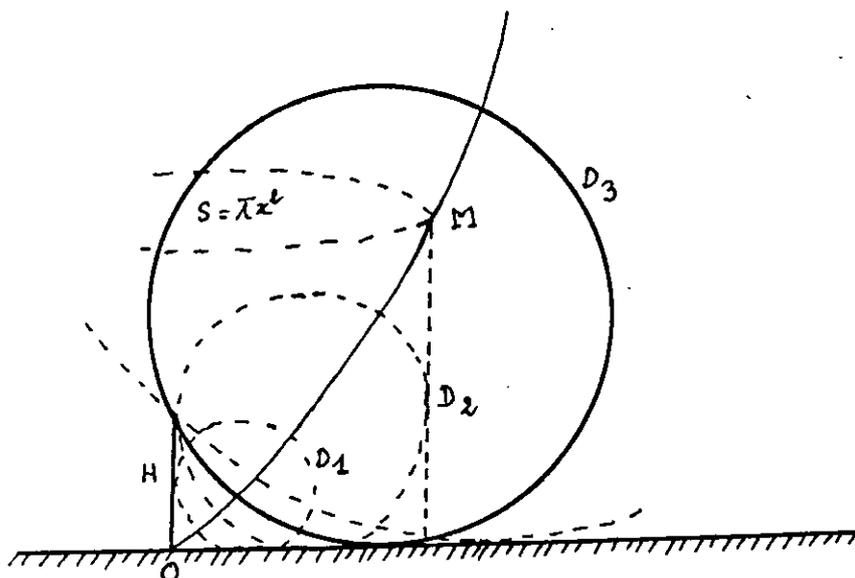


FIG 16: Définition de la zone de capture d'une tige verticale [3].

Nous pouvons définir deux (2) zones: I et II. (fig 17)
 D'après l'hypothèse de la distance d'amorçage, tout traceur se présentant dans la zone I atteindra directement le sol sans jamais être capté par la pointe A.
 Dans le cas où le traceur se présente dans la zone II définie par OY et P, il sera capté par la tige s'il est à une distance inférieure à D de A.
 La limite de protection est donc l'ensemble des points de la parabole tels que: $AM \leq D$
 or $AM = y$, par définition de la parabole on remplace y par D.

$$x \leq H \sqrt{\frac{2D}{H} - 1} \quad \text{équ 9 [1]}$$

x est le rayon de capture de la tige pour un coup de foudre caractérisé par une distance d'amorçage D donnée c'est à dire pour un courant I d'intensité donnée.
 Deux cas peuvent se produire suivant la valeur de D

1er cas : $D \geq H$

La zone d'attraction est le parabololoïde dont la base est un cercle de centre H et de rayon x. (fig 18)
 La surface de capture en fonction du courant est:

$$S(i) = \pi x^2 = \pi (2DH - H^2) \quad \text{équ 10 [1]}$$

2eme 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 est $S(i) = \pi D^2$ équ 11. [1]. (fig 18)

On constate que le rayon de capture d'une tige verticale est d'autant plus grand que le coup de foudre sera intense.

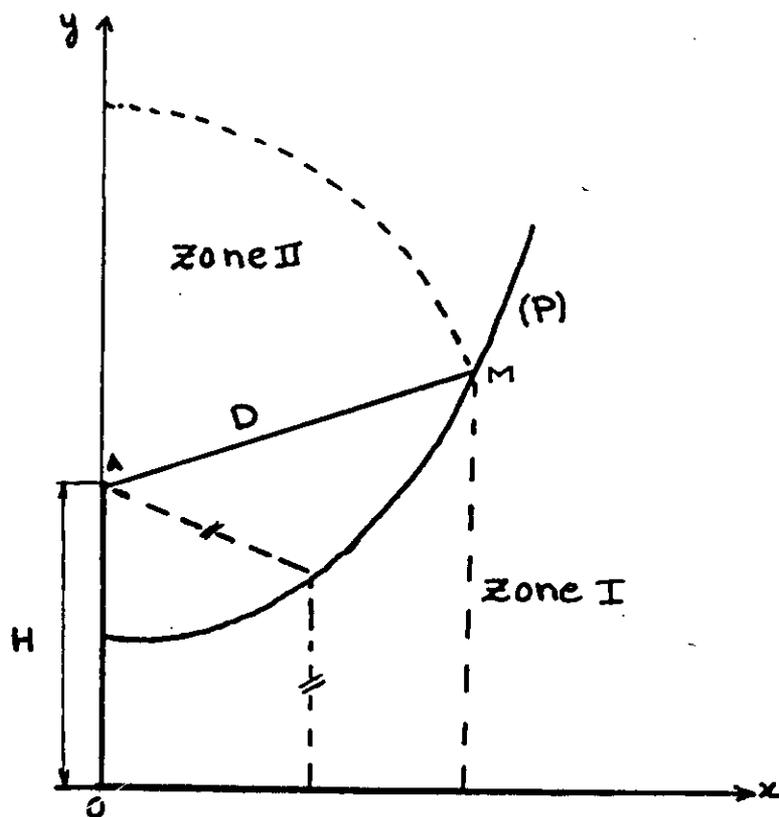
2.6 METHODE GRAPHIQUE DE LA DETERMINATION DES ZONES DE PROTECTION

Cette méthode est basée sur le principe de la sphere fictive; selon ce dernier, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera, le premier à la distance d'amorçage D, du traceur descendant.

La tête du traceur est considérée comme étant le centre d'une sphere de rayon D.

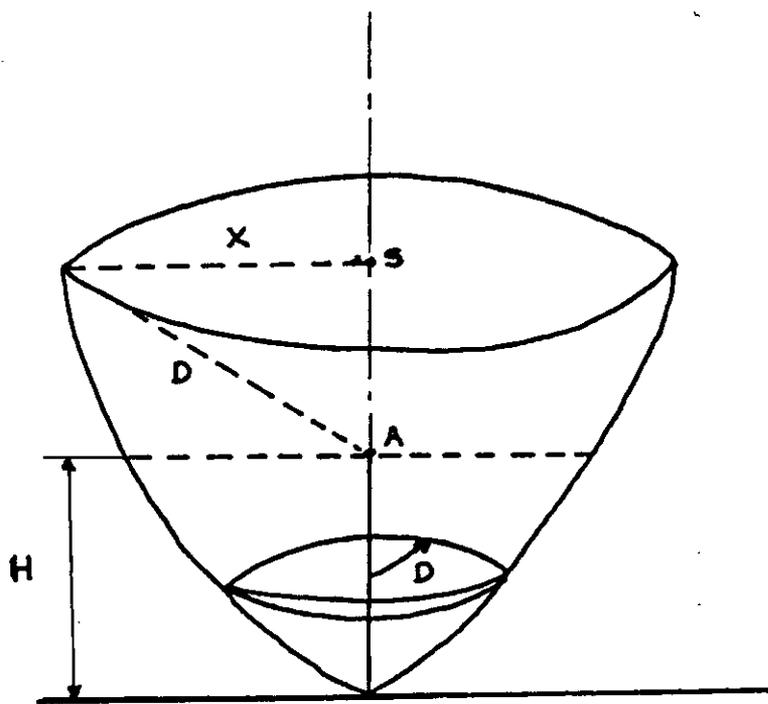
Pour déterminer les zones de protections, on fait rouler la sphere sur le sol dans toutes les directions sans jamais perdre le contact soit avec le sol, soit avec un objet proéminent.

On applique cette méthode pour la détermination des zones de protections pour les différents cas suivants:



Fig(17) : ZONE DE CAPTURE D'UNE TIGE VERTICALE [1]

SELON LE MODELE ELECTROGEOMETRIQUE



FIG(183) SURFACE DE CAPTURE EQUIVALENTE D'UNE
TIGE VERTICALE [1]

2.6.1 Tige verticale

Dans ce cas on a deux possibilités: $D \geq H$ et $D < H$

- $D \geq H$: la zone de protection et la partie hachurée à la figure 19 dont le rayon de protection au sol est:

$$X_0 = \sqrt{2HD - H^2} \quad \text{équ 12} \quad [1]$$

- $D < H$ (fig 20)

$$X_0 = D$$

2.6.2 Cas de deux tiges verticales

Soit H la hauteur des deux tiges et $2a$ la distance entre elles.

la protection est efficace si $a < D$

- $D > H$ (fig 21)

La hauteur P minimale protégée au centre vaut :

$$P = D - \sqrt{(D-H)^2 + a^2} \quad \text{équ 13} \quad [1]$$

La zone de protection au sol est calculé pour le cas critique, c'est à dire sur l'axe verticale passant au milieu des deux tiges.

Le rayon de protection :

$$X_0 = \sqrt{2HD - H^2 - a^2} \quad \text{équ 14} \quad [1]$$

- $D < H$: la hauteur $P = D - a$ (fig 22)
le rayon de protection $X_0 = \sqrt{D^2 - a^2}$

2.6.3 Cas de quatre tiges verticales

Soit quatre tiges disposées en un carré de côté $2a$. Le cas le plus défavorable est celui d'une approche verticale

la protection est efficace si $D > a\sqrt{2}$ (fig 23)

$$\text{la hauteur } P = H - D + \sqrt{D^2 - 2a^2} \quad \text{équ 15} \quad [1]$$

X_0 : est le même que celle de deux tiges :

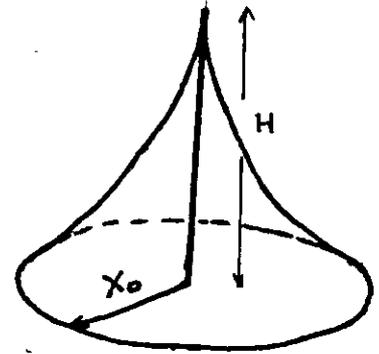
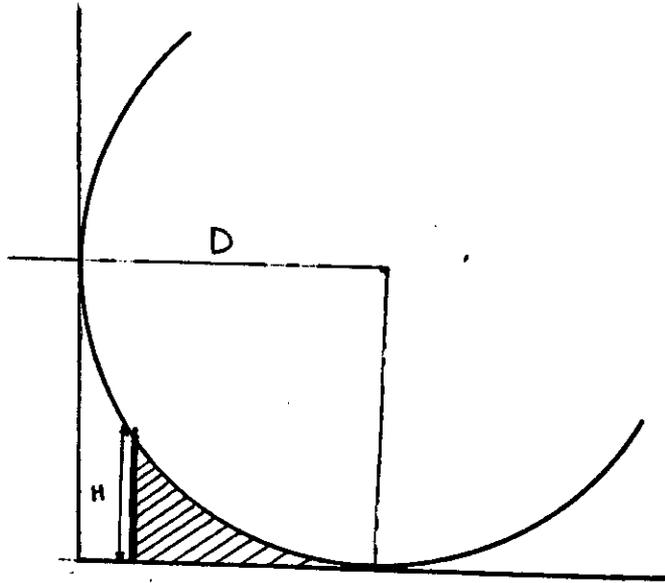


FIG 19 Zone de protection d'une tige verticale
 Dans le cas ou $D \gg H$ [5]

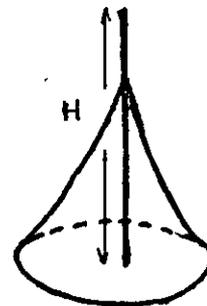
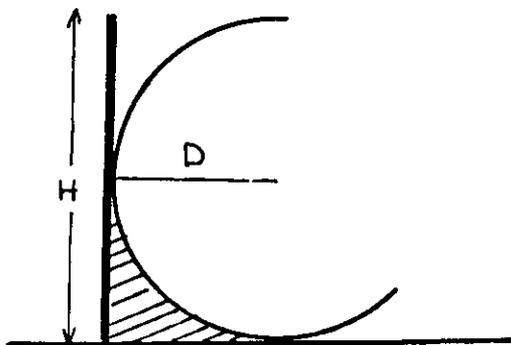
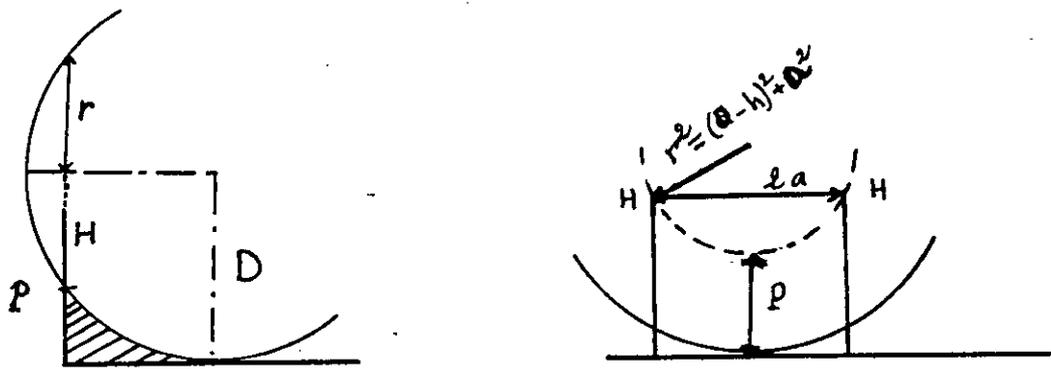
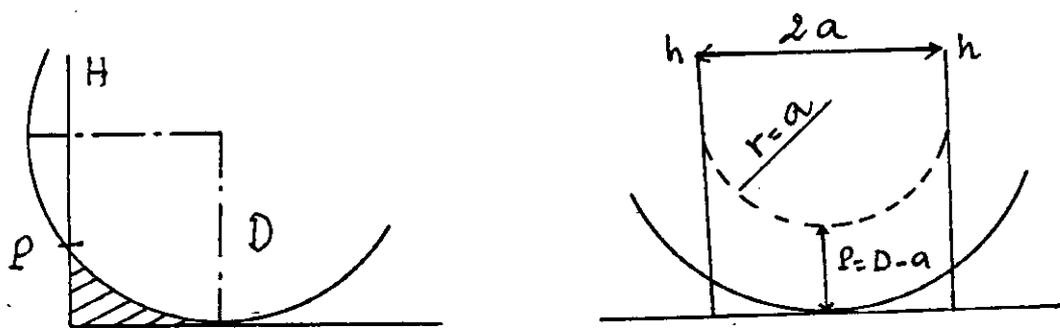


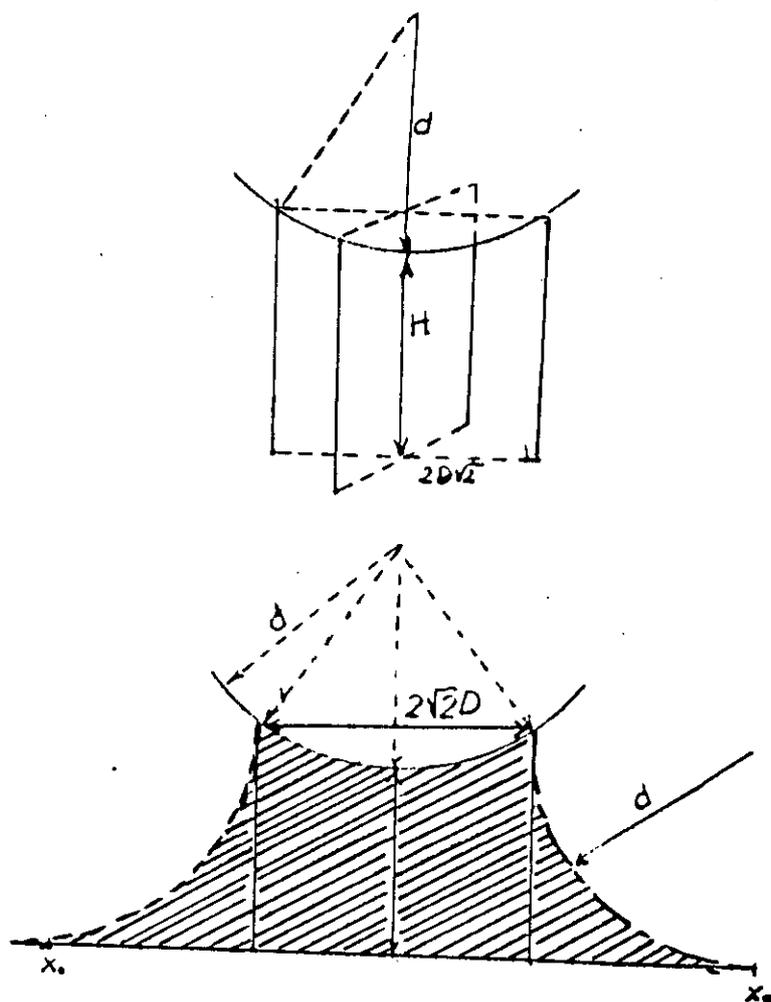
FIG 20: Zone de protection d'une tige verticale
 Dans le cas ou $D < H$ [5].



FIG(21) Zone de protection de deux
tiges
cas où $D > H$ [1]



FIG(22) Zone de protection de deux
tiges
CAS OU $D < H$ [1]



(FIG-23) ZONE DE PROTECTION DE QUATRE TIGES VERTICALES

2.6.4 Cas d'un fil horizontale

-D > H / 2 (fig 25)

$$X = \sqrt{2DH - H^2}$$

-si l est la largeur du cable la surface du capteur S=2xl.

-D < H/2

Cette valeur de D correspond au faible courant de foudre, alors le fil n'assure pas la protection.

2.6.5 Cas de deux fils horizontaux

Soit 2a la distance entre les deux conducteurs
et l la longueur des deux fils (fig 24)

la protection est efficace si D > a

$$\text{la hauteur protégée } P = H - D + \sqrt{D^2 - a^2}$$

$$\text{le rayon de protection } X_0 = \sqrt{2DH - H^2}$$

$$\text{la surface de capture : } (2x + a) l = S$$

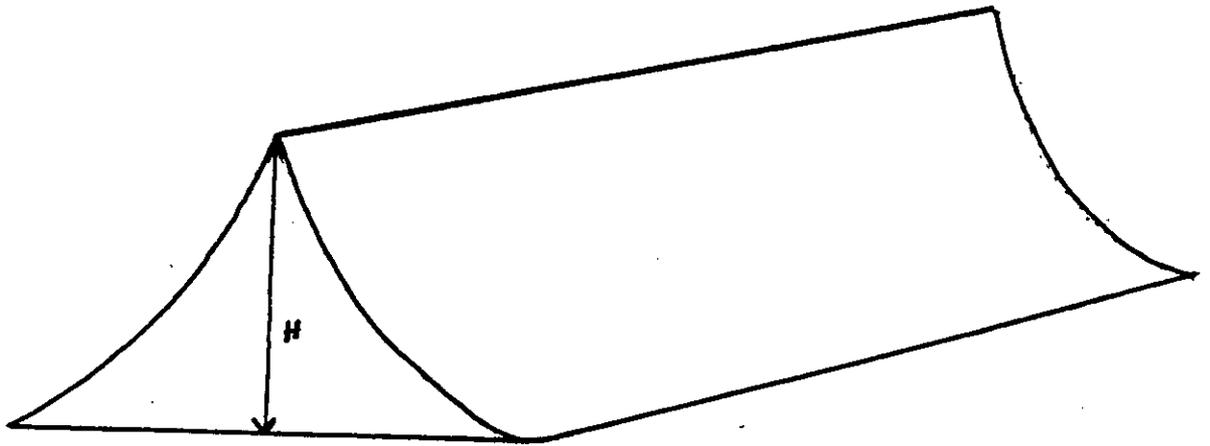
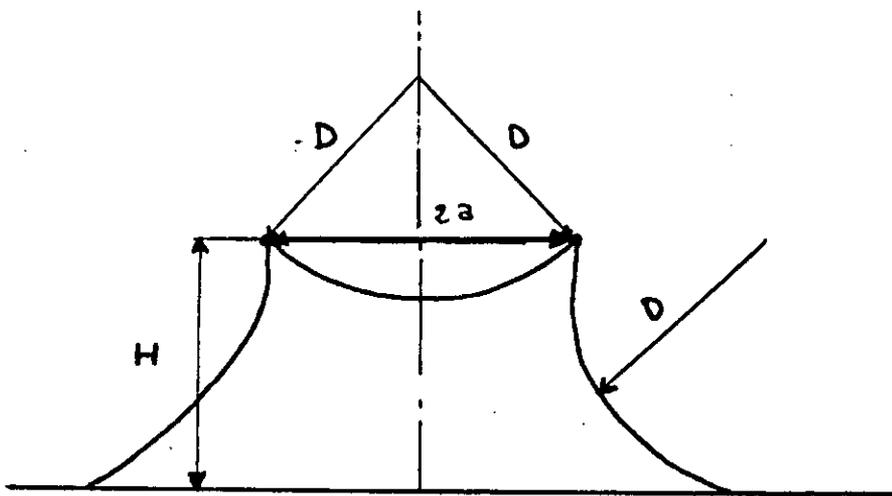


Fig (25) : ZONE DE PROTECTION D'UN FIL HORIZONTAL. [5]



FIG(24) ZONE DE PROTECTION DE DEUX FILS HORIZONTALS [5]

* CHAPITRE 3 *
* DECHARGE EN SOL HETEROGENE *

3.1 INTRODUCTION

Le sol se trouvant au dessous du nuage orageux est constitué de matériaux qui diffèrent par leurs propriétés électrogéologiques. Nous allons voir l'influence de la nature du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre.

3.2 INFLUENCE DES PROPRIETES ELECTROGEOLOGIQUES DU SOL SUR LA DECHARGE DE Foudre

Avant le commencement de la prédécharge descendante, l'intensité du champ électrique au sol est relativement faible. Avec la propagation du traceur, le champ devient de plus en plus intense. Avant que les prédécharges n'atteignent le point critique, la terre n'a pratiquement aucune influence sur leur propagation c'est lorsque le traceur arrive au point critique que le champ électrique sur la surface de la terre est suffisamment intense pour engendrer une ou plusieurs décharges. Le plus souvent la structure du sol est stratifiée, plusieurs matériaux le constituant ont des propriétés électromagnétique différentes: (8)

- La perméabilité relative μR : la valeur maximale est celle du magnetite, égale à 5.
- La permittivité relative ϵR : $1 < \epsilon R < 100$ liée à la polarisation électrique des matériaux.
- La Conductivité γ : varie dans une très grande gamme de 10^{-6} à 10^{+8} s/m.

Des travaux ont montré que les caractéristiques géologiques du sol sont étroitement liées à l'existence des zones préférentielles de foudroiement. D'où l'idée qu'en présence de deux sols ayant des propriétés électrogéologiques différentes, le plus foudroyé serait celui qui à une conductivité plus élevée.

3.3 INFLUENCE DE L'HETEROGENEITE DU SOL SUR LES DECHARGES DE Foudre

Des travaux effectués antérieurement au laboratoire de haute tension de l'ENP, ont eu pour objet d'examiner l'impact probable sur surface de l'électrode plate composée de deux couches différentes, lorsque la position de la tige changeait. [14]

Cette étude se compose de deux parties:

-première partie: étude de la distribution des décharges sur la surface d'un sol homogène ensuite sur la surface d'un sol hétérogène.

-deuxième partie: étude de la distribution de différentes types de décharge.

Le modèle expérimental utilisé lors de cette expérience est constitué d'un système d'électrode tige - plan mis à la terre. (fig26)

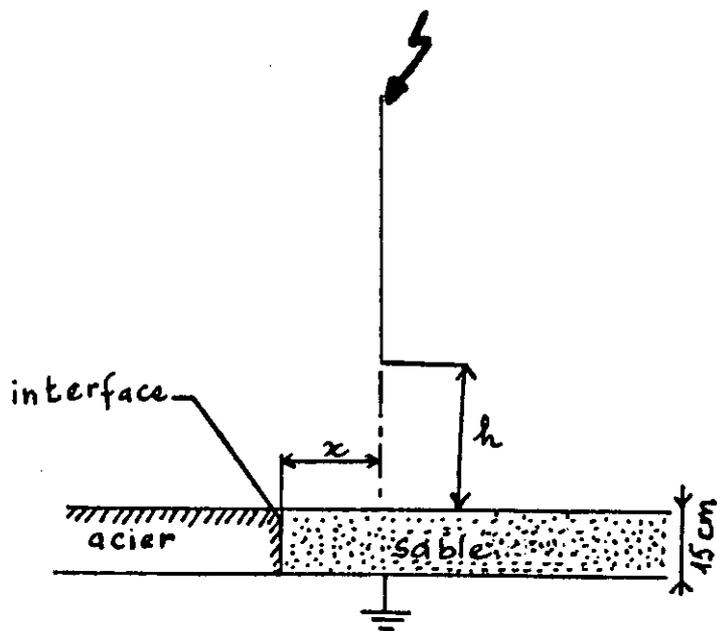


Fig 26: système tige - Plan avec
terre hétérogène [14]

L'étude de la distribution de décharge au impulsions de foudre négatives sur une surface donnée, consiste en l'application de 50 chocs au système entraînant la décharge disruptive pour chaque configuration donnée.

3.3.1 Distribution sur une surface homogène.

Cette distribution de décharge a été déterminée dans le cas d'une couche de sable sec ayant une conductance égale à $54 \mu S$, une feuille de papier calque a été introduite dans le sable à une profondeur de 2cm. La hauteur h de la tige était égale à 18,5 cm, 50 chocs successifs ont été appliqués entraînant 65 perforations du papier calque bien visible [14]

Lors de détermination de la distribution de décharges sur la surface du sable homogène, les 65 perforations ont été tenu compte.

Soit P_r la fréquence de décharge égale à $n_r/65$ avec n_r : nombre de perforations contenues dans un cercle de rayon r centré à l'axe de la tige.

P_r en fonction de r/h est une droite de pente positive permettant ainsi de conclure que la distribution des décharges de foudre négatives sur sol homogène suit une loi normale (fig 27).

3.3.2 Distribution sur une surface hétérogène

Dans ce cas la conductance du sable est mesurée avant et après chaque série d'essais concernant une configuration; la valeur moyenne de la conductance est égale respectivement à $53,3 \mu S$ et $1,5 \mu S$ (pour sable sec et humide) [14].

Lors de l'application de 50 impulsions négatives au système pour chaque configuration définie par "x" et "h", il a été observé, durant chaque série d'essais, trois types de décharges.

1- Décharge directe : Ces décharges ayant lieu entre tige-sable/ tige -interface / tige -acier galvanisé (fig 29a).

2- Décharge complexe ayant lieu entre tige-sable puis glissante vers l'interface sur la surface du sable (fig29b).

3- Décharge atteignant deux points simultanément à l'interface et le sable (fig29c).

Soit n_s le nombre des décharges atteignant le sable (typelet3). La fréquence P_s , égale à $n_s/50$ en fonction de r/h est une droite pour les deux cas de sable (sec et humide) Ce qui permet de conclure que la fréquence de décharge aux impulsions de foudre négative atteignant le sable d'un sol hétérogène suit une loi normale [14] (fig30) et (fig28).

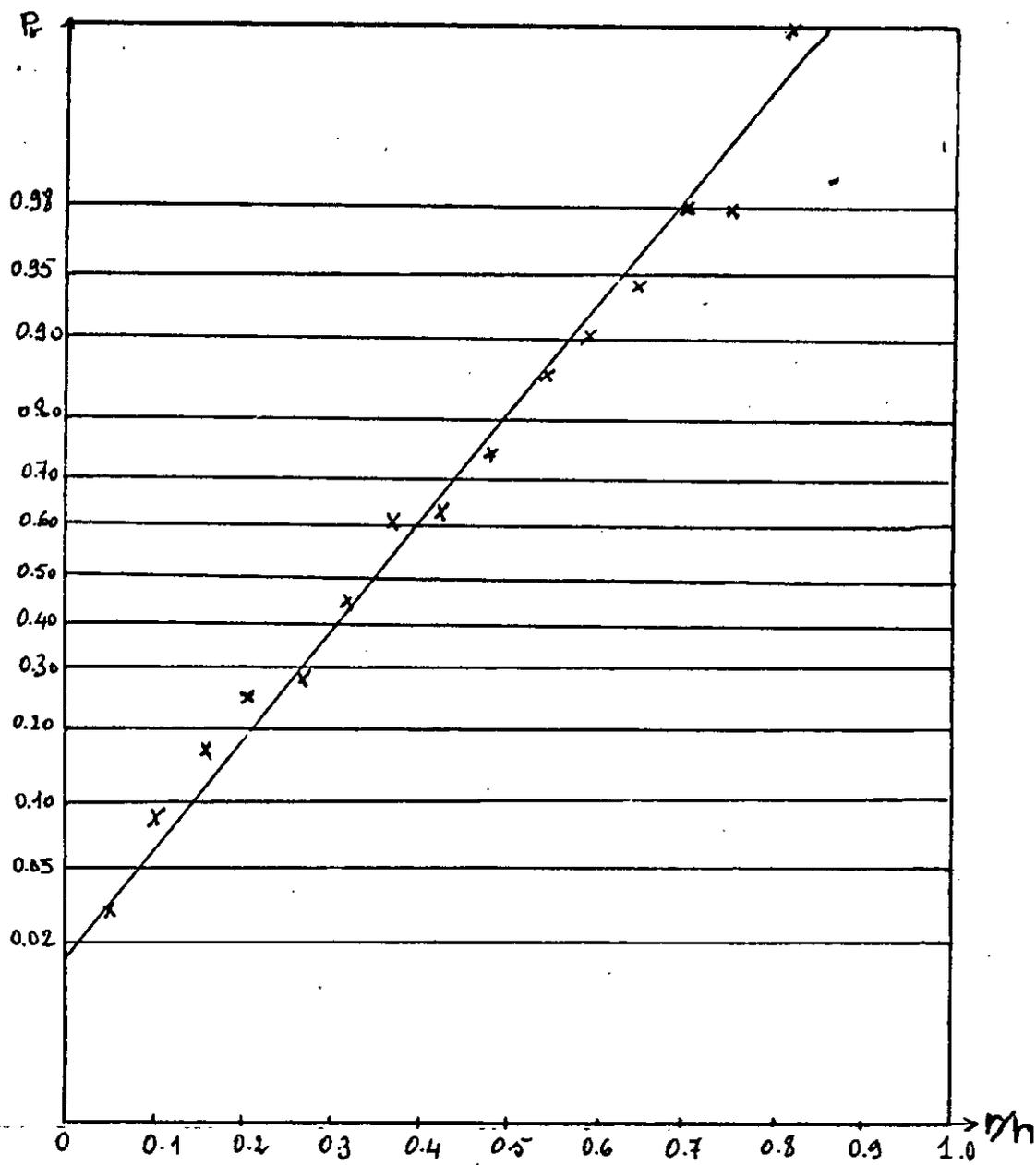


Fig 27: Répartition des décharges de foudre négatives sur la surface d'un sol homogène [14].

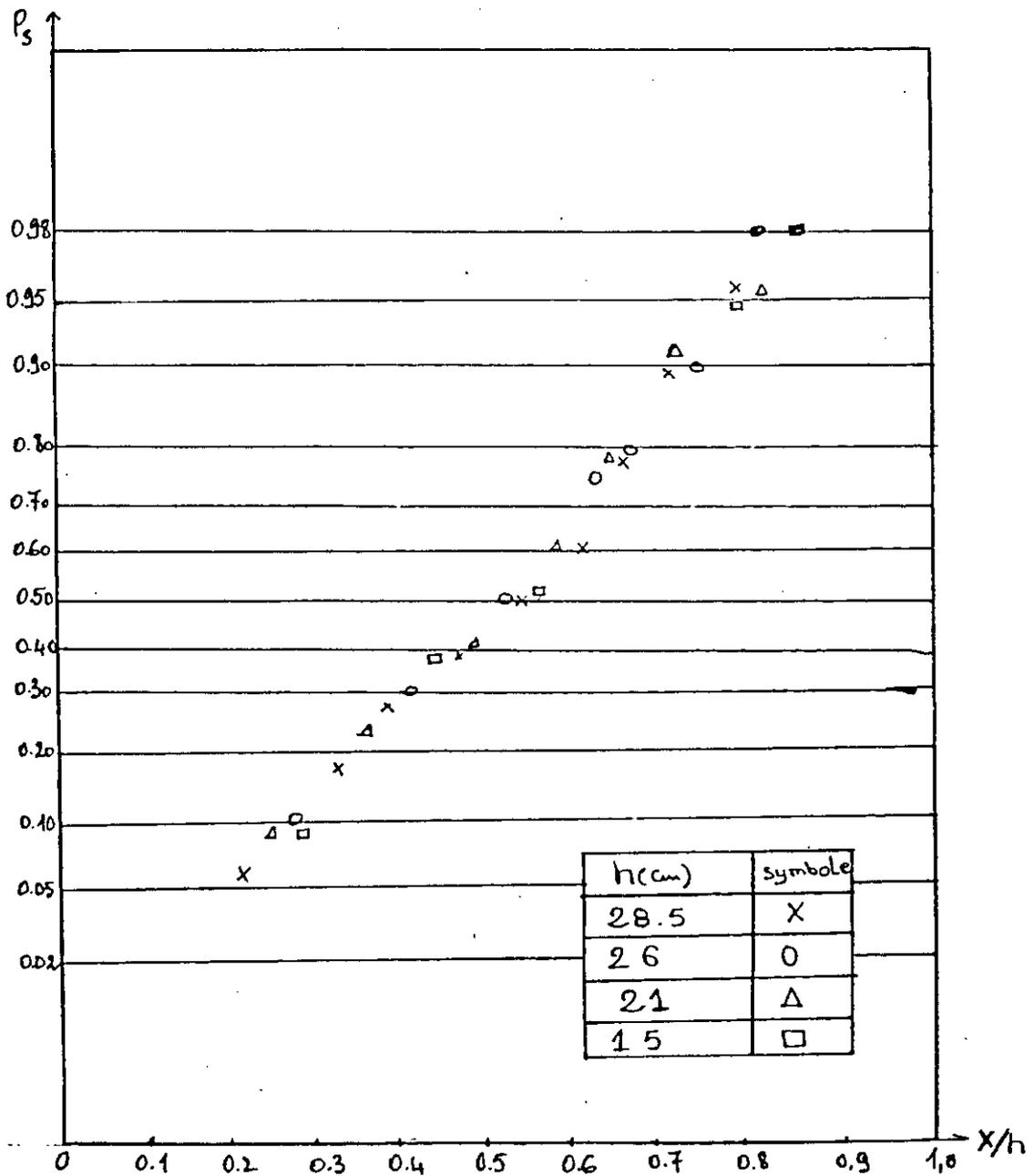


FIG 28: Fréquence des décharges de types 1 et 3 dans le cas d'un sol hétérogène [14]

(a) : Sable humide ;

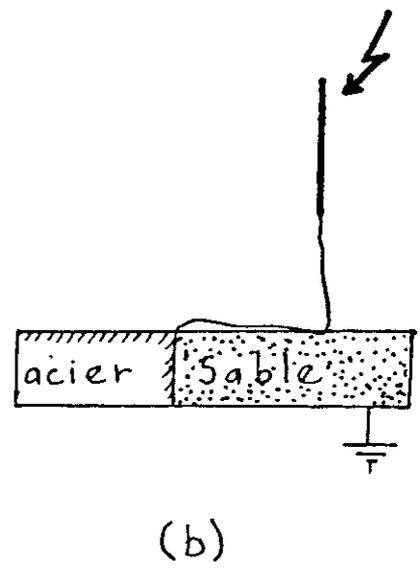
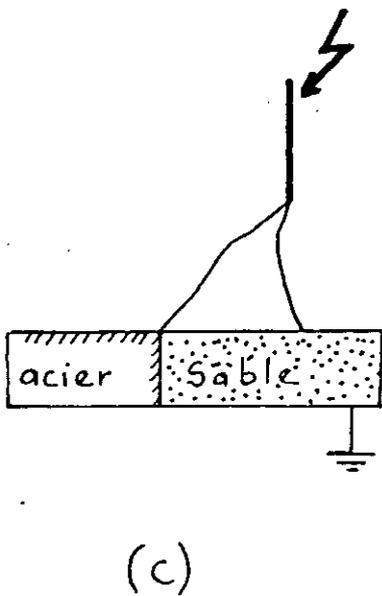
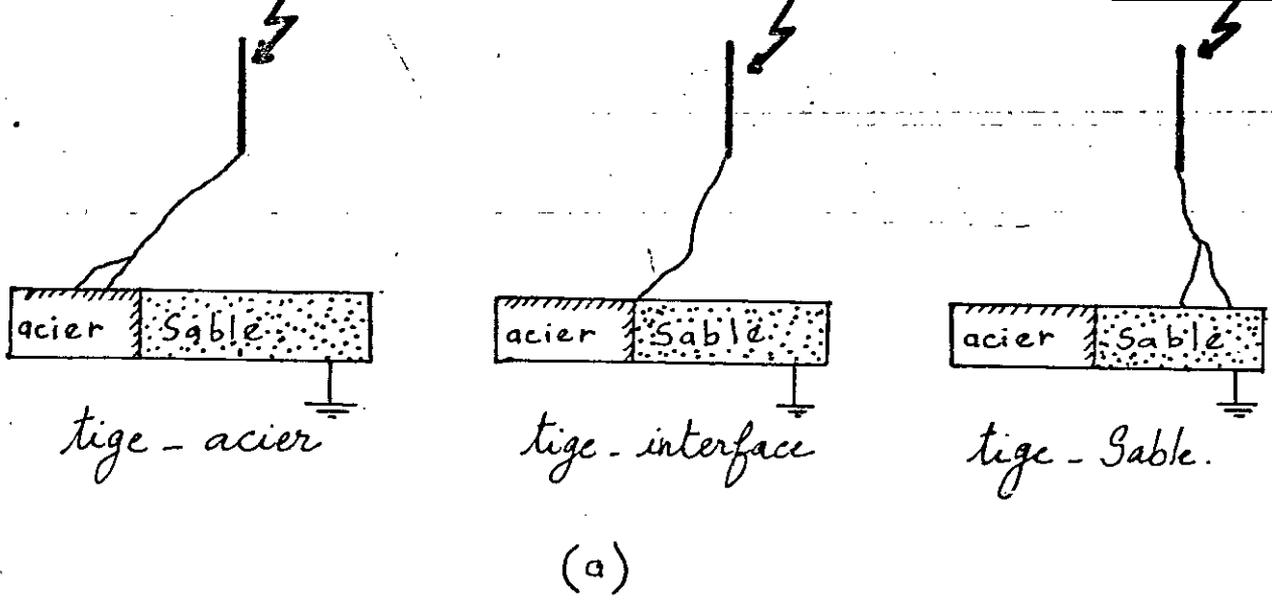


FIG 29: Types de décharges de foudre sur sol hétérogène [14]

- (a) - Décharges directes
- (b) - Décharges Complexe
- (c) - Décharges en deux points

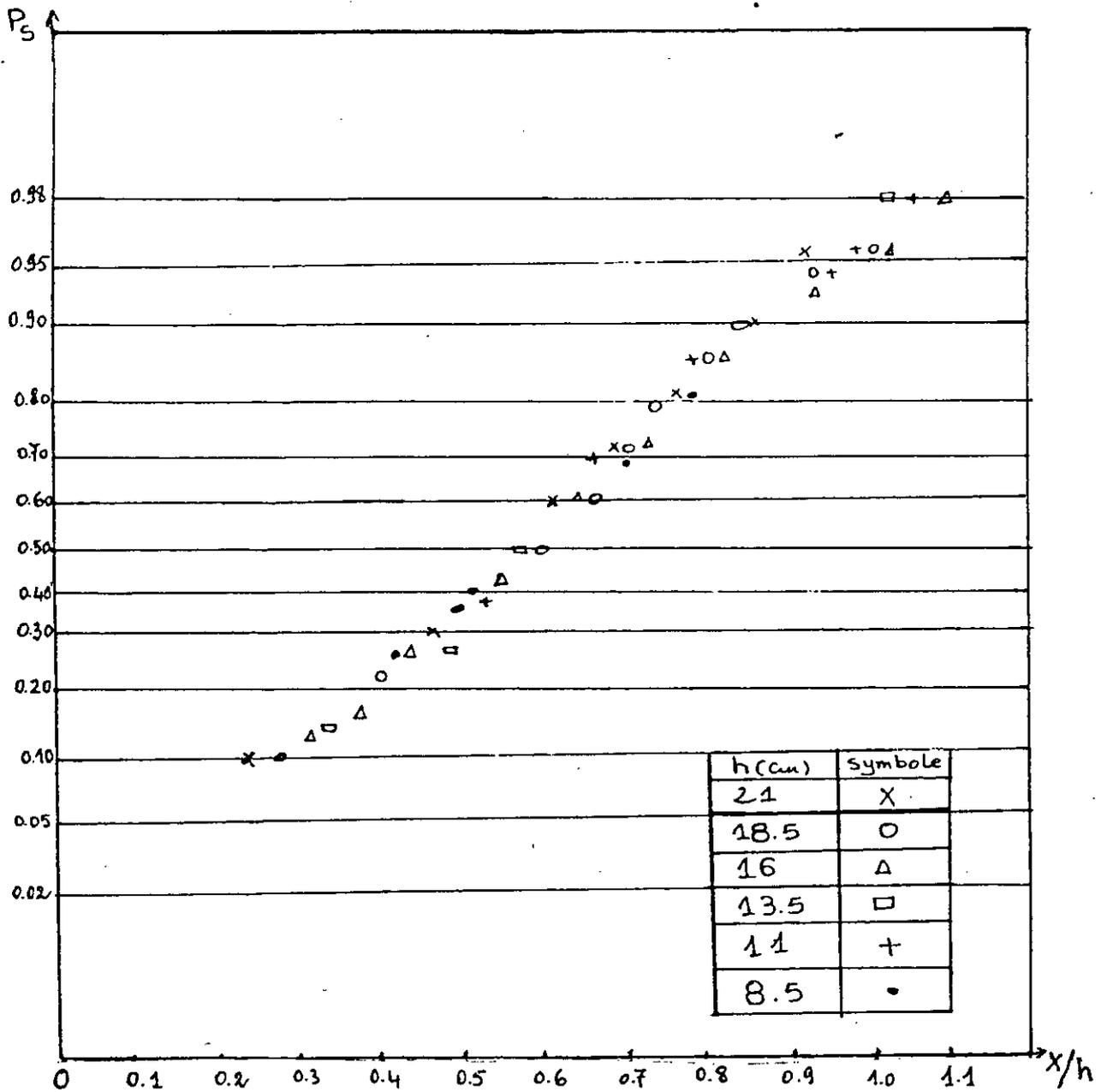


Fig 30: Fréquence des décharges de types 1 et 3 dans le cas d'un sol hétérogène. [14].

(b): Sable Sec.

Apparition de la décharge complexe :

L'apparition de ces décharges est due à la présence de l'interface des deux matériaux de la terre hétérogène. soit-nc le nombre des décharges complexes, la fréquence-Pc est donné par $nc/50$, pour les deux cas de sable. Cette fréquence-Pc atteint un maximum avec l'augmentation de x/h (fig31).

Conclusions :

Les études effectuées ont permis de conclure que la présence d'une surface hétérogène fait apparaître un nouveau type de décharge et modifie la distribution de décharge sur la surface de l'électrode mise enterre, puisque, dans ce cas les décharges sont attirées par l'interface; mais dans le cas de terre homogène, les décharges ont été réparties autour de l'axe de la tige.

- Le nouveau type de décharge (type2) correspond à une décharge en deux étapes, la décharge tige-sable suivie par la décharge glissante sable-interface.

- L'augmentation du niveau d'hétérogénéité entraîne une plus grande modification de la décharge de foudre négatives sur la surface du sol.

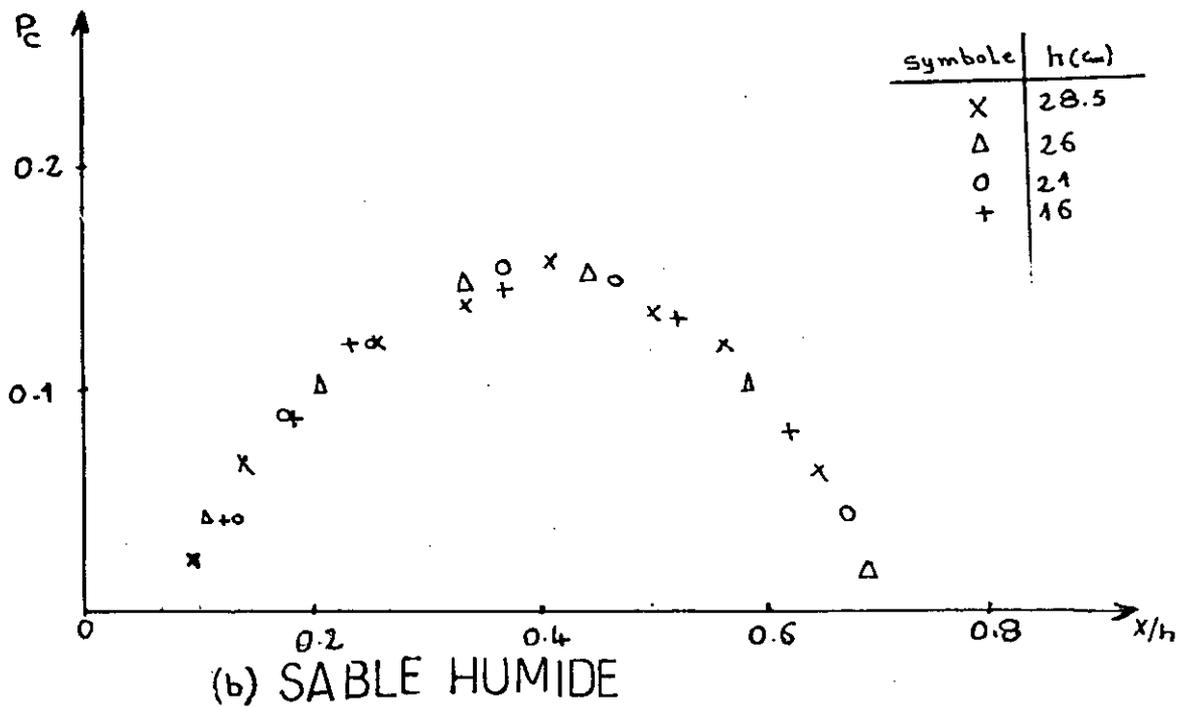
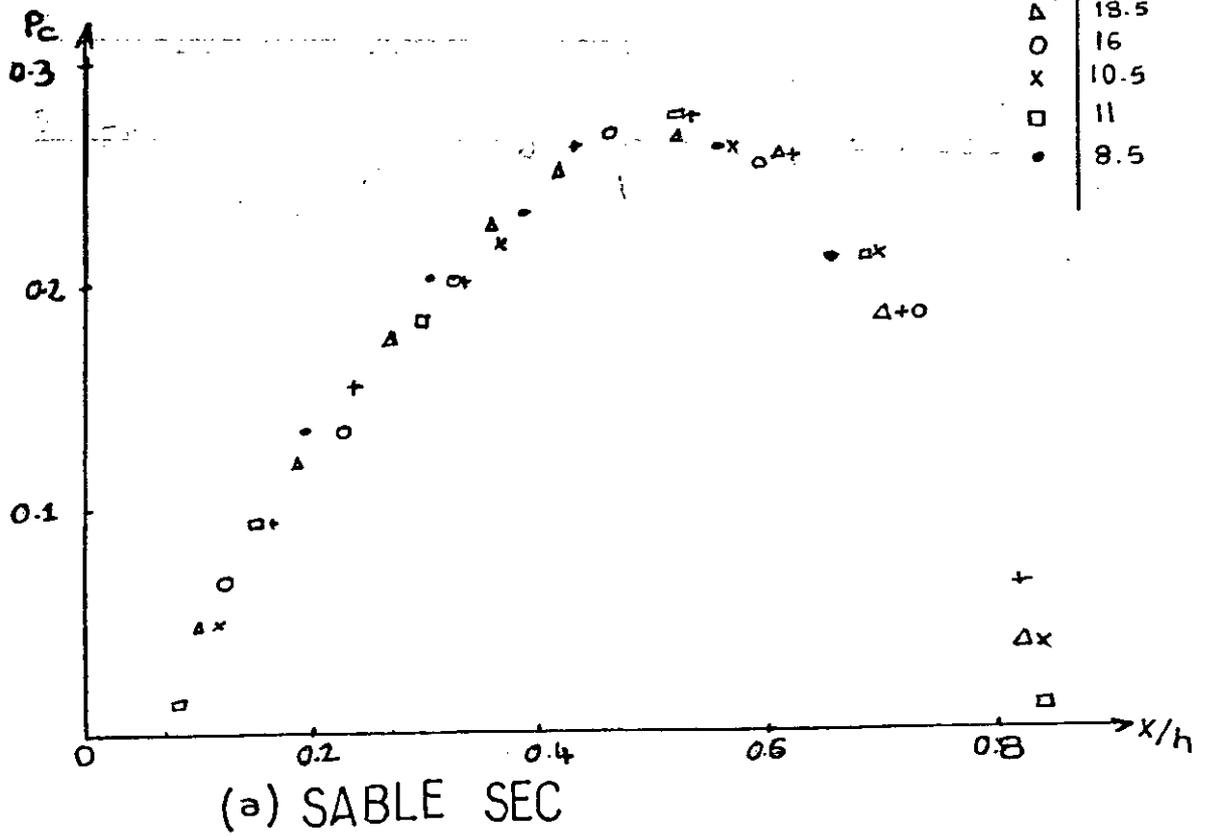


FIG 31: Fréquence des décharges Complexes [14].

3.4 ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE HORIZONTAL DANS LE CAS D'UNE TERRE HETEROGENE

Pour mettre en évidence l'attraction des décharges de foudre descendantes négatives par un paratonnerre horizontal placé au dessus d'une terre hétérogène, un modèle expérimental a été mis au point (fig32). La terre est constituée de deux parties, l'une très bonne conductrice "acier", et l'autre plus ou moins conductrice "sable". La décharge de foudre au moment du saut final est simulée par une électrode en forme de tige, présentant une extrémité hémisphérique. Le paratonnerre est constitué d'un conducteur cylindrique placé horizontalement au dessus du sol et ayant son axe parallèle à l'interface des deux milieux composants la terre.

Les essais ont été effectués à l'aide d'un générateur de choc de type Marx 600kV, 1,2/50ns, 4kJ en fonction de plusieurs paramètres: la hauteur $-h-$ séparant le sol et la pointe de l'électrode haute tension, la distance $-d-$ entre l'axe de celle ci et le paratonnerre horizontal, la hauteur $-hc-$ du paratonnerre et enfin la distance $-D-$ entre l'interface et le paratonnerre.

50 chocs ont été appliqués pour chaque configuration (h,D,d,hc) engendrant toujours une décharge descriptive U 100% dans l'intervalle d'air tige plan (sol).

La méthode d'essais a consisté à fixer D et hc et à faire varier la position (d,h) de la tige par rapport au conducteur horizontal.

Les positions de la tige, pour lesquelles la probabilité de décharge au conducteur est égale à 90% ont été déterminées. Ces positions constituent la zone d'attraction du paratonnerre pour une hauteur hc donnée et une distance D de l'interface des deux milieux fixées.

Toutes les positions possibles du paratonnerre au dessus du sol hétérogène ont été considérés. Deux cas se présentent :

- paratonnerre au dessus du sable (terre mauvaise conductrice)

-paratonnerre au dessus de l'acier(terre tres bonne conductrice)

3.4.1 Zones d'attraction du paratonnerre situé au dessus du sable :

Pour une position D donnée du conducteur horizontal par rapport à l'interface des deux milieux, deux considérations ont été prises:

-Conducteur au dessus du sable, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur. [4]

-Conducteur au dessus du sable, situé entre l'interface et l'axe de la tige [4]

Les résultats obtenus dans le cas de la première configuration ont permis de constater que les zones d'attraction du paratonnerre horizontal sont plus étendues que celles définies par le modèle électrostatique dans le cas d'une terre homogène parfaitement conductrice. Il a été observé que les zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal situé sur un sol hétérogène se trouvaient entre

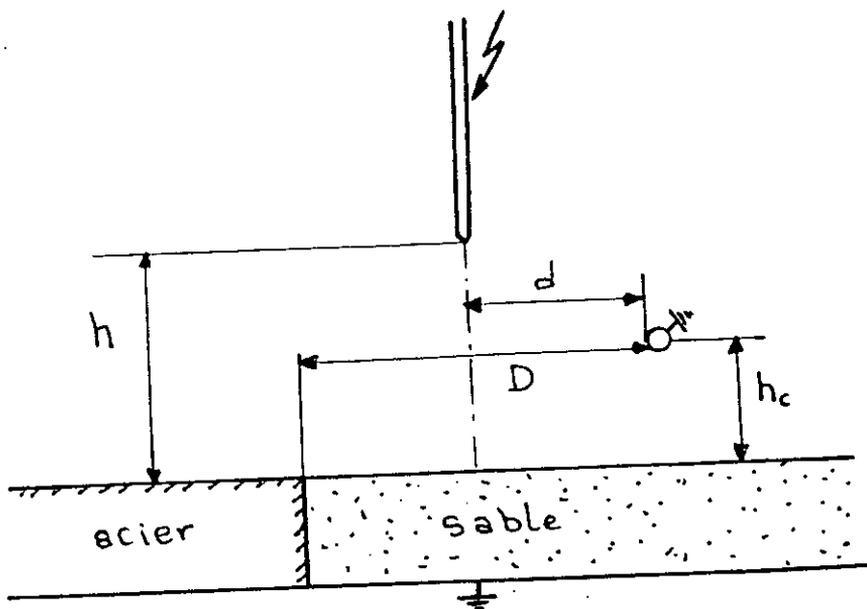


FIG 32: Modèle expérimental. [4].

celle obtenue pour un sol homogène conducteur (acier) et celle obtenue pour un sol homogène mauvais conducteur (sable) voir fig(33a) [4].

Dans le cas de la deuxième configuration (paratonnerre situé entre l'interface et l'axe de la tige), les zones d'attraction sont plus grandes que celle définie pour un sol conducteur homogène ainsi que celle obtenue pour le sol homogène constitué de sable. Dans ce cas, la présence de l'interface favoriserait l'attraction des décharges par le paratonnerre. Quand le conducteur est situé très loin de l'interface la zone d'attraction est confondue avec celle obtenue dans le cas du sol homogène constitué de sable (fig33b)

3.4.2. Zone d'attraction du paratonnerre situé au dessus de l'acier :

Deux considérations sont possibles:

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

- Conducteur au dessus de l'acier, et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur.

Dans le premier cas de configuration, plus le paratonnerre s'approche de l'interface, plus sa zone d'attraction devient grande, ceci est dû à l'interface où le champ électrique est intense. Donc les décharges de foudre seraient attirées par le paratonnerre dans des zones plus vastes que celle définie par le modèle électrogéométrique(fig 34 a).

Quand le conducteur horizontal s'éloigne de l'interface, la zone d'attraction devient confondue avec celle définie par le modèle électrogéométrique.

Dans le deuxième cas de configuration, la présence de l'interface amoindrit l'efficacité du paratonnerre. En effet, les zones d'attraction sont plus petites que celle définie pour un ... sol conducteur homogène.(fig34b)

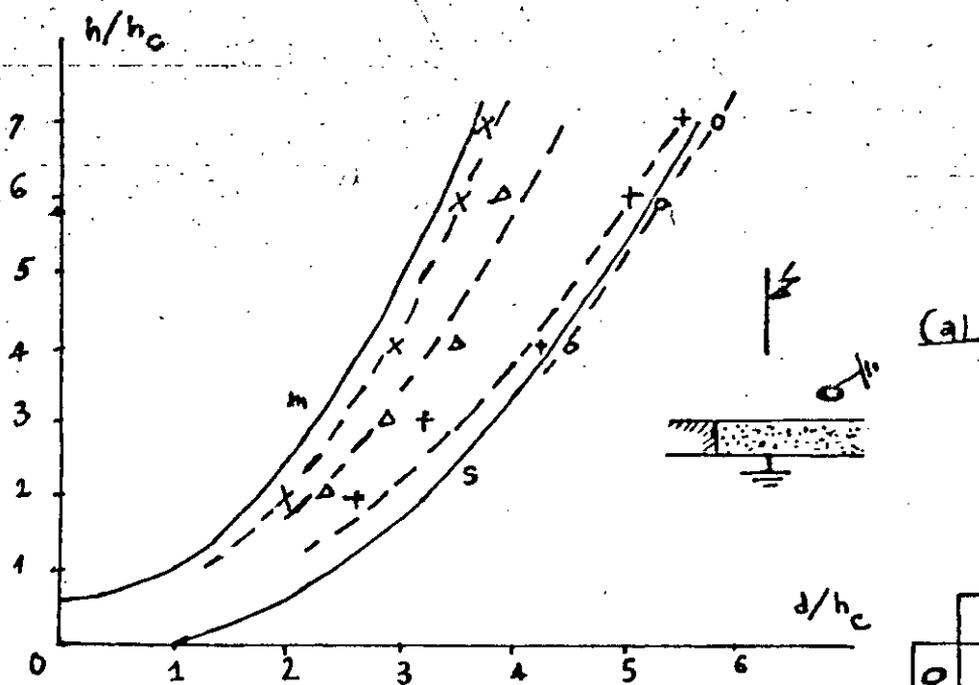
Conclusion :

L'hétérogénéité du sol a une influence considérable sur l'attraction des décharges de foudre descendantes négatives par un paratonnerre horizontal.

Du fait que le champ électrique au voisinage de l'interface est intense et suivant les configurations déjà citées précédemment la décharge de foudre serait soit favorablement soit défavorablement attirée par le paratonnerre.

Ainsi, le modèle électrogéométrique utilisé pour définir les zones de protection des paratonnerres risquent de ne pas être satisfaisantes dans certains cas de configurations du sol. Exemple: Conducteur au dessus de l'acier et l'axe de la tige situé entre l'interface et le conducteur.

Mais dans les autres cas de configuration, le modèle électrogéométrique reste valable.



	D/h_c
0	15
+	11,5
Δ	6,5
X	3,75

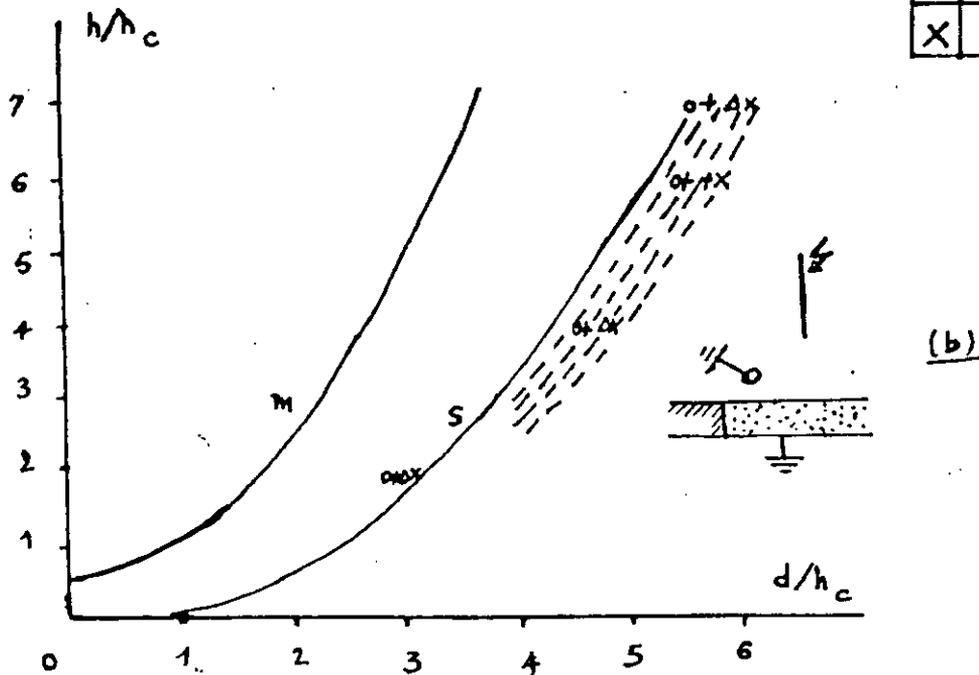
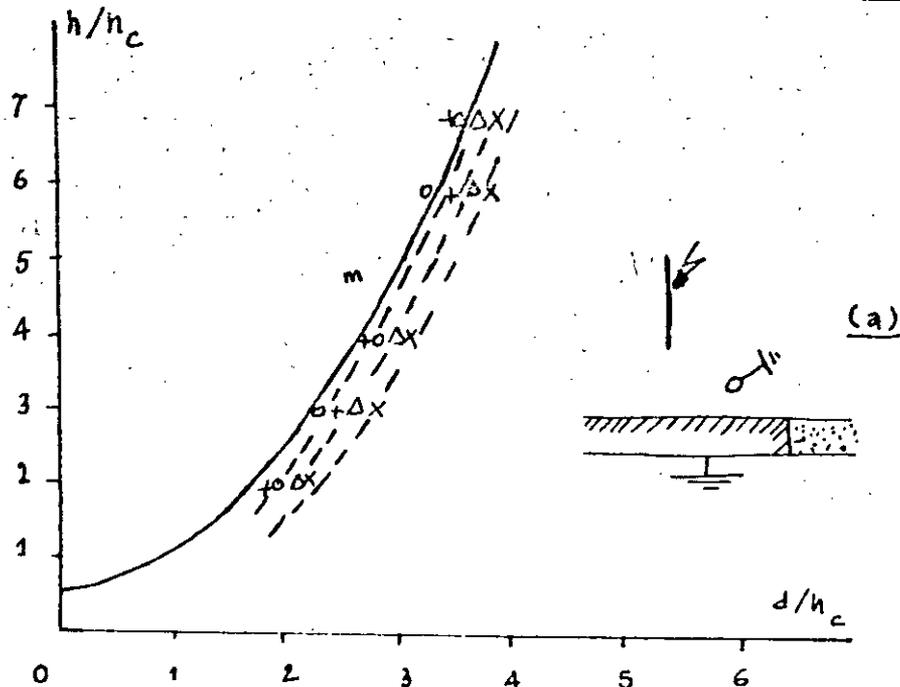


Fig 33 : Zones d'attraction du paratonnerre situé au-dessus du sable. [4].
 m : zone d'attraction au-dessus du sol homogène en acier
 s : zone d'attraction au-dessus du sol homogène constitué de sable.



	D/h _c
0	15
+	11,5
Δ	6,5
x	3,75

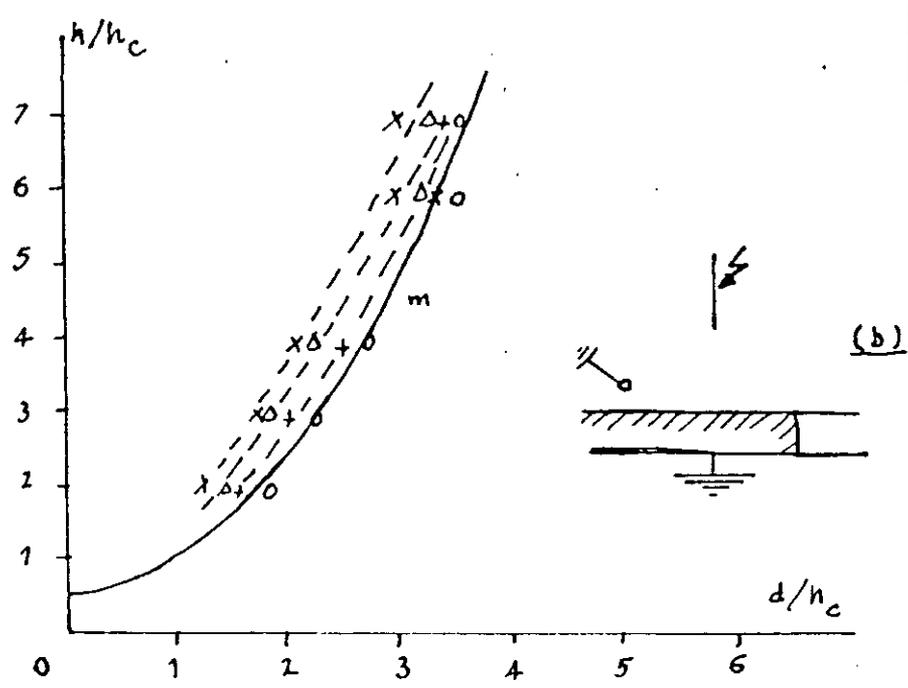


Fig 34 : zones d'attraction du paratonnerre situé au-dessus de l'acier. [4].
 m : zone d'attraction au-dessus du sol homogène en acier.

3.5 ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL DANS LE CAS D'UN SOL HETEROGENE :

Après avoir étudié les variations de la zone d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène, il serait préférable d'étudier les variations de la zone d'attraction d'un paratonnerre vertical sur ce même sol.

Le modèle expérimental utilisé lors des essais est constitué d'une caisse en bois remplie de deux matériaux différents. Le premier matériau est du sable sec, le second est l'acier (fig 35).

Suivant la position du paratonnerre et de la tige par rapport à l'interface trois configurations différents ont été distinguées.

- paratonnerre au dessus du sable et la tige entre le paratonnerre et l'interface (fig 36 a)
- paratonnerre au dessus du sable et compris entre la tige et l'interface (fig 36b)
- paratonnerre au dessus de l'acier et la tige entre le paratonnerre et l'interface. (fig 36c)

Il a été observé que le modèle électrogéométrique reste vérifié pour toutes les configurations du système utilisé. Dans le cas où le paratonnerre est placé au dessus de la partie mauvaise conductrice du sol, les zones de captures sont plus grandes que celles définies par le modèle électrogéométrique, et leur correspondent pratiquement dans le cas où le paratonnerre est placé au dessus de la partie bonne conductrice du sol.

Conclusion :

- Dans le cas du sol hétérogène la variation de la zone d'attraction du paratonnerre vertical est à peu près similaire à celle du paratonnerre horizontal [5].

- Dans le cas du paratonnerre situé au dessus de la partie bonne conductrice (acier) du sol hétérogène et la tige comprise entre le paratonnerre et l'interface, les zones d'attraction du paratonnerre horizontal sont plus petites que celles définies par le modèle électrogéométrique, alors qu'elles sont plus grandes dans le cas du paratonnerre vertical. [5]

3.6 ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL ET HORIZONTAL SUR SOL CONDUCTEUR

Dans le cas d'un sol parfaitement conducteur, la zone de capture d'un paratonnerre vertical, pour différentes valeurs de h et h_c correspondant aux positions d donnant 100% de décharges sur le paratonnerre est confondue avec le modèle électrogéométrique, mais pour les positions d donnant 90% de décharges sur le paratonnerre, la zone d'attraction est plus large (fig 37) [5]

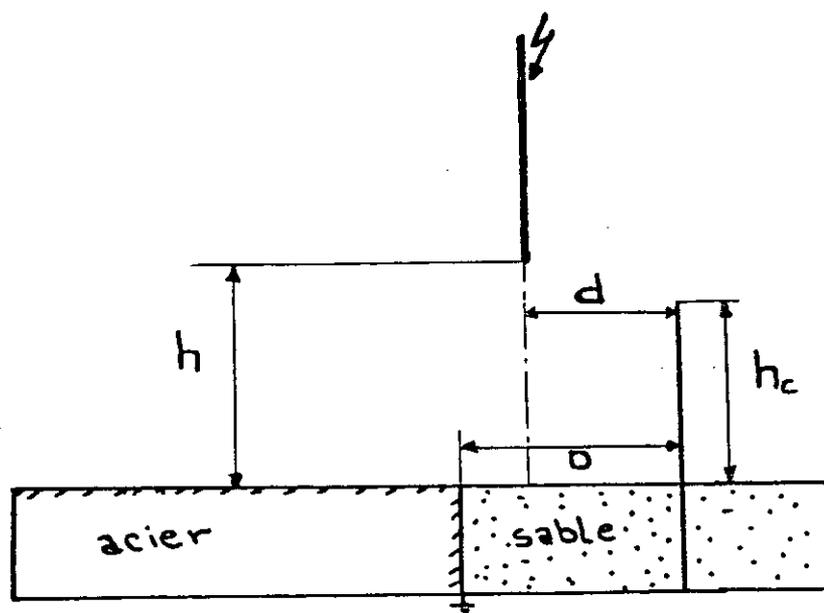


FIG 35: Modèle Experimental. [5].

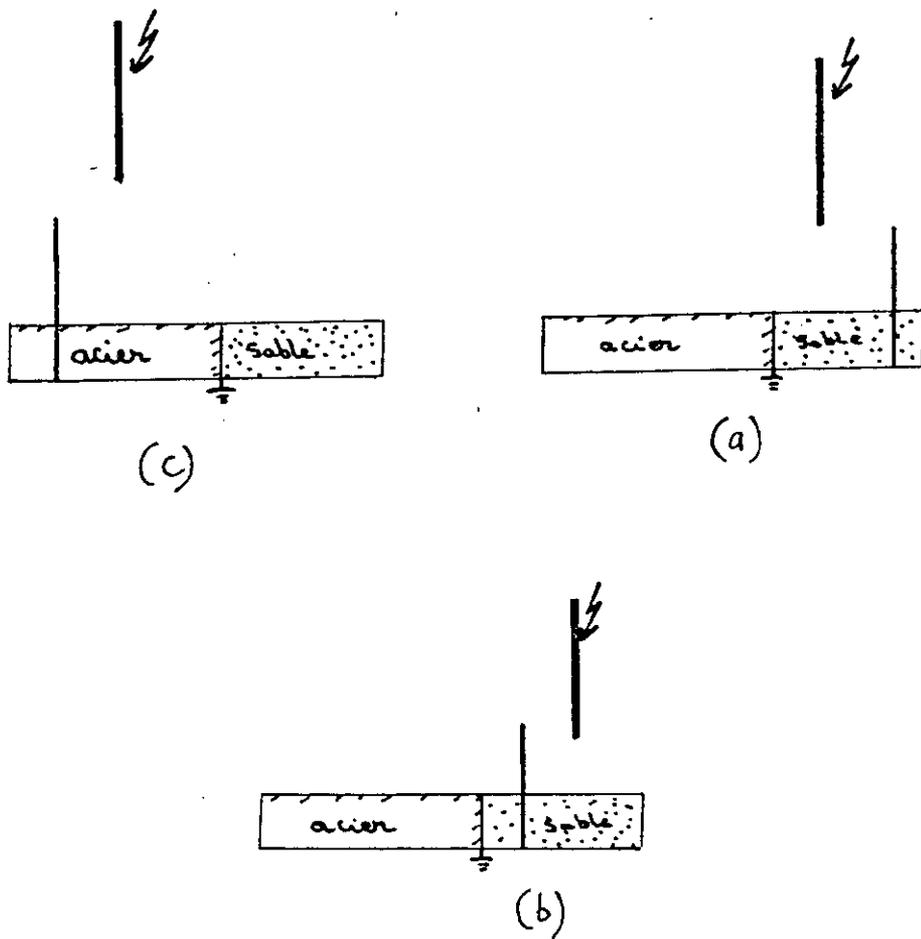
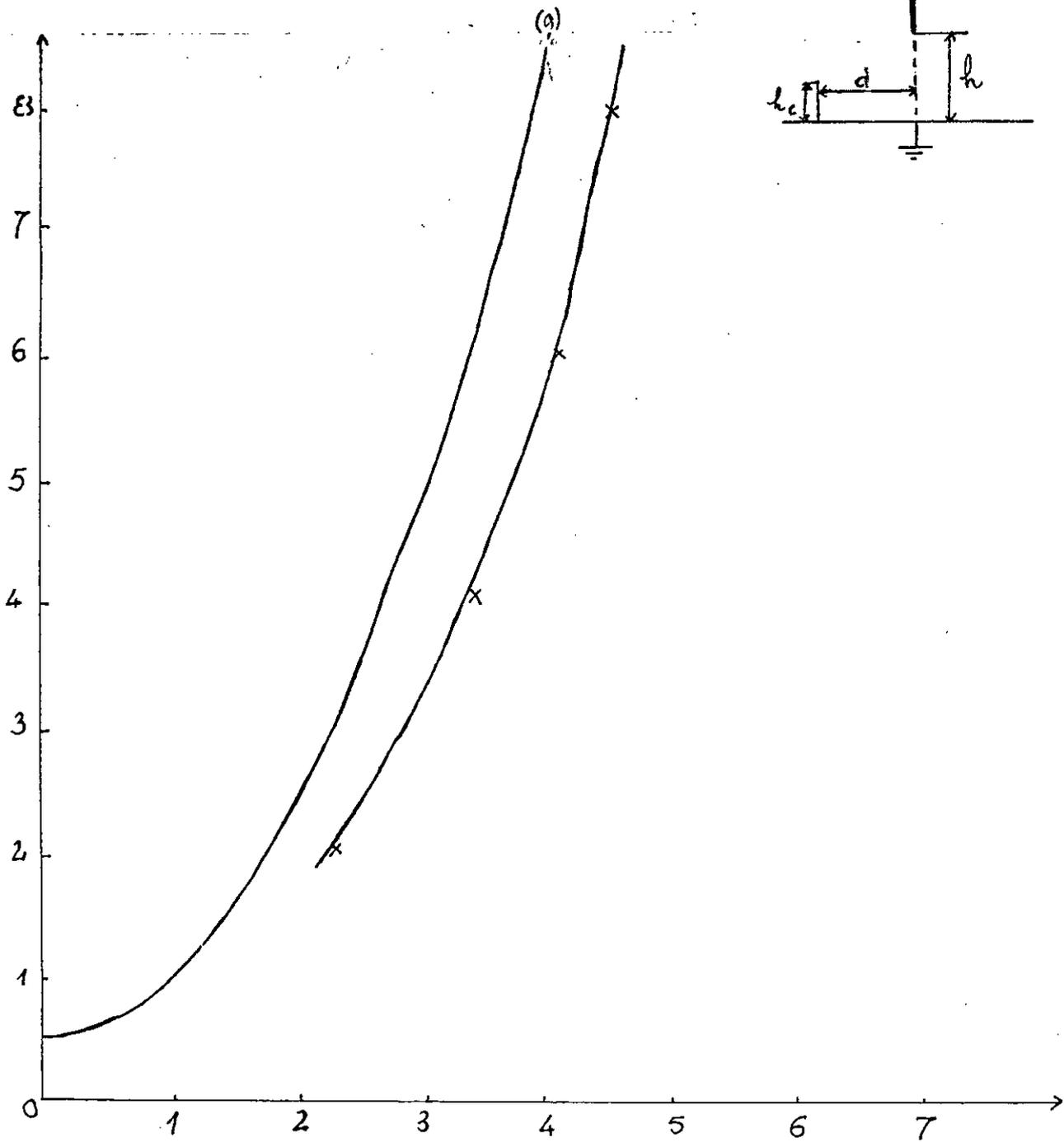


FIG 36: Differentes Configurations du modèle expérimental utilisé dans le cas de sol hétérogène [5].



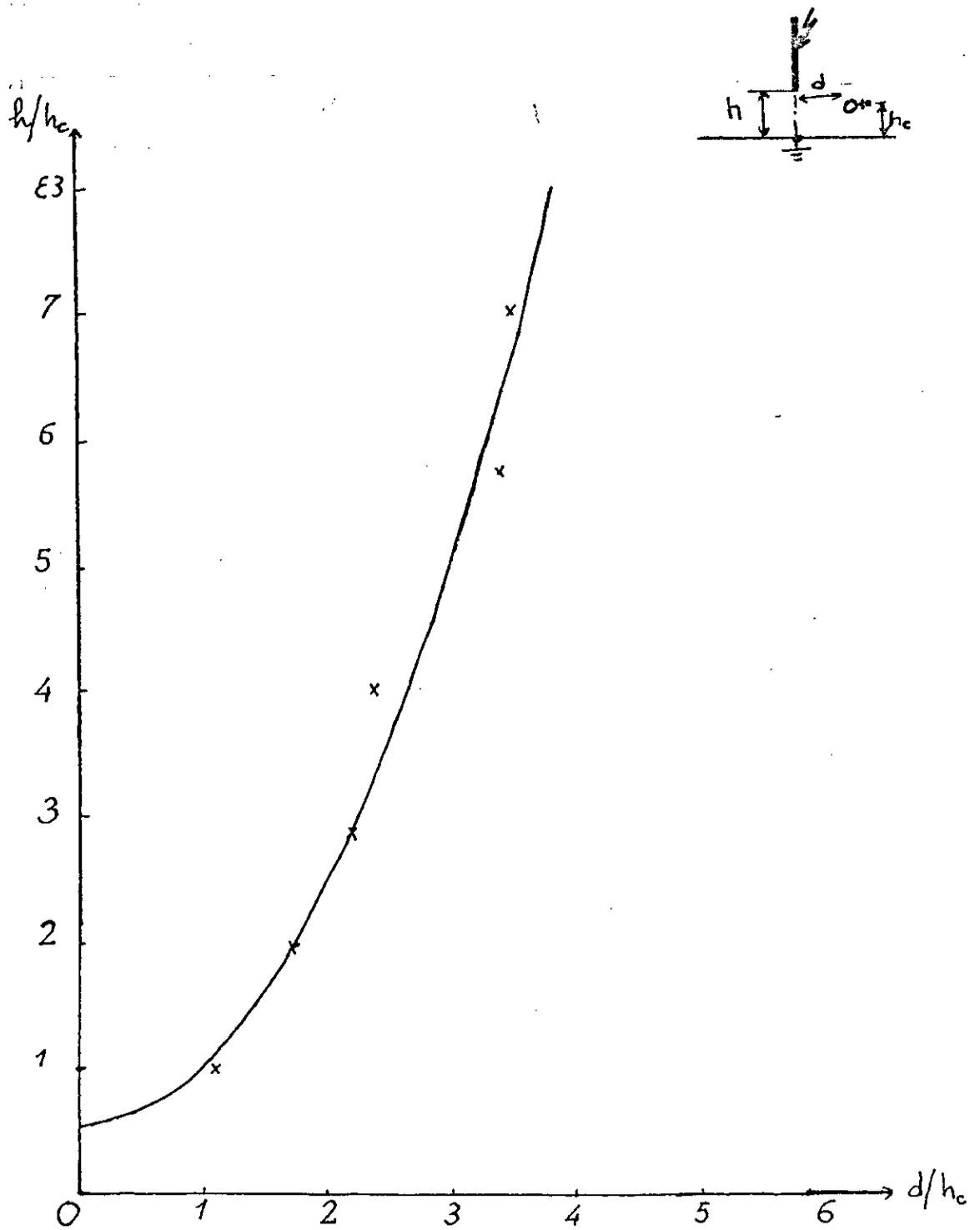
FIG(37) ZONES D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL
 SITUE AU DESSUS D'UN SOL CONDUCTEUR [5].
 (a) : MODELE-ELECTROGEOMETRIQUE THEORIQUE

Dans le cas d'un paratonnerre horizontal sur sol conducteur, la zone d'attraction correspondant aux positions de d donnant 90% de décharges sur paratonnerre est confondue avec la parabole du modèle électrogéométrique (fig 38) [4]

Remarque :

le modèle électrogéométrique d'un conducteur horizontal situé au dessus d'un sol conducteur est obtenu pour les distances d donnant 90% de décharges sur ce conducteur .

Dans le cas d'un paratonnerre vertical, le modèle électrogéométrique est obtenue pour des distances d donnant 100% de décharges sur le paratonnerre.



FIG(38) Zone d'attraction d'un Paratonnerre horizontal au dessus d'un sol conducteur [4]

*
* CHAPITRE 4
*
* INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA
*
* TERRE SUR LES ZONES D'ATTRACTION*

4.1 INTRODUCTION

Pour poursuivre les travaux concernant les décharges de foudre sur sol hétérogène nous allons nous intéresser à la détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sur sol homogène faiblement conducteur et l'influence de l'épaisseur de la terre sur celles-ci

Les différents essais ont été effectués au laboratoire de haute tension de l'ENPA, où les ondes de foudre ont été simulées par des impulsions négatives de $1.2/50 \mu s$ 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 39)

Les périodes T1 et T2 de l'onde de choc représentée à la (fig 40) sont données en fonction des éléments constituant le générateur par:

$$T1 = 2.7 R_s C1 C2 / (C1 + C2) \text{ equ.16}$$

$$T2 = 0.7 (R_s + R_p) C1 \text{ equ.17}$$

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

4.2 ESSAIS EFFECTUES

Nous avons déterminé les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sur sol homogène mauvais conducteur pour différents valeurs de l'épaisseur du sable.

4.3 ZONE D'ATTRACTION D'UN PARATONNERRE VERTICAL SUR SOL HOMOGENE FAIBLEMENT CONDUCTEUR (SABLE)

Dans ce cas les zones d'attraction dépendent de la nature et de l'épaisseur du sol.

Le paramètre essentiel qui caractérisera la nature du sol sera la conductivité γ . Pour un sol de conductivité γ et d'épaisseur e , relié à la terre, au dessus duquel se trouve un paratonnerre vertical de hauteur h_c ; deux cas sont à envisager:

-Si le matériau a une conductivité infinie (cas de l'acier). La zone d'attraction d'un paratonnerre vertical situé au dessus de ce sol, est confondue avec la parabole du modèle électrogéométrique. (fig 41)

Dans notre cas, le matériau n'est pas parfaitement conducteur, la zone d'attraction du paratonnerre serait comprise entre celles des configurations du sol conducteur (sol acier) pour lequel la hauteur du paratonnerre est égale à (h_c) et $(h_c + e)$ dans le cas où le matériau est de l'air. (fig 42)

$$R_3 = ((8 \times 10) + 150) \Omega$$

$$C_2 = 2 \text{ nF}$$

$$R_p = 8 \times 430 \Omega$$

$$C_1 = 22.5 \text{ nF}$$

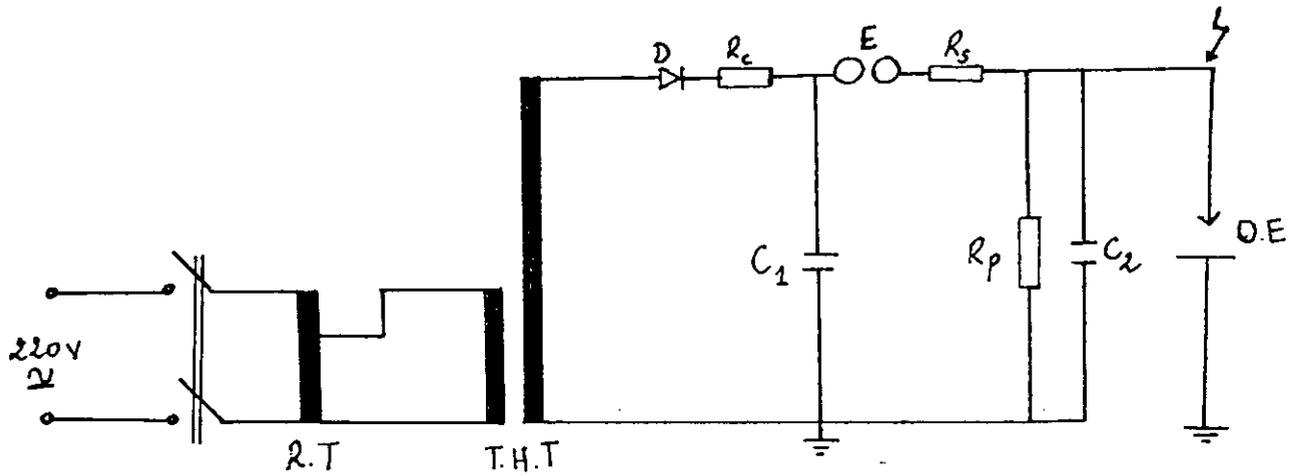
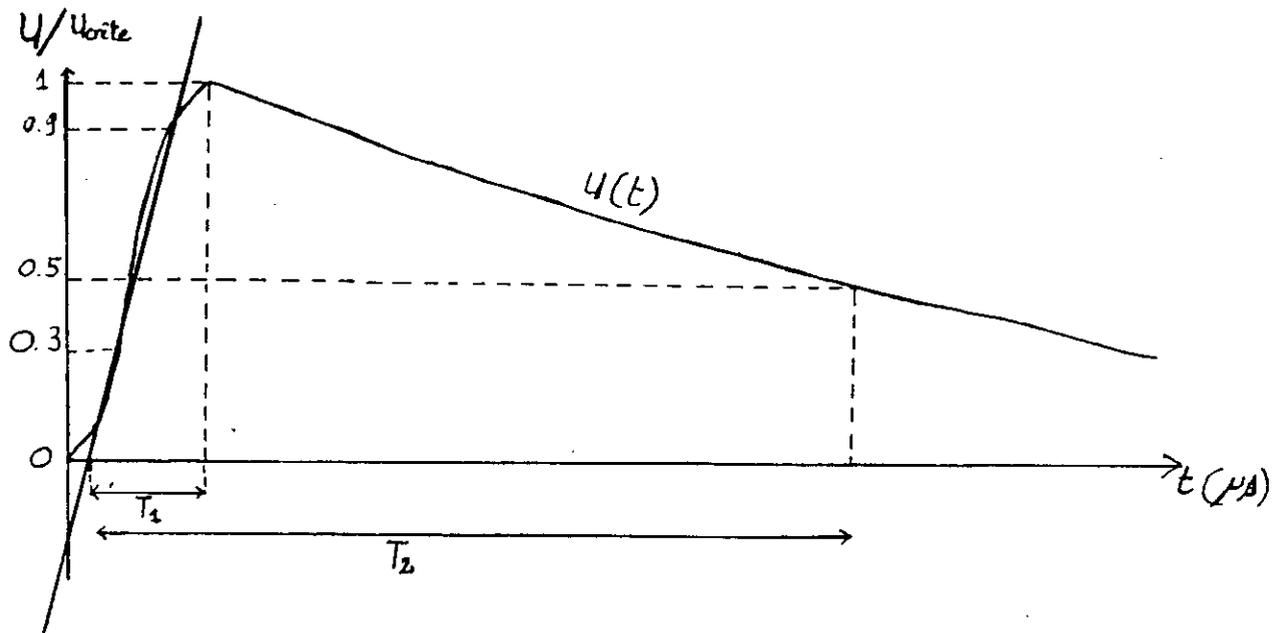


Fig (39) : schéma simplifié du générateur de choc



Fig(40) : courbe représentative de l'onde de foudre.

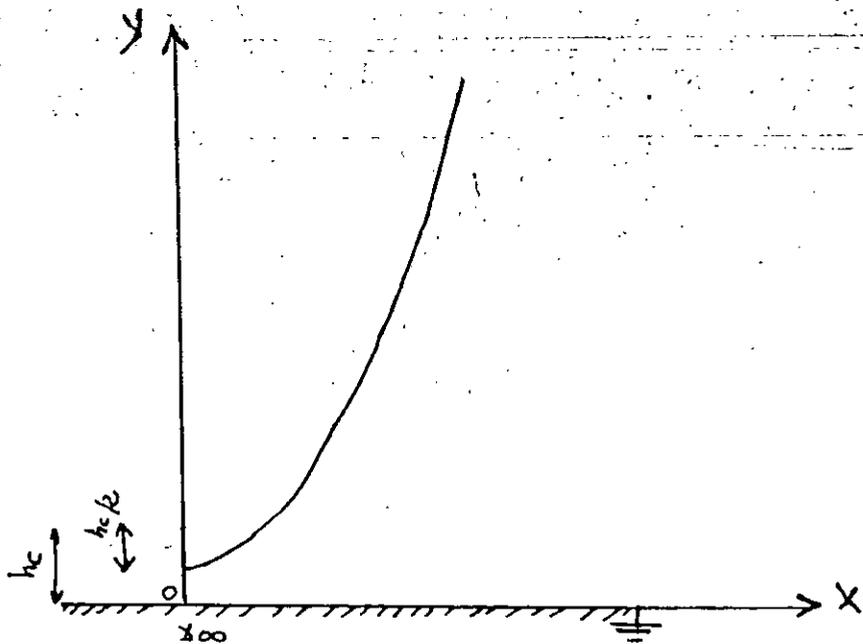


FIG 41: Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol de Conductivité infinie [5].

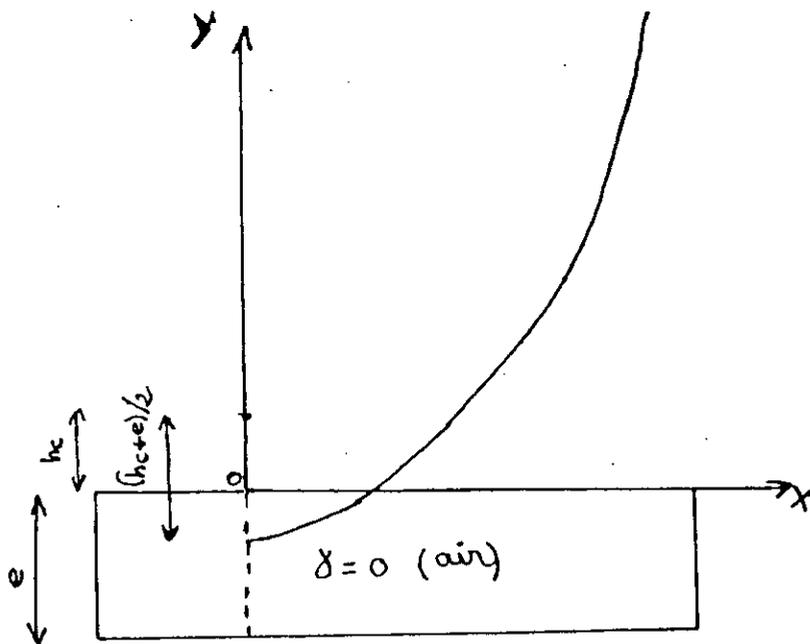


FIG 42: Zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol de conductivité nulle [5].

Cette zone est limitée par l'équation:

$$(hc+e)^2 - 2(hc+e) * (h+e) + d^2 = 0 \text{ équ 18}$$

Donc pour tout matériau de conductivité comprise entre celle de l'air et celle de l'acier, la zone d'attraction serait comprise entre les deux paraboles décrites précédemment. (fig 43)

l'équation est de la forme :

$$(hc+e')^2 - 2(hc+e') * (h+e') + d^2 = 0 \text{ avec } 0 < e' < e$$

D'après cette équation la zone d'attraction d'un paratonnerre vertical situé au dessus d'un sol de conductivité $0 < \gamma < \infty$ 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 l'équation s'écrit en posant:

$$X = d/hc \quad y = h/hc$$

$$(1-2y+x^2) - e'/hc (2y+e'/hc) = 0 \text{ équ 19}$$

Pour déterminer le niveau de terre fictive e' on écrit l'équation sous la forme:

$$(e')^2 + 2 yhc (e') - hc^2 (1-2Y+X^2) = 0 \text{ équ 20}$$

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

$$e' = hc \left[\sqrt{Y^2 - 2Y + X^2 + 1} - Y \right] \text{ équ 21}$$

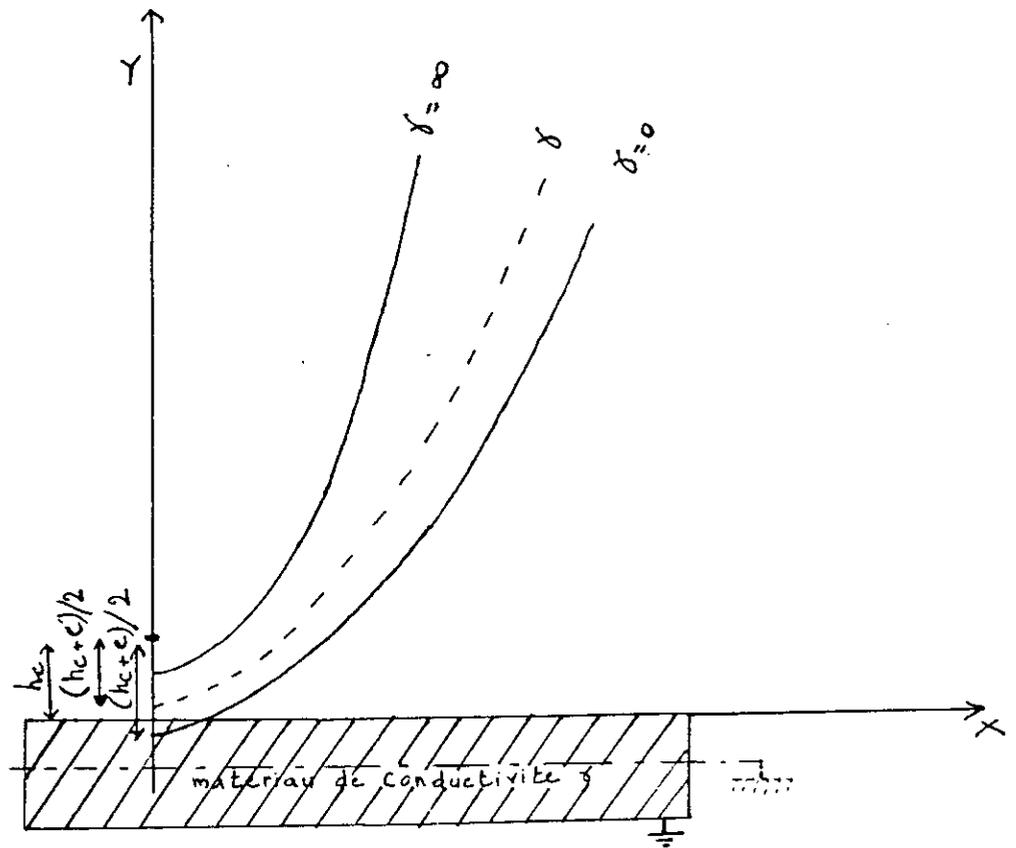
Lorsque :

$$e' / hc \longrightarrow 0 : X^2 - 2y + 1 = 0 \text{ modèle électrogéométrique}$$

$$e' / hc \gg 0 : (X^2 - 2y + 1) \gg 0$$

Le modèle expérimental utilisé est constitué d'une caisse en bois de surface carrée (1x1) m² contenant du sable sec; Le sable est disposé sur un grillage métallique relié à la terre.

L'électrode verticale simulant le traçeur de foudre (juste avant le saut final) a un diamètre de 6 mm présentant une extrémité hémisphérique. (Fig 44)



FIG(43) Zones d'attraction d'un Paratonnerre vertical au dessus d'un sol de conductivité δ [5].

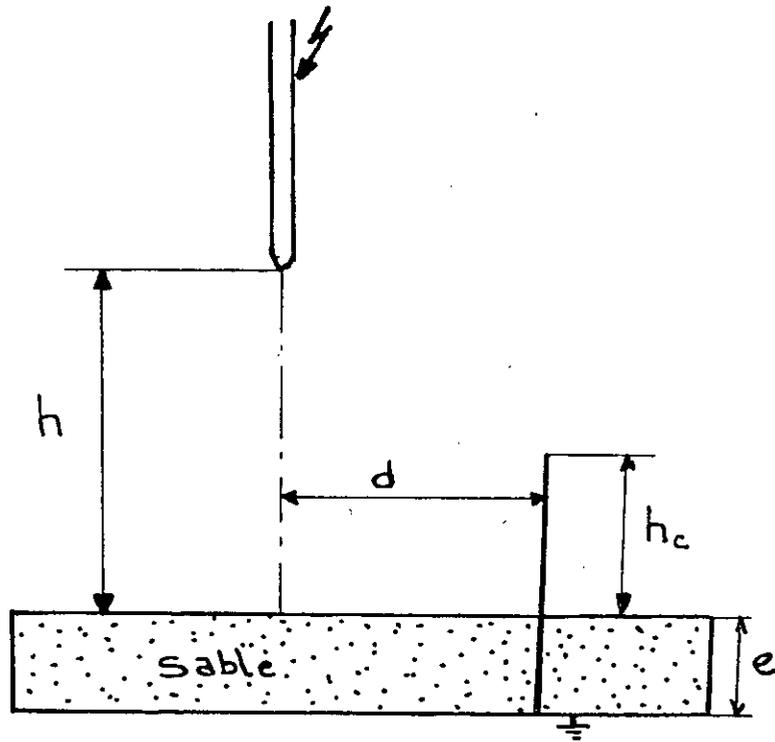


FIG44: Modèle Expérimental.

4.3.1. Méthode 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 au moins égale à 90%.

Pour calculer les fréquences de fondroissement du paratonnerre nous appliquons 50 chocs avec un intervalle de temps de 30 secondes entre deux chocs successifs. Cette fréquence F_c sera le rapport du nombre de chocs ayant touché le conducteur sur le nombre total de chocs effectués.

La tension appliquée à la tige avait une amplitude suffisante pour engendrer la disruption à 100% des cas.

Dans notre étude nous avons choisi 3 épaisseurs de terre $e = 15$ cm, $e = 10$ cm, $e = 5$ cm.

Avant de déterminer les zones d'attraction du paratonnerre nous avons d'abord commencé par déterminer les niveaux de tension $U_{100\%}$ des systèmes sans paratonnerre, à l'aide de la méthode des paliers multiples constants. Cette dernière consiste à appliquer N fois un niveau de tension constant et de compter le nombre n de décharges disruptives ayant lieu dans l'intervalle tige plan. De cette manière on détermine 3 niveaux de tension dont la probabilité de décharge disruptive est comprise entre 0% et 100%. Ces fréquences sont représentées en fonction de la hauteur h sur une échelle gaussio-arithématique (voir annexe A).

Nous obtenons une droite de régression donnant ainsi la valeur $U_{100\%}$ qu'on doit appliquer.

h (cm)	4	8	12	16	18
U 100 % (KV)	160	256	328	392	456

a) $e = 15$ Cm

h (Cm)	4	8	12	16	17
U 100 % (KV)	152	232	304	360	376

b) $e = 10$ Cm

h (Cm)	4	8	12	17
uU 100% (KV)	136	216	296	336

c) $e = 5$ Cm

Tableau N°1 : $U_{100\%}$ en fonction de h pour chaque épaisseur e étudiée

Durant les essais, les conditions atmosphériques varient dans les intervalles suivants :

Pression : $P_{max} = 76,9$ mmhg $P_{min} = 76,6$ mmhg
 Temperature : $T_{max} = 25^{\circ}$ c $T_{min} = 18^{\circ}$ c
 Humidite relative : $H_{max} = 76$ % $H_{min} = 68$ %

Par la suite nous déterminons la probabilité d'impact au paratonnerre en fonction de d/hc . La valeur d/hc pour laquelle nous avons 90 % de décharge au paratonnerre est déterminée en portant sur une échelle gaussienne-arithmétique, les fréquences f_c en fonction de d/hc .

Cette valeur correspond à un point de la limite de la zone d'attraction, pour h/hc et e/hc fixées.

Ces courbes sont des droites; ce qui nous permet de dire que la distribution des impacts sur le conducteur en fonctions de d/hc suit la loi normale. (voir en annexe B).

Pour chaque épaisseur nous avons fait les essais pour trois valeurs de $-hc$, et pour chaque valeur de hc , trois valeurs de h .

4.3.2 Différentes décharges observées:

Lors des essais nous avons observé la décharge et son lieu d'impact, nous avons pu distinguer 3 types de décharge

- Décharge sur le sable (fig 45 a)
- Décharge sur le paratonnerre (fig 45 b)
- Décharges multiples (ramifiées) touchant à la fois le paratonnerre et le sable (fig 45 c)

4.3.3 Résultats d'essais:

Les points à fréquences de décharge égale à 90% figurent dans les tableaux suivants:

	hc = 2 cm			hc = 4 cm			hc = 6 cm		
Y = h/hc	2,00	4,00	6,00	2,00	3,00	4,00	2,00	2,66	3,00
X = d/hc	4,40	6,25	7,40	3,45	4,15	5,00	3,10	3,50	3,71

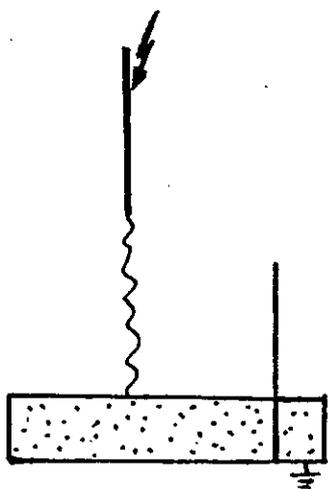
Tableau n° 1 : zones d'attraction sur sable sec d'épaisseur $e = 15$ cm

	hc = 2 cm			hc = 4 cm			hc = 6 cm		
Y = h/hc	2,00	4,00	6,00	2,00	3,00	4,25	1,33	2,00	2,83
X = d/hc	3,90	5,40	6,75	3,00	3,85	4,55	2,25	2,75	3,33

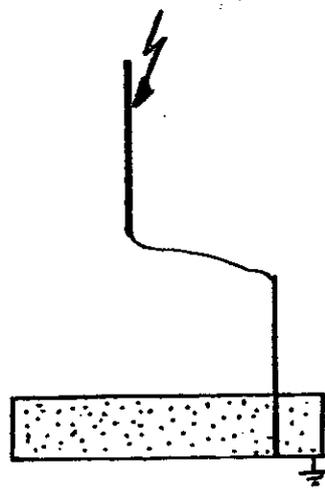
Tableau N°2 : zones d'attraction sur sable sec d'épaisseur $e = 10$ cm

	hc = 2 cm			hc = 4 cm			hc = 6 cm		
Y = h/hc	2,00	4,00	6,00	2,00	3,00	3,50	1,33	2,00	2,33
X = d/hc	3,20	4,60	5,80	2,50	3,25	3,55	1,90	2,35	2,61

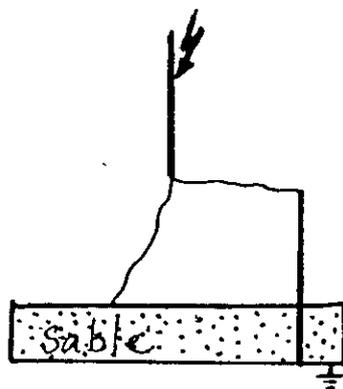
Tableau N°3 : zones d'attraction sur sable sec d'épaisseur $e = 5$ cm.



(a)



(b)



(c)

FIG 45: Différents types de décharges obtenues

4.3.4 Interpretation des resultats :

1 - Tension disruptive U 100 % :

Les graphes des tensions disruptives entrainant 100 % de décharges pour différentes valeurs d'épaisseurs en fonction de la hauteur - h - sont des droites de pente positives (fig 46).

Ces mêmes tensions sont considérables pour les plus grandes valeurs d'épaisseur, ceci est dû à l'augmentation de la distance entre l'électrode et la terre.

Pour les grands rapports h/e, les tensions disruptives sont proches de celles obtenues pour le sol conducteur.

2 - ZONES DE CAPTURE DU PARATONNERRE:

Pour le tracé des courbes théoriques dont l'équation a été déterminée précédemment (equ 19), on doit connaître le paramètre $\frac{e}{hc}$
 e : niveau de la terre fictive
 hc : hauteur du paratonnerre.

Cette équation est :

$$(1 - 2y + x^2) - \frac{e}{hc}(2y + \frac{e}{hc}) = 0$$

on obtient une équation du second ordre où l'inconnue est e :

$$e^2 + 2y hc e - hc^2 (1 - 2y + x^2) = 0$$

nous retons uniquement la solutions positives.

$$\boxed{\frac{e}{hc} = \sqrt{y^2 + x^2 - 2y + 1} - y} \quad \text{equ 21}$$

calcul de e/hc : dans ces tableaux on calcule le niveau de terre fictive en utilisant l'équations (equ 21)

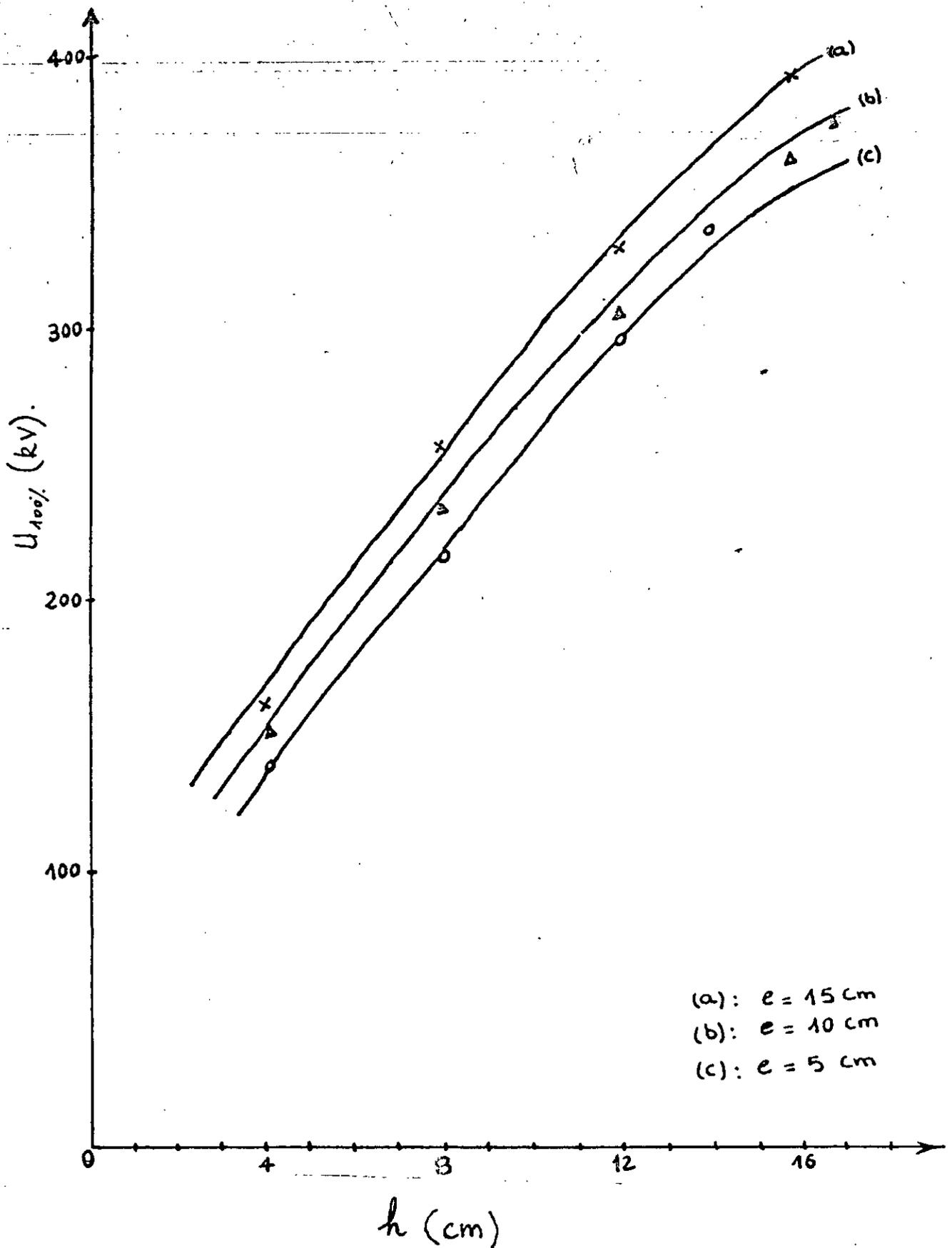


Fig 46: Tension disruptive en fonction de la distance tige-plan

	hc = 2 cm			hc = 4 cm			hc = 6 cm		
Y=h/hc	2,00	4,00	6,00	2,00	3,00	4,00	2,00	2,66	3,00
X=d/hc	4,40	6,25	7,40	3,45	4,15	5,00	3,10	3,50	3,70
é/hc	2,51	2,93	2,93	1,59	1,60	1,83	1,25	1,21	1,20
	(e'/hc) moy = 2,79			(e'/hc) moy = 1,67			(e' /hc) moy = 1,22		

Tableau N° 4 : niveau de terre fictive
pour e = 15 cm

	hc = 2 cm			hc = 4 cm			hc = 6 cm		
Y=h/hc	2,00	4,00	6,00	2,00	3,00	4,25	1,33	2,00	2,83
X=d/hc	3,90	5,40	6,75	3,00	3,85	4,55	2,25	2,75	3,33
é/hc	2,02	2,17	2,40	1,16	1,34	1,34	0,94	0,92	0,96
	(e'/hc) moy = 2,20			(é/hc) moy = 1,28			(e' /hc) moy = 0,94		

Tableau N° 5 : niveau de terre fictive
pour e = 10 cm

	hc = 2cm			hc = 4 cm			hc = 6 cm		
Y= h/hc	2,00	4,00	6,00	2,00	3,00	3,50	1,33	2,00	2,33
X= d/hc	3,20	4,60	5,80	2,50	3,25	3,55	1,90	2,35	2,61
e' /hc	1,35	1,49	1,66	0,80	0,81	0,84	0,60	0,55	0,60
	(e'/hc) moy = 1,50			(é/hc) moy = 0,81			(e' /hc) moy = 0,58		

TABLEAU N° 6 : niveau de terre fictive
pour e = 5 cm

Nous constatons que les valeurs du paramètre e/hc sont pratiquement constante et que les légères variations autour de la valeur moyenne sont dues aux erreurs de mesure lors de la manipulation.

Pour chaque valeur de hc , nous déterminons l'équation théorique de la parabole délimitant les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical pour une épaisseur du sol donnée.

Les équations théoriques :

$e = 15 \text{ cm}$ fig 47

$$hc = 2 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{7,58} - 0,89$$

$$hc = 4 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{5,34} - 0,33$$

$$hc = 6 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{4,44} - 0,10$$

$e = 10 \text{ cm}$ fig 48

$$hc = 2 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{6,4} - 0,54$$

$$hc = 4 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{4,56} - 0,13$$

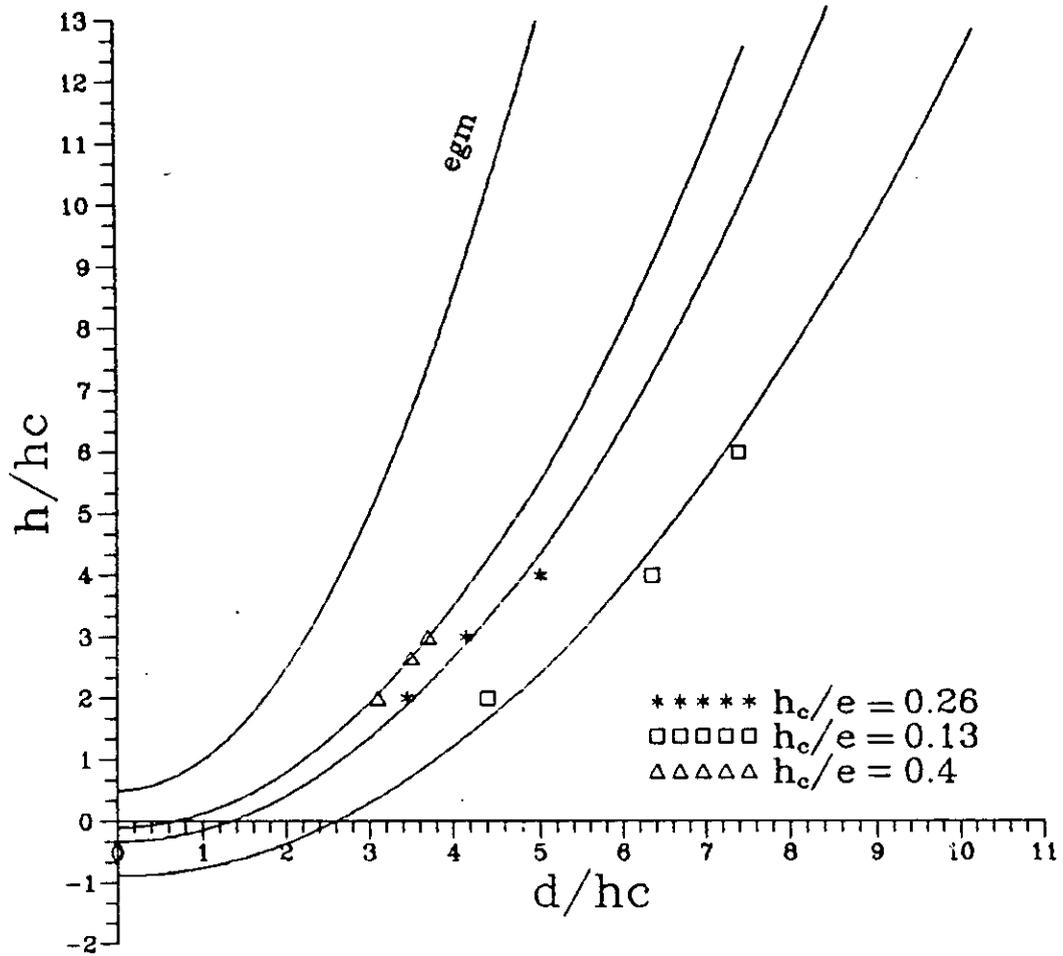
$$hc = 6 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{3,88} + 0,03$$

$e = 5 \text{ cm}$ fig 49

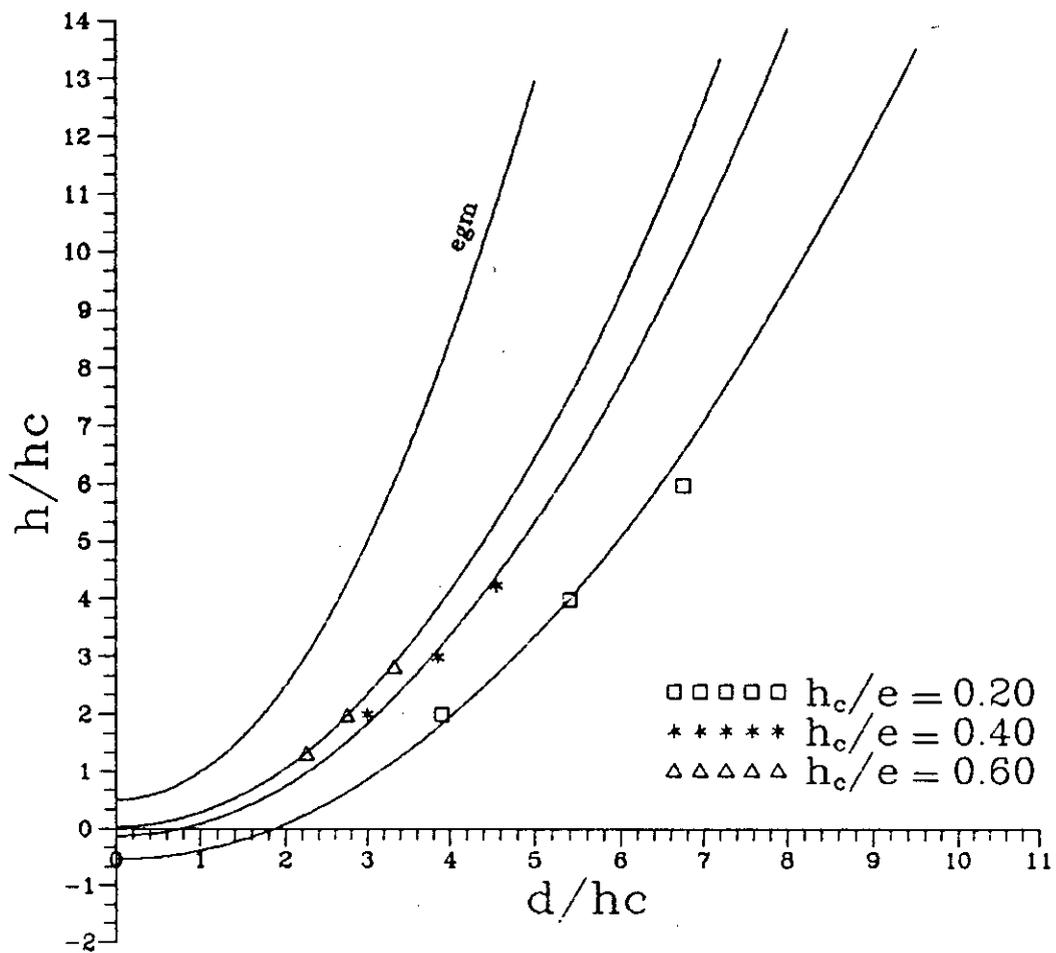
$$hc = 2 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{5} - 0,25$$

$$hc = 4 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{3,62} + 0,09$$

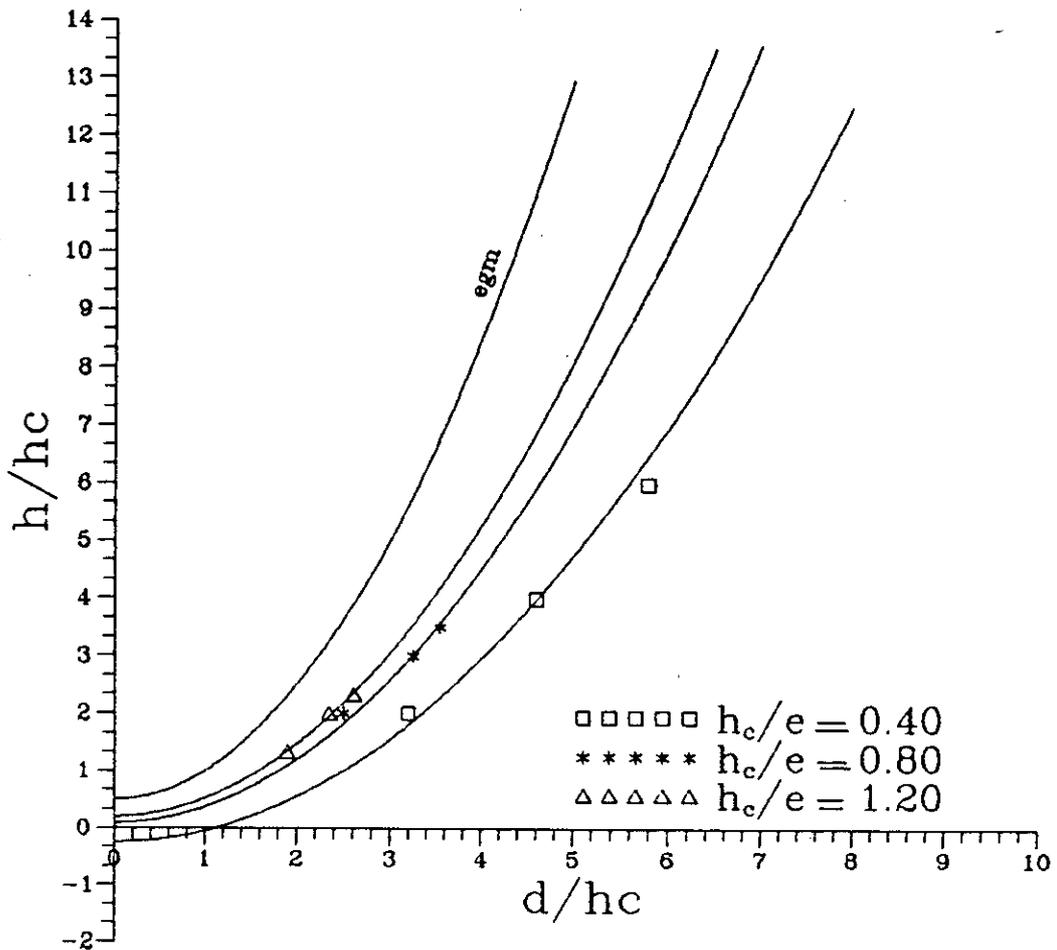
$$hc = 6 \text{ cm} : y = \frac{x^2}{3,16} + 0,20$$



FIG(4 7): zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sur sol homogene ($e=15$ cm)
(egm:model electrogeometrique)



FIG(48) : zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sur sol homogene ($e=10$ cm) (egm:model electrogeometrique)



FIG(49) : zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sur sol homogène ($e=5$ cm) (egm: model électrogeométrique)

D'après les résultats obtenus, les points expérimentaux sont aux erreurs près confondus avec les courbes théoriques trouvées précédemment. Ceci nous confirme la validité du modèle électro-géométrique proposé dans le cas d'un sol mauvais conducteur. (sable sec)

Nous remarquons que le rayon de protection du paratonnerre vertical augmente à chaque fois que l'amplitude du courant de foudre augmente (h/h_c augmente)

Pour une épaisseur du sol donnée et les grands rapports h_c/e , les zones d'attraction sont proches de celle définie pour le modèle électro-géométrique, par contre pour les petits rapports, les zones sont plus larges.

Nous constatons que le niveau de terre fictive augmente à chaque fois que l'épaisseur du sol augmente.

CONCLUSION

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les phénomènes de décharges de foudre et en particulier des intervalles d'air tige-plan.

Les essais effectués ont permis d'observer les différents types de décharges qui peuvent avoir lieu dans le cas du système tige-plan homogène avec paratonnerre vertical.

La zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dépend de la distance entre la tige et la terre, la hauteur h_c du paratonnerre et de la nature du sol.

Pour des épaisseurs considérables par rapport à la hauteur du paratonnerre h_c , les zones d'attraction sont plus larges que celle définie pour le modèle électro-géométrique

Par contre pour des épaisseurs comparables avec les hauteurs h_c , les zones d'attraction sont plus proches du modèle électro-géométrique.

Le système avec paratonnerre vertical sur sol mauvais conducteur est équivalent à un système avec sol conducteur en ne mesurant pas la hauteur h_c du paratonnerre à partir de la surface du sol mais à un niveau plus bas.

Le niveau de la terre fictive dépend de la configuration du système, de l'épaisseur du sol, et de la nature du matériau. Contrairement aux sols hétérogènes ou $l_{em} \ll l_g$ à une certaine limite; il reste largement vérifiée pour les terres mauvaises conductrices.

Il serait intéressant de compléter ce projet, en étudiant l'influence de l'épaisseur de la terre sur les zones d'attraction d'un paratonnerre vertical sur plusieurs matériaux et conductivités différentes.

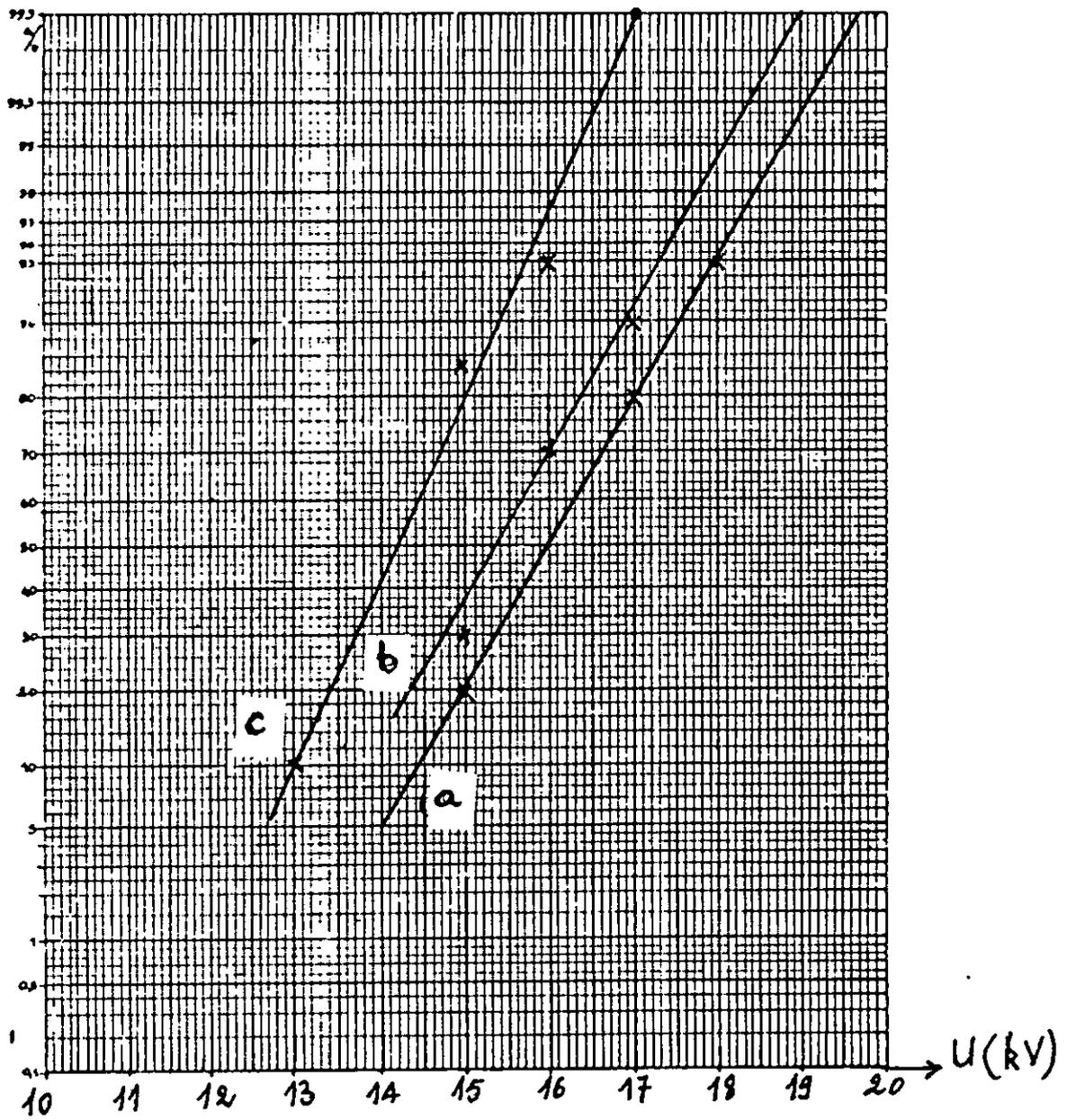
BIBLIOGRAPHIE

- [1]- G. LEROY et C. GARY : "Propriétés diélectriques de l'air et les tres hautes tensions" Edition Eyrolles - Paris 1984
- [2]- M. AGUET et M. IANOVICI : "Taité d'électricité - haute tension Edition Georgie - 1982
- [3]- C.GARY (RGE N3 Mai 1989) : "La foudre et les phénomènes orageux Collection de la direction des études et recherche d'E D F
- [4]- ATEK et CHEMLAL : "Détermination expérimentale des zones d'attraction d'un paratonnerre hétérogène projet de fin d'études E.N.P Alger 1989
- [5]- A. KABECHE : "Utilisation d'un paratonnerre vertical dans le cas d'un sol hétérogène" projet de fin d'études E.N.P Alger 1991
- [6]- Technique d'ingénieur : "Isollement des lignes et postes" D.670 - 7.
- [7]- A. Boubakeur et A. Mekhaldi : "Capture zones of a lighting conductor in the case of bad conducting" mepson 92 paper assint univ.Egypt.
- [8]- J. FERRAS : "Influence des propriétés électrogéologique d'un sol sur les points d'impact de la décharge de foudre" these de MAGISTERE E.N.P Alger 87
- [9]- K. MILOUDI : "Utilisation d'un paratonnerre horizontal sur sol hétérogène P.F.E 87"
- [10]- A. Boubakeur : "Protection contre la foudre dans le cas d'une terre hétérogène"
- [11]- R.B ANDERSON et J.B ERICHSON : "les paramètres de la foudre en vue d'une application industrielle electra 69 Mars 1980
- [12]- Albert MAYER DADEN : "Protection contre les surtensions dans les réseaux M.T "Revue boverie. 579
- [13]- C. GARY : "Electricité de France fascicule N.8"
- [14]- A. BOUBAKEUR - J. FERRAS : "Décharge de foudre dans les intervalles d'air tige plan avec terre hétérogène" 8ème J.T.E.A rapport N.7 Tunis 1987

A N N E X E — A —
* * * * *

LES VARIATIONS DE LA FREQUENCE DE DECHARGE EN FONCTION
DE LA TENSION .

LES VALEURS DE U DONNANT 100 % DE DECHARGE SUR LE
SOL SONT TIREES DE CES COURBES.

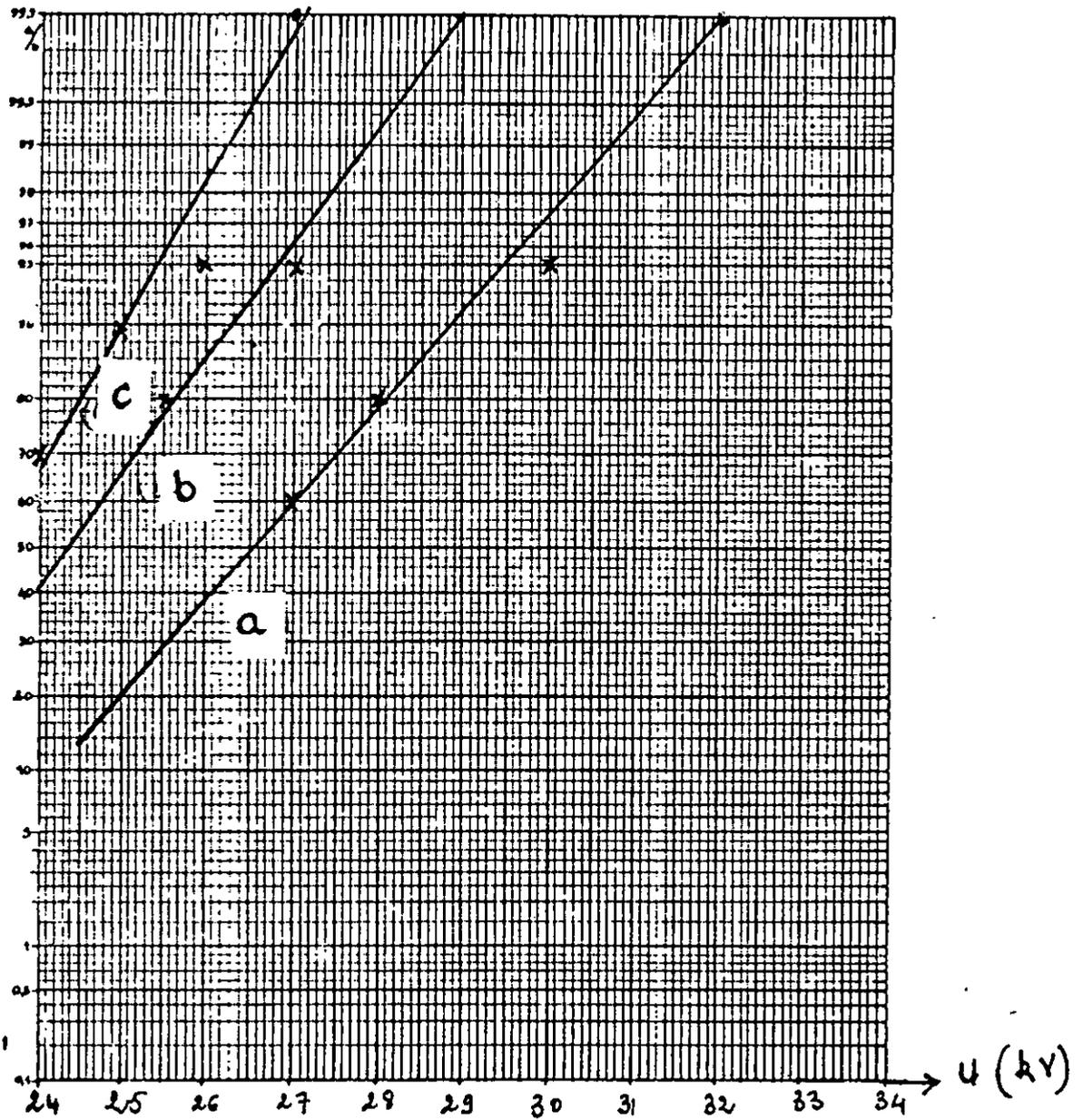


$h = 4 \text{ cm}$

(a): $e = 15 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 20 \text{ kV}$

(b): $e = 10 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 19 \text{ kV}$

(c): $e = 5 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 17 \text{ kV}$

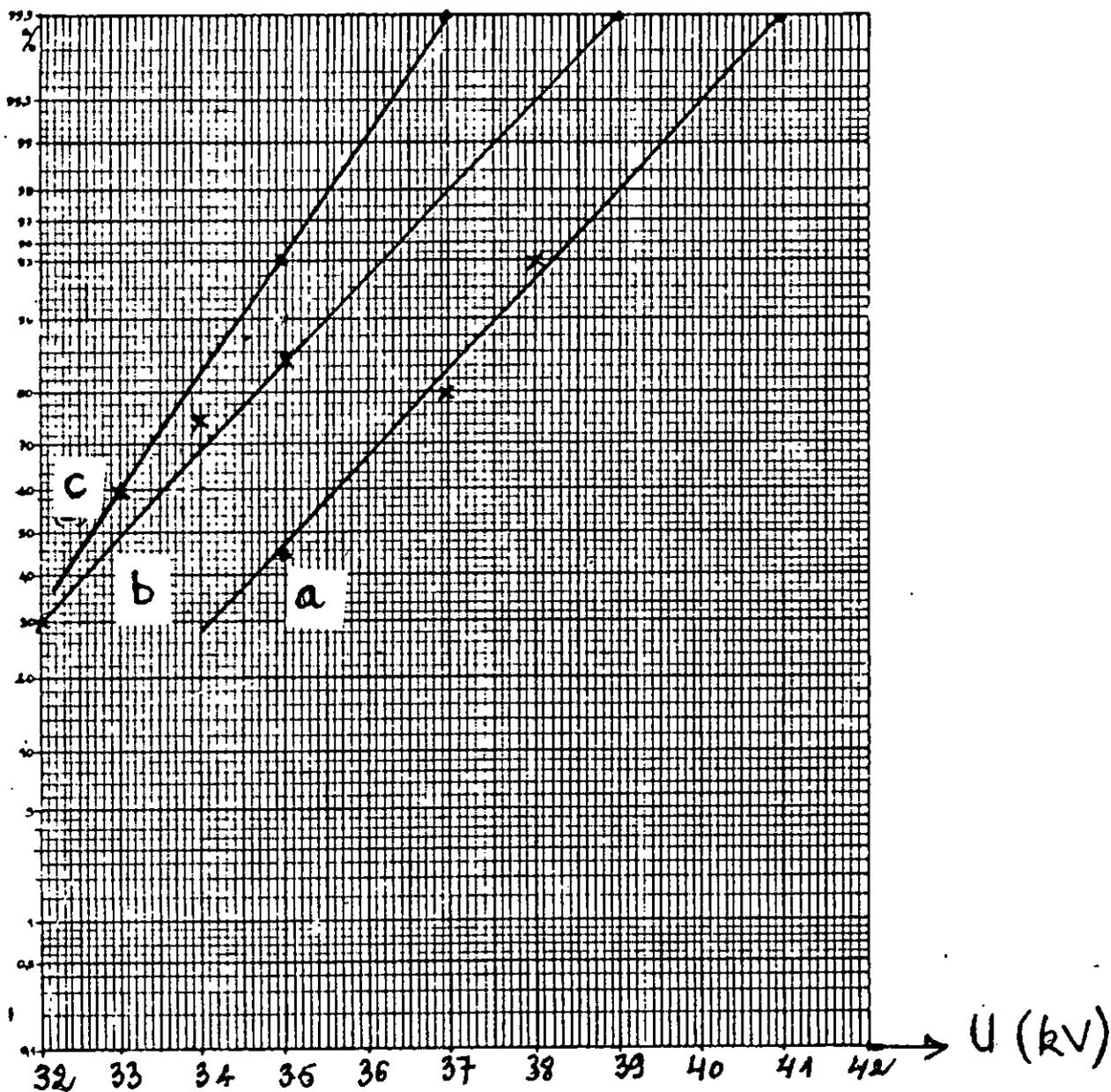


$$h = 8 \text{ cm}$$

$$(a): e = 15 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 32 \text{ kV}$$

$$(b): e = 10 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 29 \text{ kV}$$

$$(c): e = 5 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 27 \text{ kV}$$



$$h = 12 \text{ cm}$$

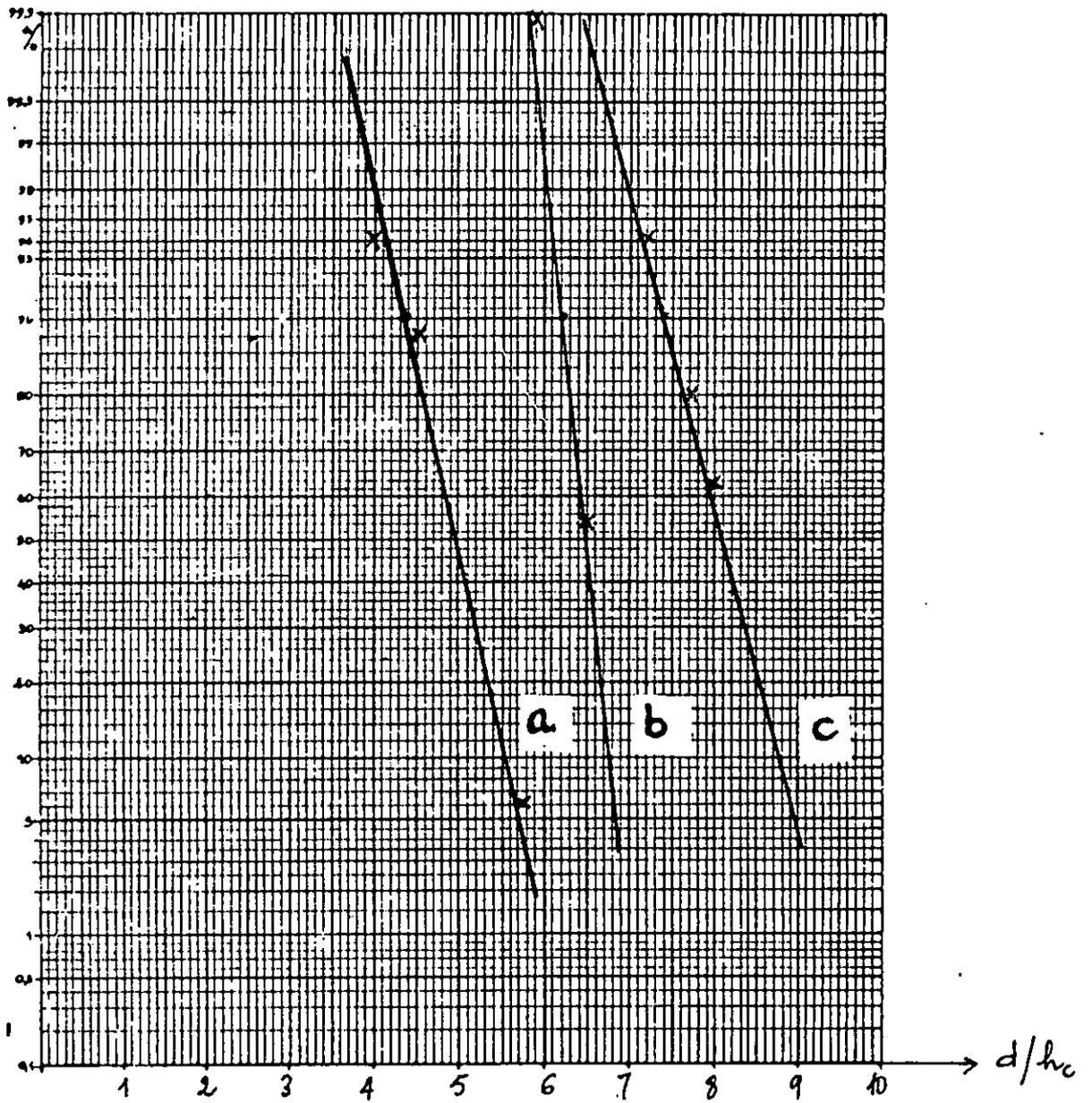
$$(a) \quad e = 15 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 41 \text{ kV}$$

$$(b) \quad e = 10 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 39 \text{ kV}$$

$$(c) \quad e = 5 \text{ cm} \longrightarrow U_{100\%} = 37 \text{ kV}$$

A N N E X E - B -

LES VARIATIONS DE LA FREQUENCE DE DECHARGE SUR
PARATONNERRE EN FONCTION DE LA DISTANCE d SEPARANT
L'AXE DE LA TIGE ET LE CONDUCTEUR

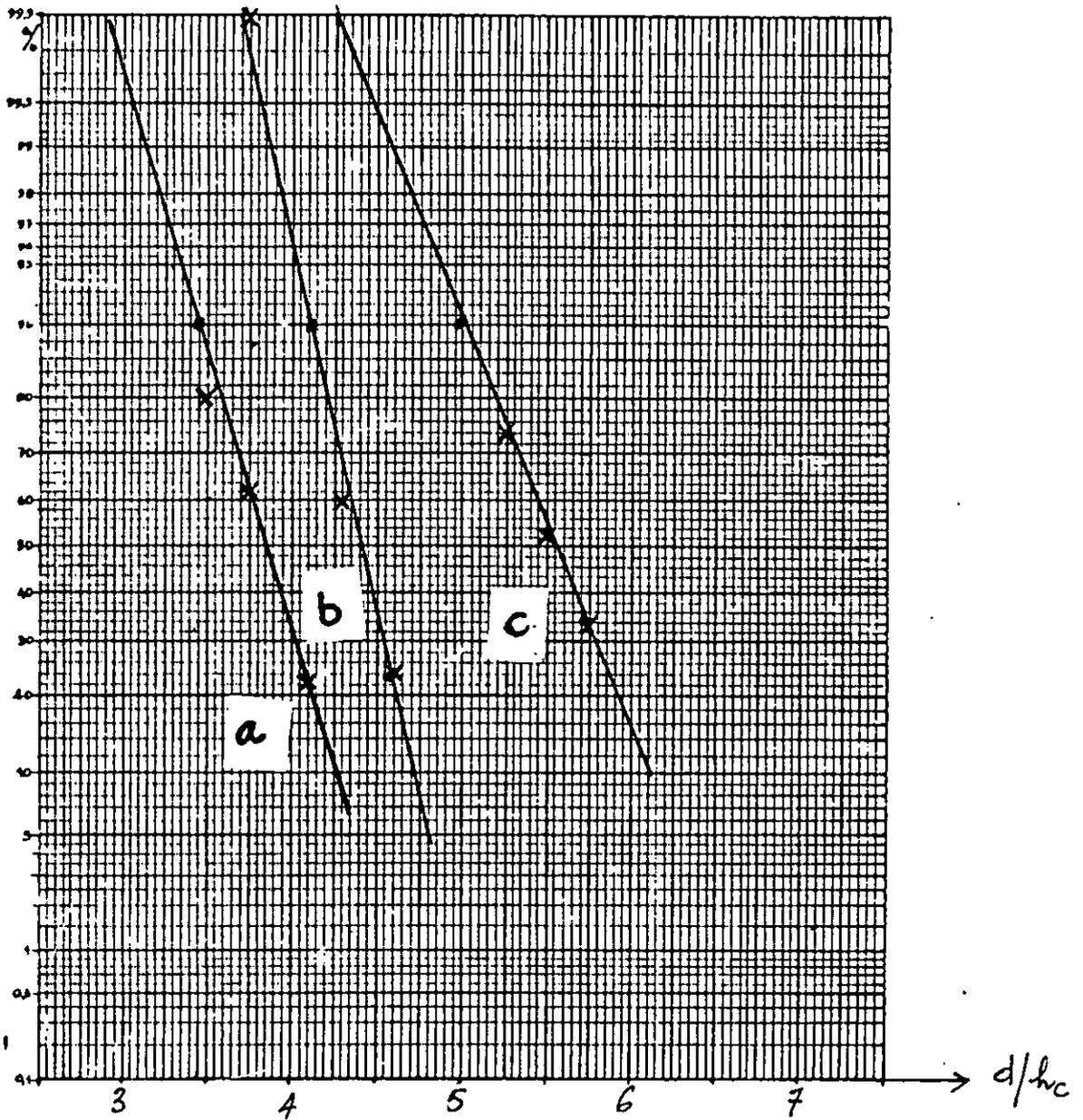


$h_c = 2 \text{ cm}$ et $e = 15 \text{ cm}$.

$$(a) : \frac{h}{h_c} = 2 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 4,40$$

$$(b) : \frac{h}{h_c} = 4 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 6,25$$

$$(c) : \frac{h}{h_c} = 6 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 7,40.$$

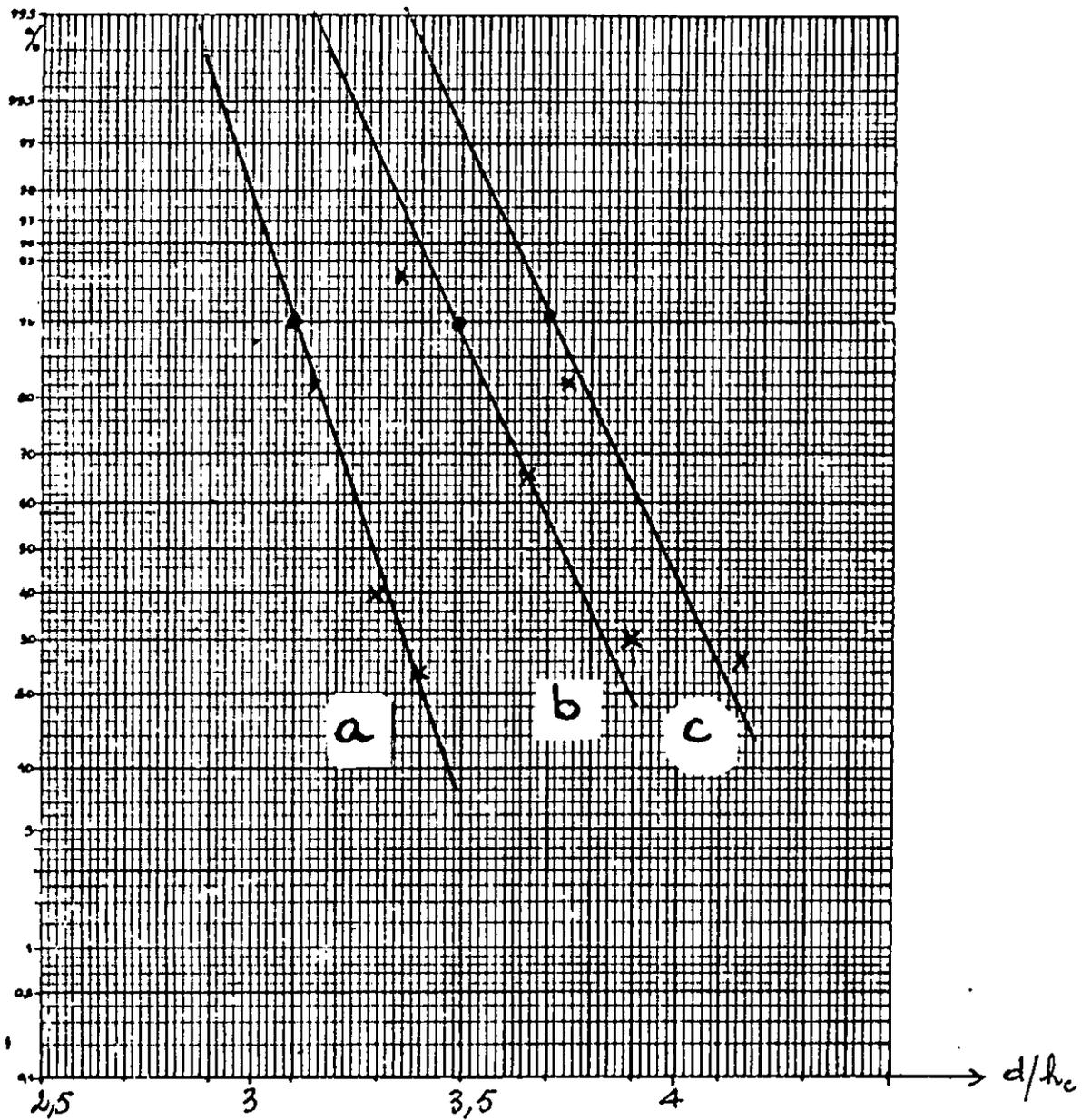


$h_c = 4 \text{ cm}$ et $e = 15 \text{ cm}$.

(a): $\frac{h}{h_c} = 2 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,45$

(b): $\frac{h}{h_c} = 3 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 4,15$

(c): $\frac{h}{h_c} = 4 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 5,00$

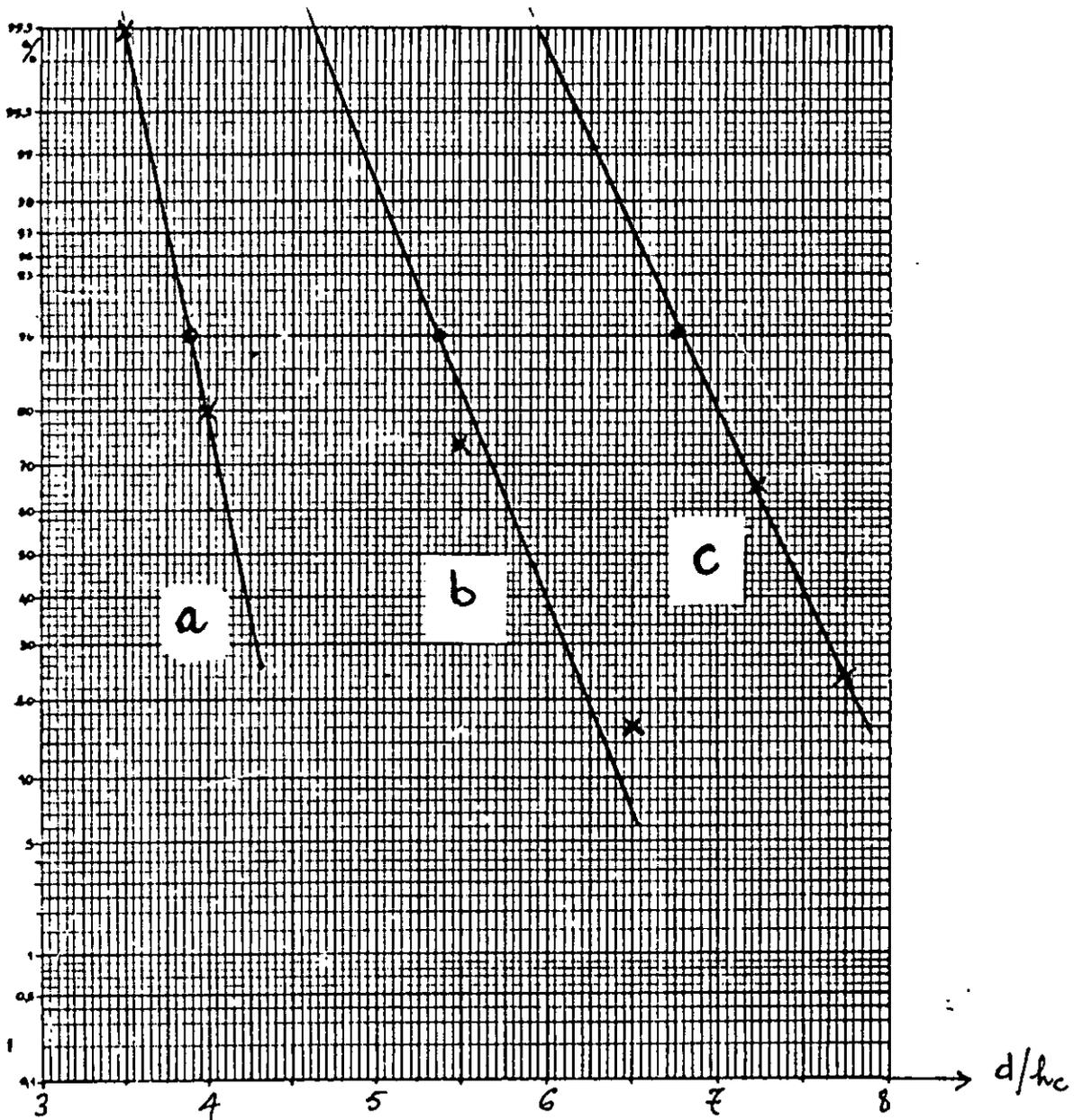


$h_c = 6 \text{ cm}$ et $e = 15 \text{ cm}$.

(a) : $\frac{h}{h_c} = 2,00 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,10$

(b) : $\frac{h}{h_c} = 2,66 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,50$

(c) : $\frac{h}{h_c} = 3,00 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,70$

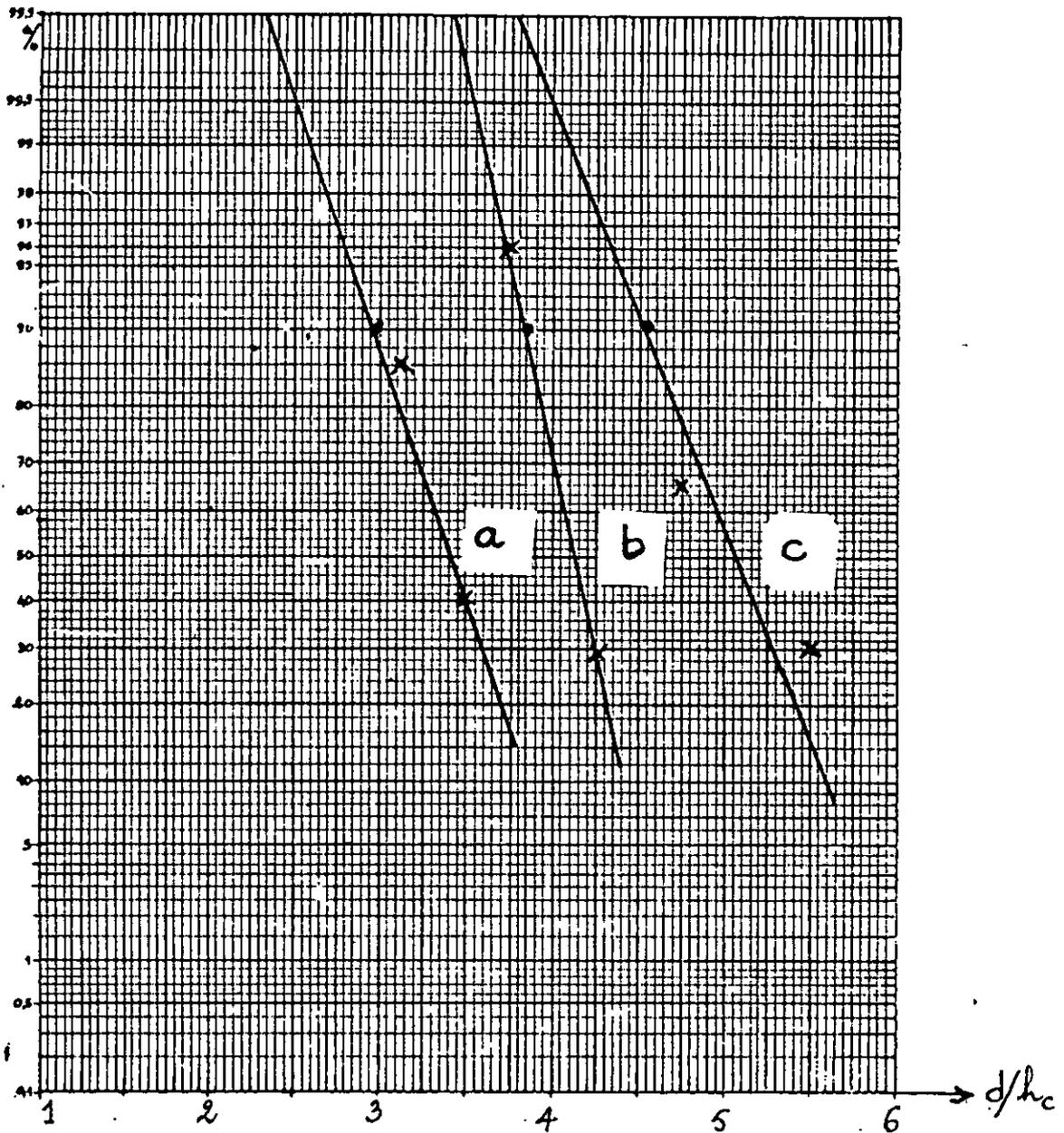


$h_c = 2 \text{ cm. et } c = 10 \text{ cm.}$

(a) : $\frac{h}{h_c} = 2 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,90$

(b) : $\frac{h}{h_c} = 4 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 5,40$

(c) : $\frac{h}{h_c} = 6 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 6,75$

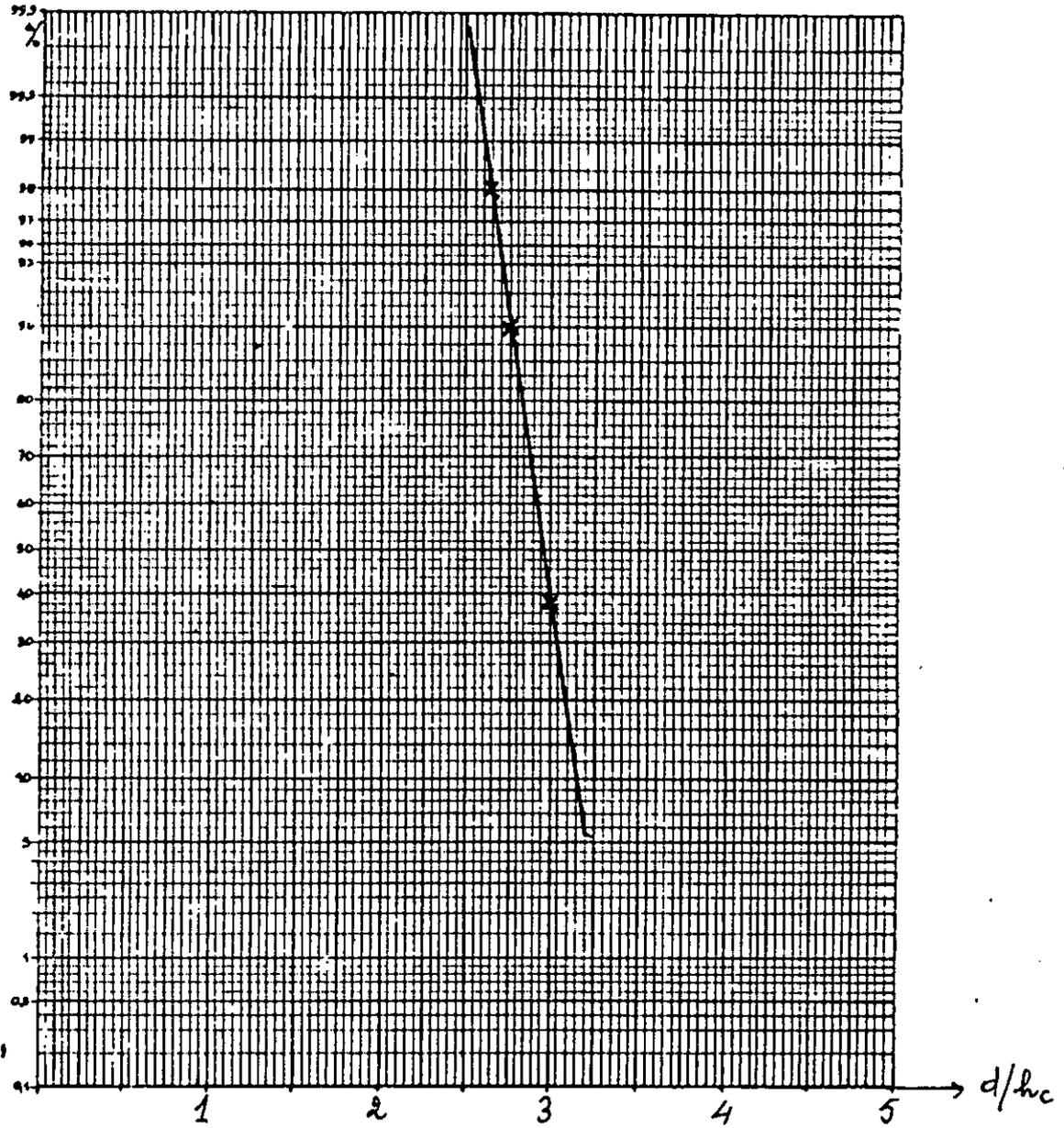


$h_c = 4 \text{ cm}$ et $e = 10 \text{ cm}$

$$(a) : \frac{h}{h_c} = 2,00 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,00$$

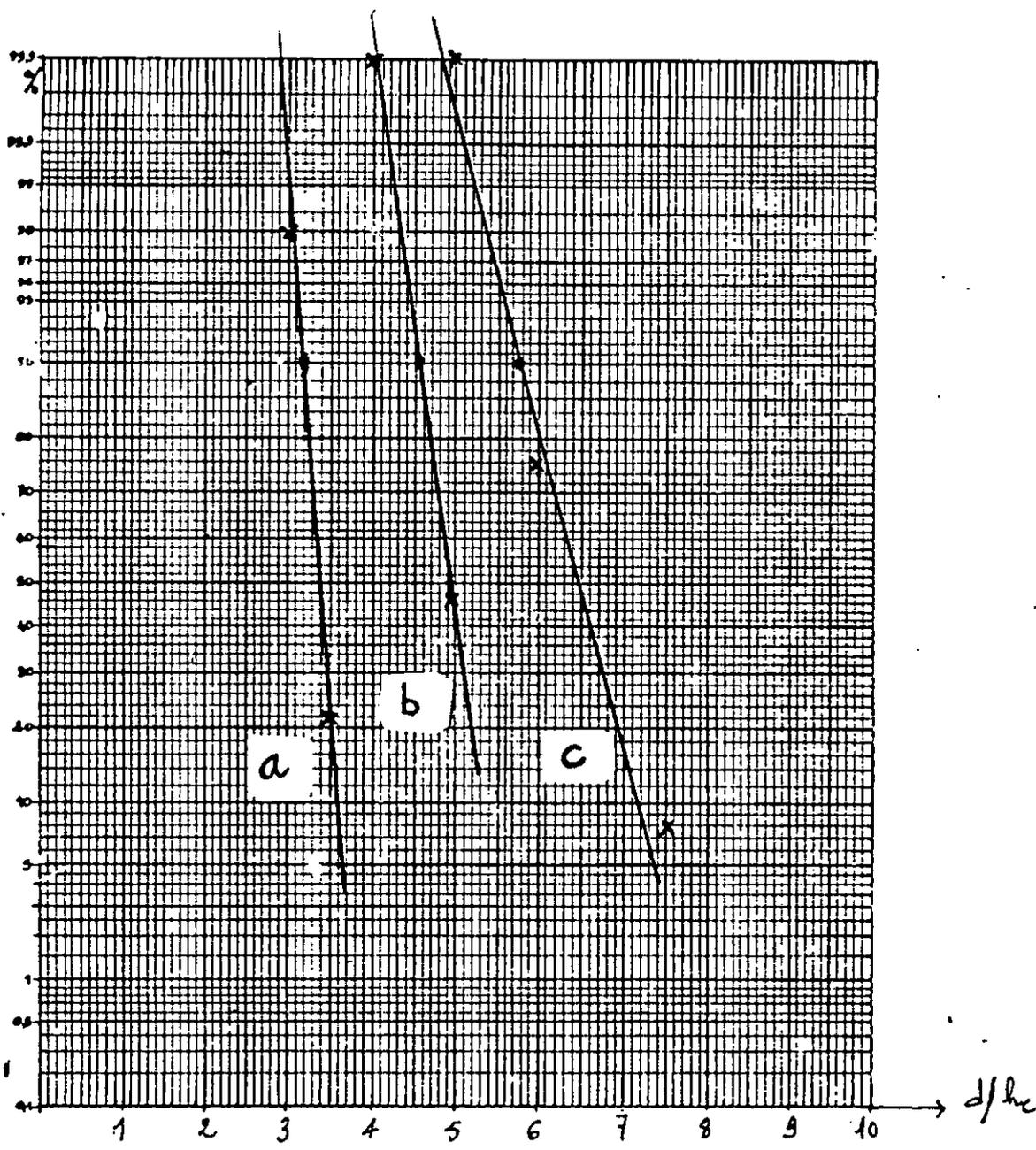
$$(b) : \frac{h}{h_c} = 3,00 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,85$$

$$(c) : \frac{h}{h_c} = 4,25 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 4,55$$



$$h_c = 6 \text{ cm et } e = 10 \text{ cm.}$$

$$h/h_c = 2 \longrightarrow \frac{d_{\text{max}}}{h_c} = 2,75.$$

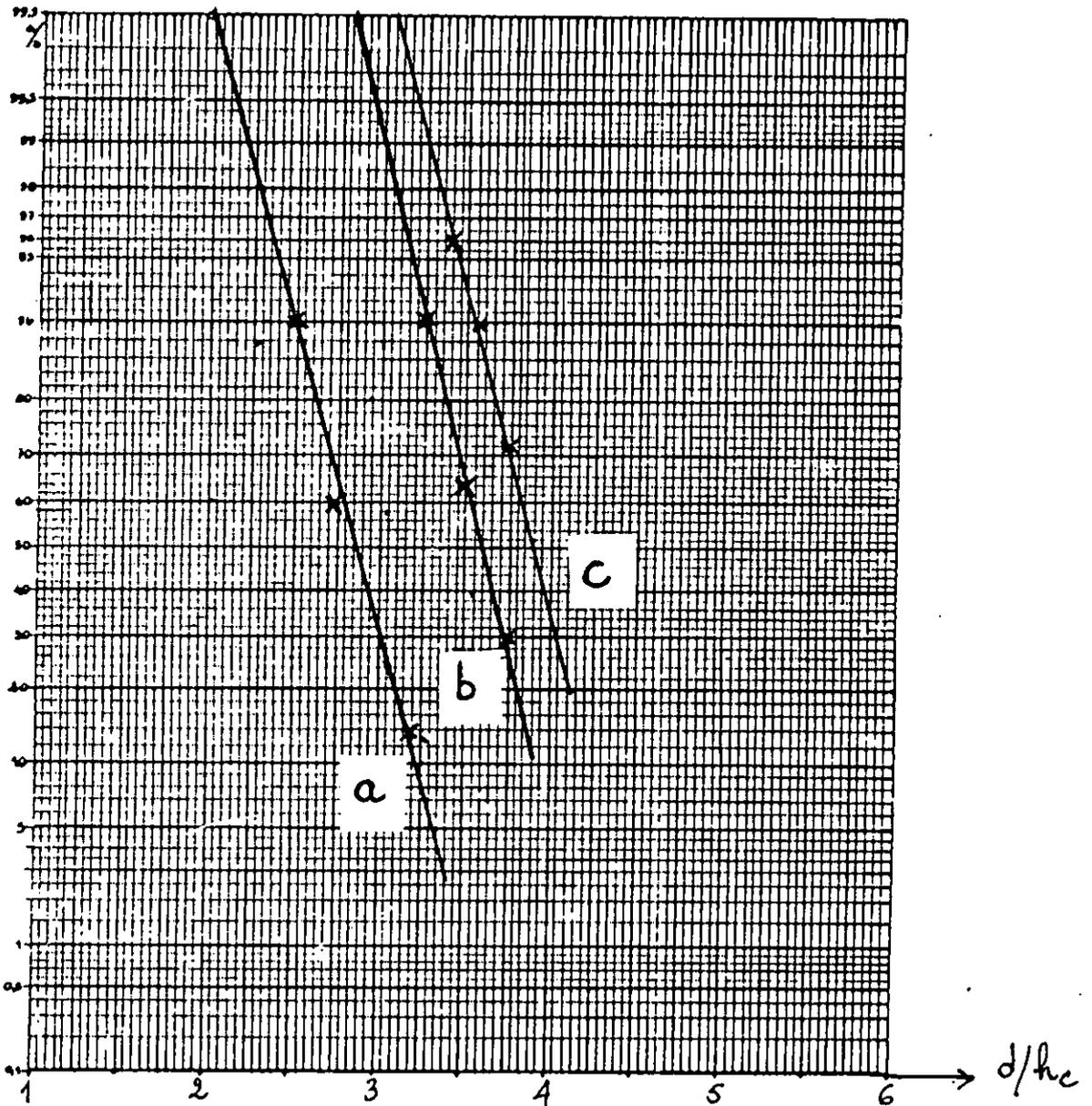


$h_c = 2 \text{ cm}$ et $e = 5 \text{ cm}$

(a) $\frac{h}{h_c} = 2 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,2$

(b) $\frac{h}{h_c} = 4 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 4,6$

(c) $\frac{h}{h_c} = 6 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 5,8$

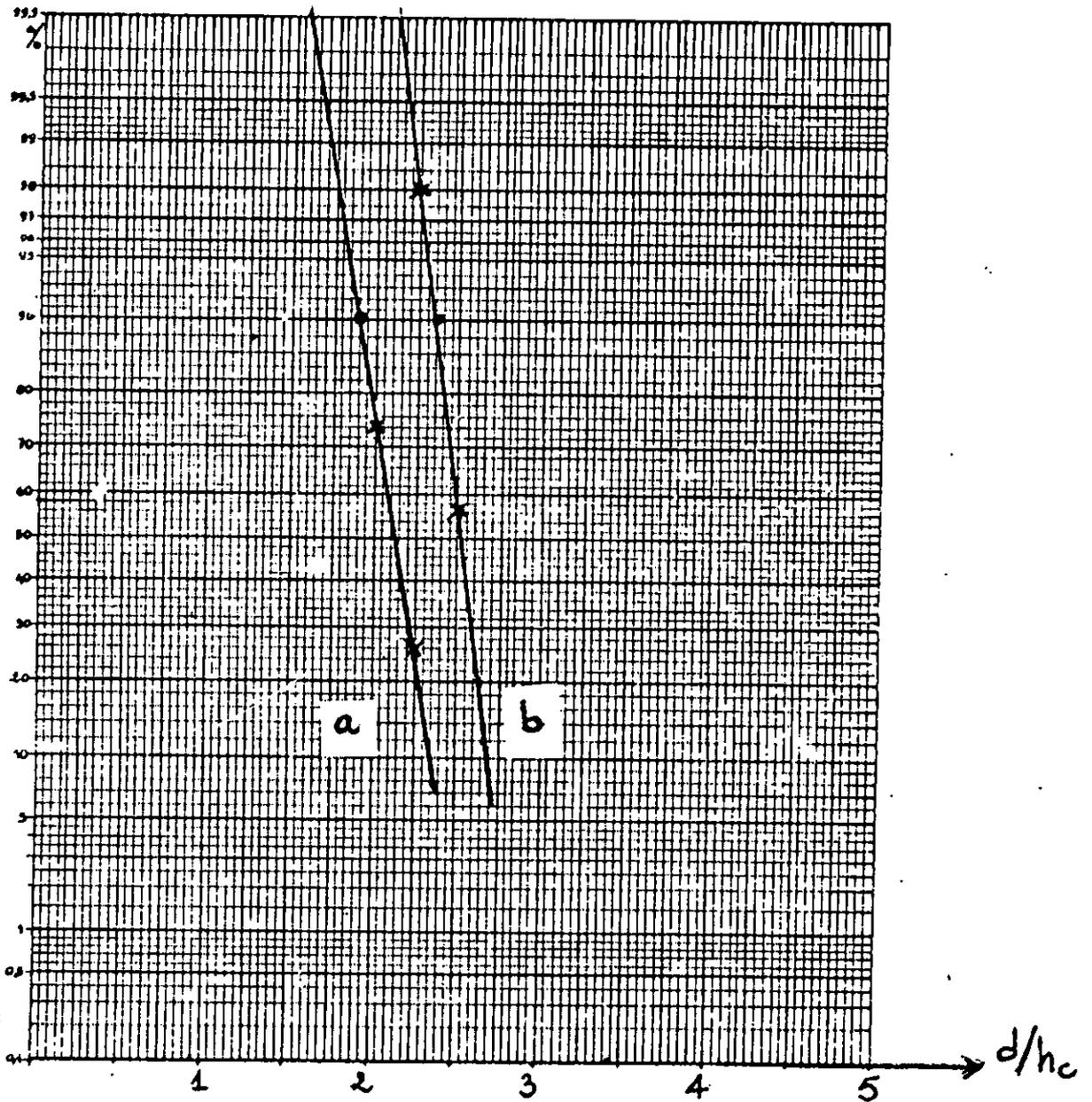


$h_c = 4 \text{ cm}$ et $e = 5 \text{ cm}$.

(a) : $\frac{h}{h_c} = 2,00 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 2,50$

(b) : $\frac{h}{h_c} = 3,00 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,25$

(c) : $\frac{h}{h_c} = 3,50 \longrightarrow \frac{d_{90\%}}{h_c} = 3,55$



$h_c = 6 \text{ cm}$ et $e = 5 \text{ cm}$

(a): $\frac{h}{h_c} = 1,33 \longrightarrow \frac{dq\%}{h_c} = 1,90$

(b): $\frac{h}{h_c} = 2,00 \longrightarrow \frac{d\%}{h_c} = 2,35$

(c): $\frac{h}{h_c} = 2,33 \longrightarrow \frac{ds\%}{h_c} = 2,61$