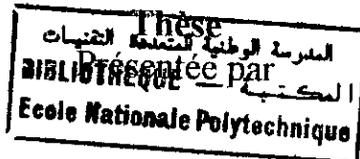


**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**  
DER de Génie Electrique et Informatique



**M<sup>r</sup> BOUMAZA Salim Abdelkader Ahmed**  
Ingénieur en électrotechnique

pour l'obtention du diplôme de

**Magister en ELECTROTECHNIQUE**

Option: Réseaux et Hautes Tensions

***AMORÇAGE AUX CHOCS DE FOUDRE  
DES INTERVALLES D'AIR TIGE-PLAN  
AVEC TERRE HETEROGENE***

Soutenue publiquement le juin 1998 devant le jury composé de :

A. Zerguerras.....	Professeur à l'E.N.P.....	Président
A. Boubakeur.....	Maître de conférence à l'E.N.P.....	Rapporteur
A. Hellal.....	Maître de conférence à l'E.N.P.....	Examineur
A. Ouabdesselam.....	Chargé de cours à l'E.N.P.....	Examineur
R. Belaïcha.....	Chargé de cours à l'UMM Tizi-Ouzou.....	Examineur
A. Bouzoualegh.....	Directeur de Production à SONELGAZ.....	Invité

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

A la mémoire de mon oncle Ahmed

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier vivement mon promoteur A. Boubakeur et je profite de l'occasion qui m'est offerte pour lui exprimer toute ma gratitude pour son apport scientifique précieux, son dévouement et pour les conseils avisés et l'encouragement constant qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à Messieurs les membres de jury, qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail.

Que Monsieur R. Belaïcha de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, veuille bien agréer ma profonde reconnaissance pour l'aide précieuse qu'il ma apportée durant le déroulement des essais.

Je ne saurai comment remercier Monsieur H. Fodil pour avoir faciliter les démarches administratives au sein du laboratoire ENIDIM de Boumèrdès pour la préparation de la quantité d'eau distillée utilisée dans le modèle expérimentale. Son aide m'a été d'un apport appréciable.

Je remercie chaleureusement D. Mostefaï, A. Zeroual et O. Bouhali, qui m'ont apporté une grande aide lors de la saisie et la mise au point de ce mémoire.

	Page
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I– Intervalles pointe–plan sous tension de choc de foudre .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Aspect statistique .....	4
I.3 Intervalle pointe positive–plan .....	6
I.3.1 Influence de la géométrie .....	6
I.3.2 Influence des conditions climatiques .....	8
I.4 Intervalle pointe négative–plan .....	10
I.4.1 Influence de la géométrie .....	10
I.4.2 Influence des conditions climatiques .....	10
I.5 Influence des propriétés électrogéologiques du sol .....	10
I.5.1 Cas du sol hétérogène .....	11
I.5.2 Cas du sol homogène .....	13
I.5.3 Influence de la conductivité du sol sur la rigidité des intervalles d'air tige négative–plan .....	14
<b>Chapitre II– Techniques expérimentales .....</b>	<b>17</b>
II.1 Introduction .....	17
II.2 Détermination de la tension $U_{50}$ .....	17
II.3 Modèle expérimental .....	18
II.3.1 Cas du sol homogène .....	18
II.3.2 Cas du sol hétérogène .....	20
II.3.3 Cas du sol discontinu .....	21
<b>Chapitre III– Résultats expérimentaux et discussions .....</b>	<b>23</b>
III.1 Introduction .....	23
III.2 Sol homogène .....	23
III.2.1 Influence de l'intervalle .....	23
III.2.2 Influence de la conductivité du sol .....	24
III.2.3 Influence de la polarité de la tige .....	29
III.2.4 L'écart type .....	30
III.3 Sol discontinu .....	32
III.3.1 Influence la distance "d" .....	32
III.3.2 Influence de la longueur de l'intervalle "h" .....	34
III.3.3 Influence de l'épaisseur .....	38
III.3.4 L'écart type .....	38
III.4 Sol hétérogène .....	40
III.4.1 Types de décharges observées .....	40

III.4.2 Influence de la distance .....	40
III.4.3 Influence de la conductivité .....	46
III.4.4 Influence de l'intervalle .....	49
III.4.5 L'écart type .....	49
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>51</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>53</b>
<b>Annexes</b>	

## INTRODUCTION GENERALE

L'existence de zones localisées particulièrement touchées par la foudre, tel que les failles humides, les nappes d'eau ou les terrains marécageux, est allouée aux facteurs géologiques et particulièrement à la conductivité des sols [GAR94]. Cette hypothèse repose sur un certain nombre d'observations concernant le foudroiement des lignes à haute tension où il a été constaté que le pylône dont la résistance de terre est la plus faible, était le plus souvent foudroyé. Une reproduction du phénomène à une plus petite échelle en laboratoire a permis de confirmer cette observation [LER84]. Cependant, malgré qu'elles pussent être très bénéfiques pour la protection contre la foudre, les recherches sur un éventuel effet de la conductivité du sol sont restées très restreintes [SZU79] [LET80].

Constatant cet état de fait, le laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique s'est attribué, il y a treize ans de cela, la tâche d'entamer des recherches plus approfondies sur les effets des propriétés électrogéologiques du sol sur les points d'impact de la décharge de foudre et sur les zones d'attraction des paratonnerres [BOU97]. Les résultats de ces travaux, publiés tout au long de cette période, ont clairement mis en évidence l'importance de ces paramètres et ont montré que leur prise en considération est essentielle quant à la protection contre la foudre. Encore, les variations observées sur la tension à 100% de décharges disruptives, mesurée dans le but d'être appliquée à l'intervalle lors de la détermination des zones d'attractions, laissent supposer que ces propriétés électrogéologiques pourraient même avoir une certaine incidence sur la rigidité des intervalles d'air tige-plan. C'est ainsi qu'est venue l'idée d'entamer une étude ayant pour but d'évaluer l'influence que la conductivité du sol peut avoir sur la rigidité des intervalles d'air. Notre travail, entrant dans ce cadre, consiste à déterminer expérimentalement l'influence de l'hétérogénéité de l'électrode mise à la terre des petits intervalles d'air tige-plan, sur la tension à 50% de décharges disruptives ( $U_{50}$ ), lorsqu'ils sont soumis à une onde de choc de foudre. Les deux cas de

polarité sont considérés. Pour raison de comparaison, le cas d'un système tige-plan avec sol homogène de conductivité variable est aussi étudié.

- Le premier chapitre est consacré, en premier lieu, à la présentation des principales caractéristiques des intervalles d'air tige-plan sous tension de choc de foudre normalisée. Nous présentons ensuite les travaux effectués au niveau du laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique dont notre travail fait partie des perspectives. Dans cette présentation un intérêt particulier est donné aux résultats concernant l'influence de la conductivité du sol sur la tension  $U_{100}$ .
- Dans le deuxième chapitre nous présentons les différents modèles et les techniques expérimentales utilisés dans notre étude.
- Le troisième chapitre regroupera l'ensemble des résultats obtenus et leurs interprétations.
- Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale inspirée de notre analyse de l'ensemble des résultats.

# INTERVALLES POINTE-PLAN SOUS TENSION DE CHOC DE Foudre

## I.1 Introduction

Les intervalles d'air que l'on rencontre habituellement le long des lignes aériennes ou dans les postes sont d'une grande variété. La géométrie des électrodes et les contraintes appliquées à ces intervalles sont très diverses. L'intervalle pointe positive-plan, à l'exception de toutes les autres configurations possibles, a fait l'objet d'études nombreuses et approfondies. Ceci tient principalement au fait que ce type d'intervalle, en plus de sa géométrie dite à une seule électrode active et qui simplifie l'étude physique des mécanismes d'amorçage, conduit à une tenue diélectrique minimale dans l'air. Cette comparaison étant évidemment faite avec des systèmes ayant une même distance entre les électrodes. Bien que rarement rencontré sur un réseau, il constitue donc une butée qu'il est important de bien connaître pour le dimensionnement. Cela a fait que les recherches effectuées sur les décharges en polarité positive sont restées longtemps prioritaires sur l'étude de la polarité négative. Cette dernière, conduisant généralement à des gradients d'amorçage beaucoup plus élevés, présente donc une moindre importance pour le dimensionnement diélectrique des réseaux. Néanmoins, la connaissance de la décharge positive dans un intervalle pointe-plan ayant beaucoup progressé, un intérêt croissant a été porté à l'étude des phénomènes pouvant se produire dans le cas de la pointe négative. Un nombre important d'investigations a ainsi porté sur l'étude de la configuration pointe négative-plan. Une autre motivation conduisant à l'étude des grandes étincelles de polarité négative en laboratoire provient du fait que la plupart des coups de foudre ont lieu entre un nuage chargé négativement et le sol. Plusieurs travaux ont en effet montré qu'il existait plusieurs similitudes entre les décharges atmosphériques et les grandes étincelles négatives et que ces dernières peuvent simuler quelques effets de la foudre [SCH34] [SCH53] [WAG61] [HUT88] [SUZ75].

Dans ce chapitre, nous présentons, dans un premier lieu, les principales caractéristiques de ce type d'intervalle lorsqu'il est soumis à la tension de choc de foudre normalisée 1,2/50  $\mu$ s. Dans cette présentation nous nous sommes contentés de rappeler les notions et les résultats des différents travaux effectués dans ce domaine qui ont un rapport direct avec la technique expérimentale utilisée dans notre étude ou qui serviront par la suite comme référence à laquelle seront comparés nos résultats d'essais. Dans un deuxième lieu, nous présentons les différents travaux effectués au laboratoire de Haute Tension de l'E.N.P. sur l'effet des propriétés électrogéologiques du sol sur les points d'impact de la décharge de foudre et sur les zones d'attraction des paratonnerres. Ces travaux sont à l'origine de notre étude.

## I.2 Aspect statistique

Le phénomène de la rupture diélectrique des isolants est, par essence, un phénomène aléatoire. Cette propriété est expliquée par l'étroite liaison entre ce phénomène et le comportement microscopique, fortement influencé par les lois du hasard, des particules élémentaires constituant l'isolant [KUF84] [NAS71] [KIN85] [ALS68]. Cet aspect aléatoire se retrouvant dans les caractéristiques globales des isolants, il devient naturel d'appliquer les notions de probabilités et de calcul statistique à leur étude.

En effet, quand un certain nombre de chocs d'une onde de forme parfaitement définie et d'amplitude  $U_{cr}$  donnée est appliquée à un intervalle, seul un certain pourcentage en provoquera l'amorçage. On est ainsi amené à définir une probabilité d'amorçage  $P_A$  qui dépend de la valeur  $U_{cr}$  de la contrainte de tension. Le comportement de l'isolation peut être représenté par une fonction  $P_A(U_{cr})$ . Pour les applications pratiques, cette fonction peut être approchée par une expression mathématique dépendant au moins de deux paramètres. L'hypothèse de la distribution normale est acceptée dans la plupart des études publiées [LER84] [KUF84] [KIN78].

Il suffit dans ce cas de deux paramètres pour caractériser la variation de la probabilité d'amorçage  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$ . Généralement on utilise  $U_{50}$  et  $\sigma$  :

$$P_A = \int_{-\infty}^{U_{cr}} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{U - U_{50}}{\sigma \sqrt{2}}\right)^2\right) dU \quad (I.1)$$

$U_{50}$  est la valeur de  $U_{cr}$  qui provoque 50% de tenues et 50% d'amorçages.  $\sigma$  caractérise la pente de la droite obtenue sur un papier gaussio-arithmétique (figure I.1). C'est l'écart type de la loi normale associée. La modélisation de la probabilité d'amorçage par une répartition normale s'avère cependant insuffisante dès qu'il s'agit d'obtenir une bonne estimation des tensions à très faible probabilité de décharge qui sont d'un grand intérêt pour le

dimensionnement des intervalles d'air. Dans ce cas, une distribution mieux adaptée et plus exacte dans la zone de faibles probabilités est préférable. Ainsi la distribution exponentielle de Weibull est souvent utilisée [CAR72] [HYL83].

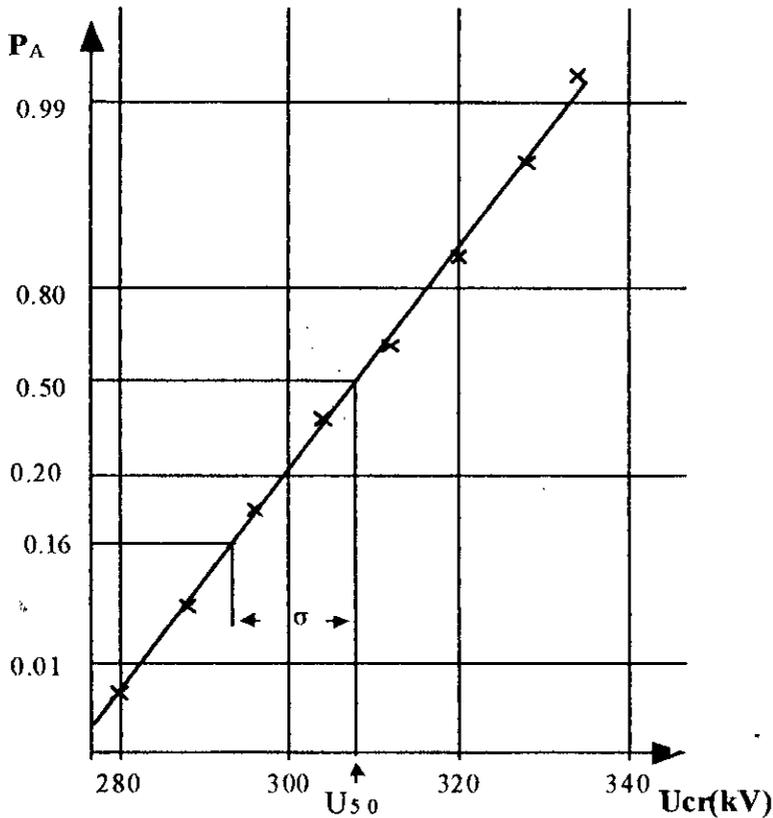


Figure I.1.– Probabilité d'amorçage en fonction de la tension de crête.

La détermination de  $P_A$  nécessite la réalisation d'un grand nombre d'essais. Dans le cas de la méthode des paliers multiples constants, pour chaque valeur de la tension  $U_{cr}$ , quelques dizaines d'essais sont nécessaires pour évaluer  $P_A$ . Le rapport du nombre d'amorçages observés au nombre total d'essais effectués à chaque niveau est pris comme estimateur de la probabilité  $P_A$  de décharges disruptives. Les  $n$  valeurs ( $n$  étant le nombre de niveaux) obtenus dans un essai peuvent être ajustées à une fonction présumée de distribution de probabilité en les portant en fonction de  $U_{cr}$  sur un papier graphique spécial qui donne une ligne droite lorsque la distribution suit la loi présumée. Une détermination analytique peut également être réalisée par la méthode des moindres carrés ou du maximum de vraisemblance [BOW65] [GIR67]. Dans le cas d'une distribution normale, la méthode up and down (montée- descente) est préférable à la méthode des paliers parcequ'elle permet de réduire le nombre d'essais. On

montre [BOU71] qu'il suffit alors d'une cinquantaine d'essais pour acquérir une bonne connaissance de  $U_{50}$ . La précision obtenue sur  $\sigma$  n'est cependant pas excellente.

Cet aspect statistique de la décharge signifie que la probabilité d'amorçage ne saurait être mesurée avec une précision absolue. Elle est soumise à l'erreur statistique et la valeur déterminée à partir des essais n'en constitue qu'une estimation approchée. La réduction de cette incertitude statistique nécessite la réalisation d'un très grand nombre d'essais qui prendraient un temps considérable pendant lequel des paramètres incontrôlables et extérieurs à ceux étudiés pourraient varier. L'incertitude statistique se trouverait ainsi remplacée par une autre incertitude et dans tous les cas une incertitude résiduelle subsiste. Cette dernière ne facilite évidemment pas l'étude des caractéristiques des isolants et il sera difficile, sinon impossible, de dégager l'effet d'un paramètre s'il a une influence inférieure à cette incertitude.

### I.3 Intervalle pointe positive-plan

#### I.3.1 Influence de la géométrie

La géométrie de l'intervalle pointe positive-plan peut être caractérisée par deux paramètres principaux : la distance entre électrodes  $d$  et le rayon de courbure de l'anode. Ces deux paramètres ont une influence déterminante sur les mécanismes de la décharge. Ceci est dû au fait que les caractéristiques de celle-ci sont largement dépendantes de la répartition du champ électrique le long de l'espace interélectrodes et donc de la géométrie de l'intervalle.

##### a) Influence de la distance interélectrodes

L'influence de la longueur de l'intervalle  $d$  sur les caractéristiques d'amorçage des intervalles d'air a été très tôt observée dans les premiers travaux de recherche sur la physique des décharges électriques dans les gaz. Ainsi, le critère de claquage dans un champ stationnaire non uniforme de Townsend (équation I.2) et le critère de la formation d'un streamer à partir d'une avalanche primaire de Raether (équation I.3) [NAS71] font tous les deux intervenir la longueur de l'intervalle  $d$ :

$$\gamma \cdot \left[ \exp \left( \int_0^d \alpha \cdot dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (I.2)$$

$$\exp \int_0^{x=d} \alpha dx \approx 10^8 \quad (I.3)$$

Plusieurs travaux de laboratoire ont ensuite montré que la tension à 50% de décharges disruptives est substantiellement proportionnelle à la longueur de l'intervalle [KUF84]. Pour un système pointe positive-plan soumis à une onde de choc de foudre normalisée, la relation donnant la tension  $U_{50}$  en fonction de  $d$  est linéaire. HUTZLER donne l'équation suivante [LER84]:

$$U_{50} = 510.d(kV, m) \quad (I.4)$$

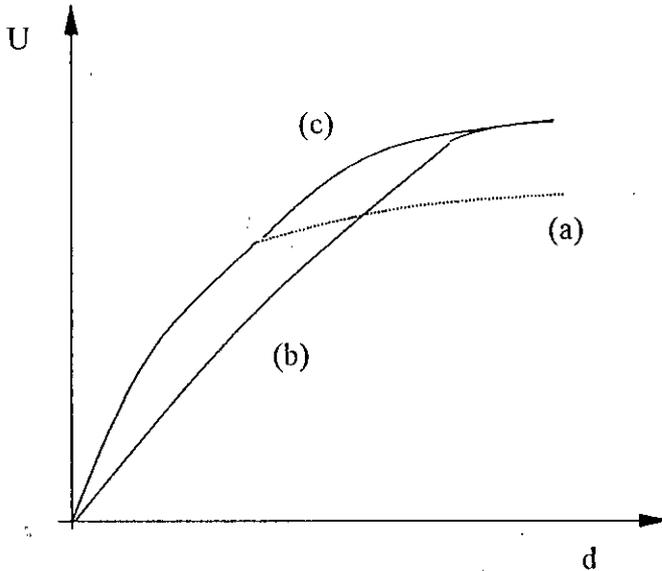
Cette linéarité n'est qu'accidentelle car d'autres formes d'onde conduisent à des tendances différentes. Toujours selon la dernière source, l'écart type  $\sigma$  reste dans tous les cas de l'ordre de grandeur de l'incertitude de mesure (voisin de 1%).

Cependant l'influence de la distance  $d$  ne se situe pas seulement au niveau des paramètres d'amorçage car les processus physiques intéressant le développement de la décharge peuvent eux aussi se trouver modifiés suivant qu'il s'agit de grandes ou de petites distances. Le développement d'une décharge dans un intervalle de plusieurs mètres conduit à des phénomènes non observés dans des intervalles de quelques centimètres. Ces phénomènes nouveaux sont liés, entre autres, au fait que la décharge se développe sur une échelle de temps beaucoup plus grande, ce qui permet l'intervention à l'échelle moléculaire de mécanismes ayant des constantes de temps beaucoup plus élevées, et à l'éloignement de la cathode et à sa non-interaction dans le développement de la décharge au moins à son début. C'est l'une des raisons de la distinction entre les grands et les petits intervalles.

## b) Influence du rayon de courbure de l'anode

L'influence de la taille de l'électrode haute tension sur la tension d'amorçage  $U_{50}$ , dépend de la grandeur relative de son rayon de courbure par rapport à la longueur d'intervalle  $d$ . Si cette dernière est faible, c'est à dire de l'ordre de grandeur du rayon de courbure de l'anode, la répartition du champ électrique est relativement homogène et le claquage survient dès l'apparition des premiers phénomènes d'ionisation dans l'intervalle. Lorsque la distance  $d$  augmente, la formation de la première couronne n'entraîne plus nécessairement, compte tenu de l'inhomogénéité croissante du champ électrique, le claquage de l'intervalle. La figure I.2 compare la caractéristique  $U_{50}=f(d)$  d'un intervalle tige-plan avec celle d'un intervalle sphère-

plan (la sphère ayant un rayon donné  $R$ ). Le rapport entre les gradients moyens de claquage des intervalles sphère-plan et tige-plan est d'autant plus grand que la distance est faible. Inversement, pour les très grandes distances, les deux courbes se rejoignent, l'intervalle sphère-plan se comportant comme un intervalle tige-plan vu la grande inhomogénéité du champ électrique.



**Figure I.2.** – (a) tension d'apparition de la couronne.  
 (b)  $U_{50}=f(d)$  pour un intervalle tige-plan.  
 (c)  $U_{50}=f(d)$  pour une sphère de diamètre donné.

### I.3.2 Influence des conditions climatiques

Dans le cas des intervalles d'air, les conditions climatiques se résument généralement à trois facteurs : la température, la pression et l'humidité.

#### a) influence de la densité de l'air

On sait depuis longtemps en physique des décharges électriques dans les gaz, que la température et la pression, en modifiant la densité du gaz, influent sur les performances de l'isolation. La majorité des processus fondamentaux intervenant sur le plan microscopique dans la décharge dépendent étroitement de la densité de l'air. Cependant, d'un point de vue pratique, la connaissance actuelle de ce sujet a été beaucoup limitée par la difficulté qu'il y a à faire varier en laboratoire les conditions climatiques surtout lorsqu'il s'agit de l'étude d'intervalles de plusieurs mètres. Il n'est donc pas étonnant que les résultats d'essais soient très

pauvres dans ce domaine et les tentatives qui ont été réalisées consistent à comparer les résultats obtenus dans deux laboratoires situés à des altitudes très différentes [PHI67] [HAR70].

C'est ainsi que des investigations menées dans une station d'essai à haute altitude (3372 m) à une pression atmosphérique de 510 mm de mercure et une densité d'air relative  $\delta$  de 0,7 [BAZ75], ont montré que quoique la propagation de la décharge présente les différentes phases observées dans les conditions atmosphériques normales, les paramètres de la décharge sont nettement influencé par la densité relative de l'air  $\delta$ . Cette dernière est défini par le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pression  $P$  et de température  $\theta$ , à la densité de l'air dans les conditions de référence  $P_0=1013$  mbar et  $\theta_0=20^\circ\text{C}$  [CEI60] :

$$\delta = 0.289 \frac{P}{273 + \theta} \quad (1.5)$$

$P$  en mbar et  $\theta$  en  $^\circ\text{C}$ . Elle est utilisée pour ramener la tension de décharge disruptive  $U$  mesurée dans des conditions d'essais données ( $\theta, P$ ) à la valeur  $U_0$  qui aurait été obtenue sous les conditions de référence normalisée [KUC72] :

$$U_0 = U / (\delta)^n \quad (1.6)$$

$n$  est un exposant inférieur ou égal à l'unité et qui dépend de la forme d'onde, de la longueur de l'intervalle et de la disposition des électrodes. Dans le cas d'un intervalle pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre  $n=1$ . Selon la CEI 60 le rapport d'essais doit toujours mentionner les conditions atmosphériques réelles au cours de l'essai et les corrections appliquées.

### b) Influence de l'humidité

Les résultats d'essais menés pendant plusieurs années par W. Büsch sur les intervalles d'air pointe-plan, ont mis en évidence, à travers les variations naturelles subies par l'humidité (la gamme ainsi couverte s'étend de  $4 \text{ g/m}^3$  à  $16 \text{ g/m}^3$ ), l'importance de ce paramètre et son influence sur les différentes phases de la décharge [BÜS78]. L'étude montre que c'est pour les très grands intervalles ( $d > 5 \text{ m}$ ) et les fortes humidité ( $H > 10 \text{ g/m}^3$ ) que l'influence de ce facteur climatique est plus prononcée. On montre aussi [BÜS78] que la tension moyenne d'amorçage est particulièrement moins sensible au variations de l'humidité dans le cas des ondes de tensions ayant les fronts les plus courts, donc pour les chocs de foudre.

Le facteur de correction de l'humidité se met sous la forme [CEI60] :

$$k_H = k^w \quad (1.7)$$

w est un exposant qui dépend de la forme et de la polarité de la tension ainsi que de la longueur de l'intervalle. Dans le cas d'un système pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre positive  $w=1$ . Le facteur k est un paramètre qui dépend du type de tension d'essai et qui est généralement donné, sous forme de courbe, en fonction de l'humidité absolue. La condition de référence est dans le cas de l'humidité :  $H_0=11 \text{ g/m}^3$ .

## **I.4 Intervalle pointe négative-plan**

L'état actuel des connaissances relatives à la polarité négative est encore assez peu avancé par rapport à celui qui se rapporte à la polarité positive [LER84]. Ceci est dû au fait que les contraintes positives sont plus sévères que les contraintes négatives dans la grande majorité des cas pratiques. Dans le cas particulier des intervalles pointe-plan, cette tendance relative est même absolument générale. Il faut cependant remarquer que les grandes tendances qui marquent la décharge en polarité positive sont transposables au cas de la polarité négative.

### **I.4.1 Influence de la géométrie**

#### **a) Influence de la distance interélectrodes**

Par rapport à la polarité positive, une certaine saturation est observée [LER84]. La courbe  $U_{50}=f(d)$  s'écarte de la loi linéaire dès que la longueur de l'intervalle d atteint 4 m.

#### **b) Influence du rayon de courbure de la cathode**

Les résultats expérimentaux publiés à ce jour ne suffisent pas pour savoir si le rayon de la pointe a ou n'a pas une influence analogue à celle observée dans le cas de la polarité positive [LER84].

### **I.4.2 Influence des conditions climatiques**

La correction de la tension mesurée n'est faite que pour la densité relative  $\delta$ . L'exposant n est, comme dans le cas de la polarité positive, égale à l'unité [CEI60].

## **I.5 Influence des propriétés électrogéologiques du sol**

En étudiant la fréquence de foudroiement d'un lieu donné de la terre, plusieurs travaux, concernant la protection contre la foudre, ont confirmé que la nature du sol pourrait avoir une grande influence sur le point d'impact de celle-ci [NOR50] [SZU79] [LER84] [KRU79]. Le

nombre très réduit d'études effectuées dans ce domaine [LER84] [SZU79] [LET80] a fait que notre laboratoire s'est intéressé depuis 1985 à l'effet des propriétés électrogéologiques du sol sur l'impact par la décharge de foudre et sur les zones d'attraction des paratonnerres vertical et horizontal [BOU97]. Dans cette étude deux configurations du sol ont été prises en considération : la première correspond à un sol hétérogène, la seconde à un sol homogène.

### I.5.1 Cas du sol hétérogène

Les tous premiers travaux concernaient l'influence de l'hétérogénéité du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre [FER87]. Deux modèles ont été établis : le premier mathématique et le second expérimental. Le modèle mathématique a permis d'étudier numériquement la variation de l'intensité du champ électrique à la surface d'un sol hétérogène en fonction de l'évolution de la décharge de foudre. A l'aide du modèle pratique, la répartition statistique des points d'impacts des décharges sur un tel sol a été étudiée. Pour les deux modèles le sol hétérogène était constitué de deux composantes de conductivités différentes (figure I.3). Seul le traceur négative descendant, qui représente le cas le plus fréquent de décharge de foudre sur un sol plat [BER77] [AND79] [DRV82], a été pris en considération dans le modèle expérimental.

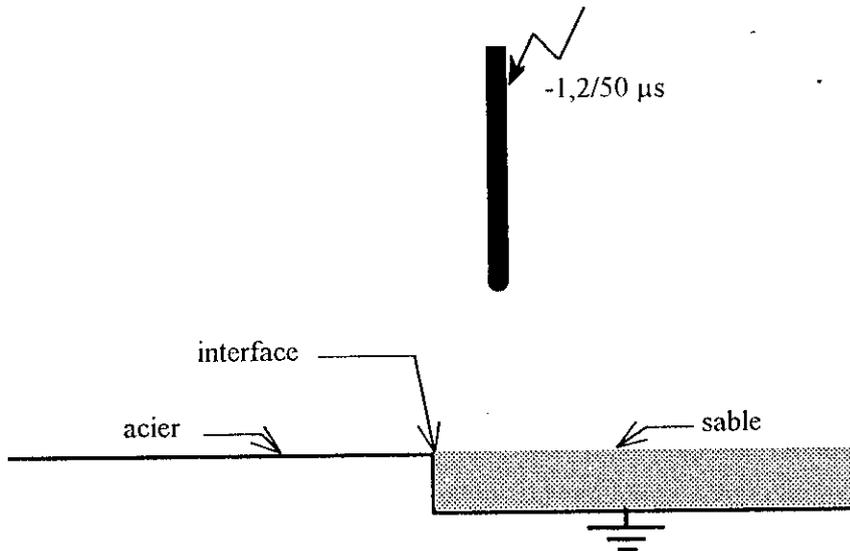
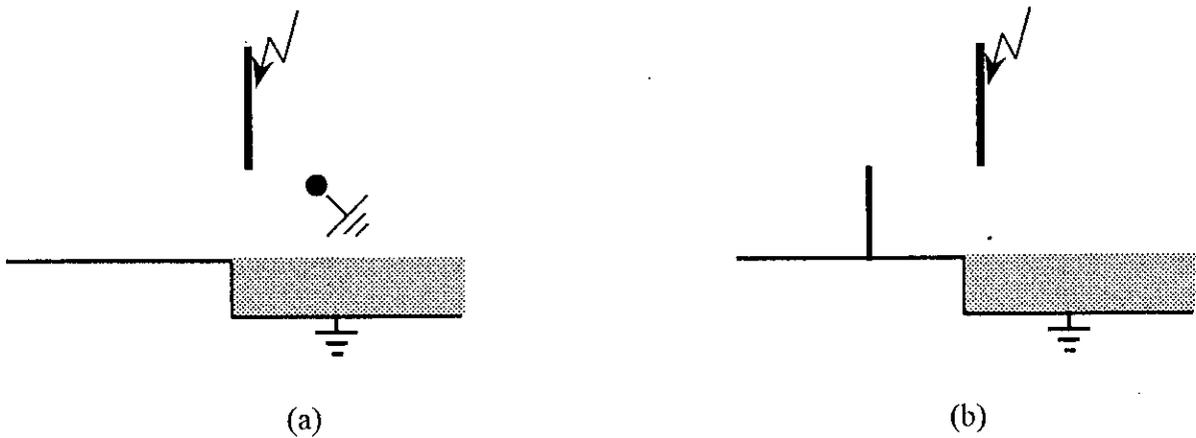


Figure I.3.— Configuration du système pointe –plan avec sol hétérogène.

Les résultats obtenus sur le modèle expérimental ont montré que la présence d'une surface hétérogène fait apparaître un nouveau type de décharge et modifie la distribution de celle-ci sur la surface de l'électrode mise à la terre [BOU87a] [BOU87b]. Cette modification est caractérisée par une attraction des décharges par l'interface. L'influence de cette dernière et

son espace d'attraction augmente avec le degré d'hétérogénéité du sol. Le modèle mathématique a mis en évidence la possession du champ électrique, au niveau de l'interface, d'une forte composante tangentielle. Ceci peut expliquer l'attraction des décharges par l'interface. L'utilisation des caractéristiques électriques des composantes du sol du modèle expérimental dans le modèle mathématique, a permis de trouver une corrélation entre la probabilité d'impact en un point donné du sol et l'intensité du champ électrique en ce point. Une plus grande probabilité de décharge est obtenue aux points où l'intensité du champ électrique est la plus élevée au moment du saut final [FER87].

Les travaux de recherches ont été ensuite orientés vers l'étude de l'effet d'une terre hétérogène sur les zones d'attraction des paratonnerres. Deux cas ont été pris en considération : Le premier concernait une protection horizontale, le second une protection verticale. Un modèle expérimental, dont la configuration du sol est similaire au modèle pratique précédent (figure I.4), a été utilisé.



**Figure I.4.**— Configuration du système pointe-conducteur–plan avec sol hétérogène.

(a)- Protection horizontale.

(b)- Protection verticale.

Les résultats obtenus ont montré que, suivant la position de l'axe de la décharge de foudre par rapport à l'interface et le paratonnerre, la décharge serait, soit favorablement soit défavorablement, attirée par celui-ci [BOU89] [BOU90]. Particulièrement, les zones de capture du paratonnerre horizontal, lorsqu'il est situé au-dessus de la partie bonne conductrice du sol (acier), pourraient devenir inférieures à celles définies par le modèle électrogéométrique. Ce dernier, classiquement utilisé pour définir les zones de protection des paratonnerres, ne serait donc plus valable [BOU91]. Parallèlement à ces travaux expérimentaux, un outil de

calcul numérique du champ électrostatique a été développé afin de simuler numériquement les configurations étudiées au laboratoire [NAS91] [NAS93]. Dans ce travail numérique, on s'intéressait à l'influence de la permittivité relative du sol sur l'attraction des décharges de foudre.

### 1.5.2 Cas du sol homogène

Les résultats des travaux effectués sur la terre hétérogène ont montré que le modèle électrogéométrique utilisé dans le cadre de la protection contre la foudre, ne prenant pas en considération la nature de la terre, serait discutable et aurait certaines limites. La définition d'un nouveau modèle prenant en compte cet effet du sol s'avérait donc nécessaire. Cependant, confronté à plusieurs paramètres, il a été jugé préférable d'entamer cette tâche sur une configuration pointe-plan avec un sol homogène [BOU97] [BOU96]. La configuration du modèle expérimental utilisé est représenté à la figure I.5. La terre est constituée d'une couche d'eau, dite "mauvaise conductrice", de conductivité variable. Les deux cas de protection verticale et horizontale ont été pris en considération.

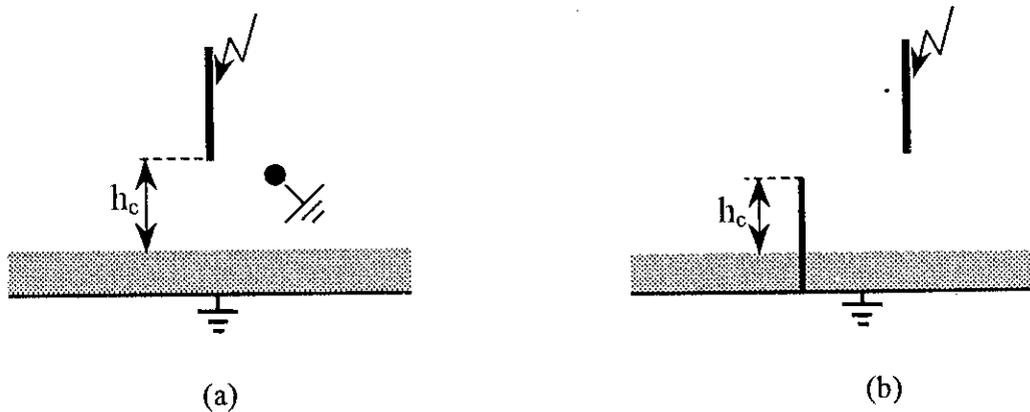


Figure I.5.— Configuration du système pointe conducteur–plan avec sol homogène.

(a)- Protection horizontale.

(b)- Protection verticale.

Les résultats obtenus sur ce modèle expérimental montrent que les zones d'attraction des paratonnerres, dans le cas des terres mauvaises conductrices, seraient plus larges que celles définies par le modèle électrogéométrique. Cet élargissement dépendrait de la conductivité du sol et de la grandeur relative de la hauteur du paratonnerre ( $h_c$  sur la figure I.5) par rapport à l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice. Plus la profondeur de cette couche est grande par rapport à la hauteur du paratonnerre, plus la zone d'attraction de celui-ci

serait large. Il en est de même lorsque la conductivité du sol diminue. Sur la lumière de ces résultats un modèle de protection élargie, prenant en considération les propriétés électrogéologiques du sol, a été défini. Dans ce modèle élargie le système avec terre mauvaise conductrice est considéré équivalent à un système avec terre conductrice où toutes les distances verticales sont majorée d'une certaine valeur comprise entre zéro et l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice [BOU92] [BOU93] [BOU94] [BOU96].

### I.5.3 Influence de la conductivité du sol sur la rigidité des intervalles d'air tige négative-plan

Durant les essais effectués sur la configuration de la figure I. 5, les zones d'attraction étaient déterminées en appliquant le niveau de tension qui devait engendrer une décharge disruptive certaine ( $U_{100\%}$ ) dans le système sans paratonnerre. La détermination de la tension  $U_{100\%}$  pour le système sans paratonnerre (figure I. 6) était ainsi nécessaire. Les résultats obtenus montrent que la tension  $U_{100\%}$  serait influencée par les propriétés électrogéologiques de la terre. Ceux ci se résument dans le cas d'un sol homogène à deux paramètres seulement : la conductivité  $\gamma$  de la couche mauvaise conductrice et son épaisseur  $e$ .

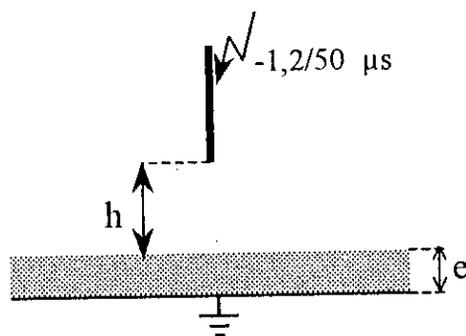
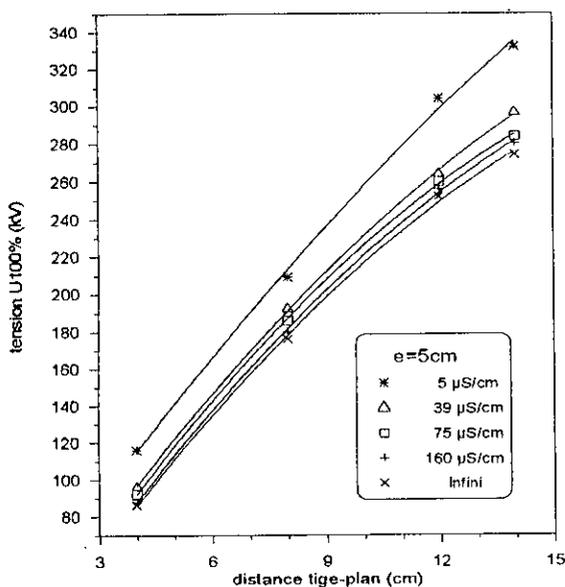


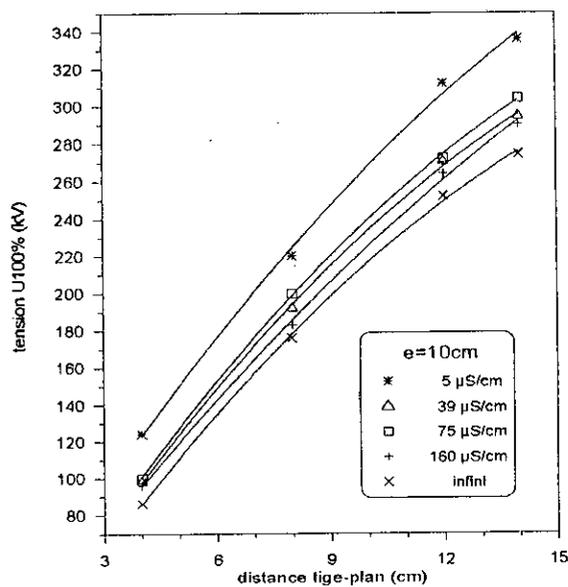
Figure I.6.— Configuration du système tige–plan avec sol homogène mauvais conducteur.

#### a) Influence de la conductivité

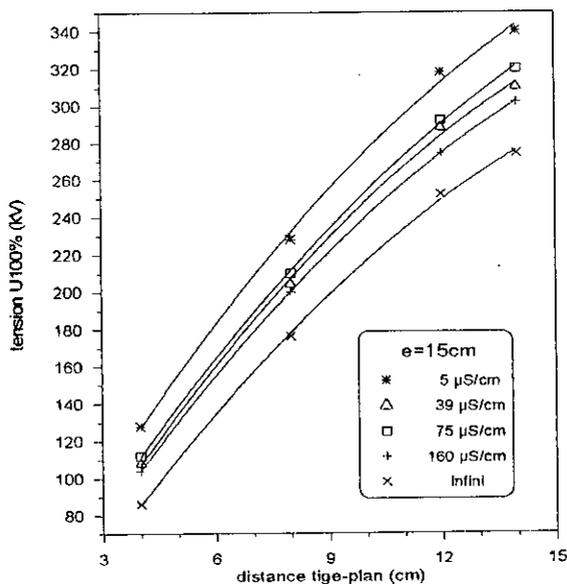
La figure I.7 donne les variations de la tension  $U_{100}$  en fonction de la longueur  $h$  de l'intervalle pour différentes conductivités et différentes épaisseurs [BEL94]. La tension  $U_{100}$  est plus grande lorsque la conductivité du sol devient faible. Autrement dit, lorsque la conductivité du sol mauvais conducteur augmente la rigidité du système avec terre homogène mauvaise conductrice tend vers celle du système avec sol parfaitement conducteur.



(a)



(b)



(c)

Figure I.7.- Influence de la conductivité sur la tension  $U_{100\%}$ .

(a)-  $e= 5 \text{ cm}$ .

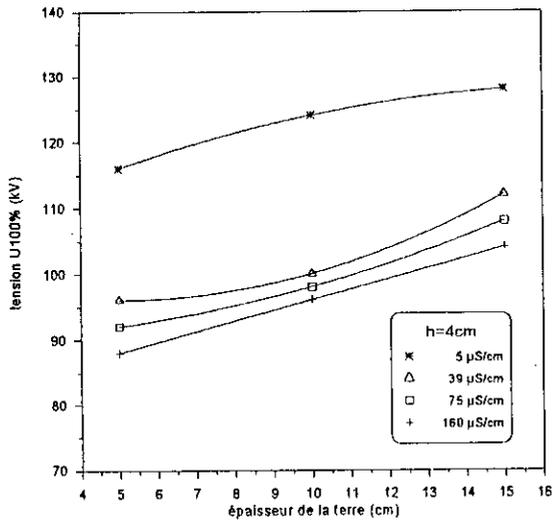
(b)-  $e=10 \text{ cm}$ .

(c)-  $e=15 \text{ cm}$ .

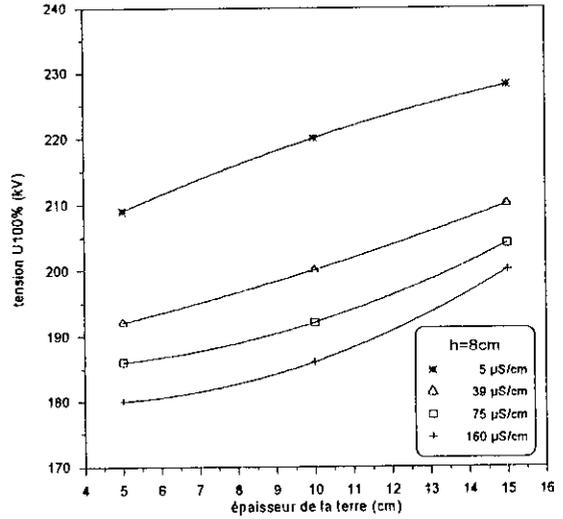
**b) Influence de l'épaisseur**

La figure I.8 donne les variations de la tension  $U_{100}$  en fonction de l'épaisseur  $e$  pour différentes longueurs  $h$  [BEL94]. La tension  $U_{100}$  est plus grande lorsque l'épaisseur  $e$

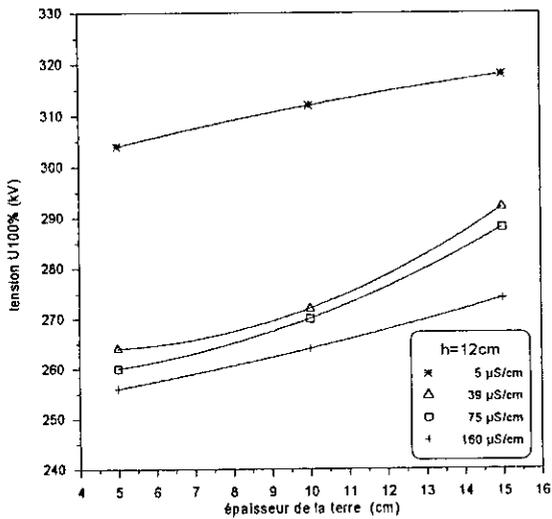
augmente. Autrement dit, lorsque l'épaisseur de la couche mauvaise conductrice diminue, la rigidité du système pointe-plan avec sol homogène mauvais conducteur tend vers celle du système avec sol bon conducteur.



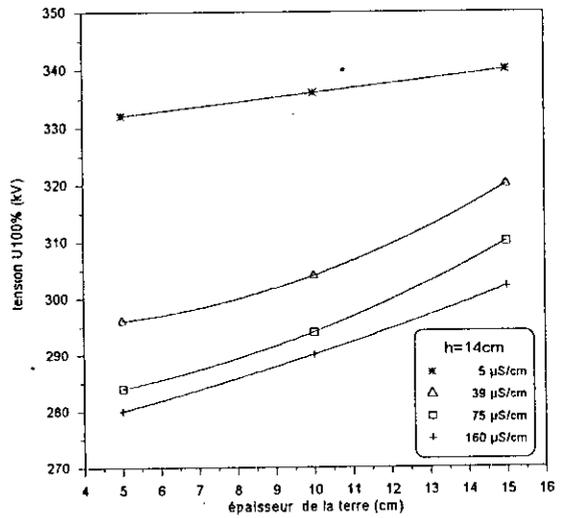
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure I.8.- Influence de l'épaisseur sur la tension  $U_{100\%}$ .

(a)-  $h= 4$  cm.

(b)-  $h= 8$  cm.

(c)-  $h=12$  cm.

(d)-  $h=14$  cm.

## TECHNIQUES EXPERIMENTALES

### II.1 Introduction

Dans le but de déterminer l'influence de l'hétérogénéité du sol sur la rigidité diélectrique des intervalles d'air tige-plan, sous l'onde de choc de foudre, nous avons effectué de nombreux essais sur un modèle expérimental représentant l'arrangement tige-plan avec une terre hétérogène. La notion d'hétérogénéité du sol est employée ici du point de vue « résistivité » ou « conductivité » du sol. Un plan ou un sol hétérogène, dans le sens employé dans notre étude, est un sol constitué de deux ou plusieurs parties ayant des conductivités différentes. Dans le cas de notre modèle, il comporte une partie « parfaitement conductrice » et une deuxième partie qui a une conductivité plus ou moins faible. C'est la partie « mauvaise conductrice » du sol. Les résultats obtenus avec ce modèle sont comparés à ceux obtenus dans le cas de la configuration tige-plan avec sol homogène.

Les essais ont été effectués au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. L'onde normalisée de choc de foudre 1,2/50  $\mu$ s est délivrée par un générateur de chocs, de tension nominale égale à 600 kV et ayant une énergie de 4 kJ. Les limites de la recherche, à savoir la longueur de l'intervalle et les dimensions du modèle expérimental, sont imposées par la hauteur des tensions du générateur utilisé. Ainsi, notre étude est limitée aux petits intervalles d'air ne dépassant pas 14 cm.

### II.2 Détermination de la tension $U_{50}$

En cours de mesure, la tension à 50% de décharge disruptive est déterminée par la méthode des paliers multiples constants avec application de 20 chocs par palier. Nous avons généralement utilisé quatre paliers de tensions différents. Le temps entre deux chocs successifs

est de l'ordre de 30 secondes. A chaque niveau correspond une probabilité de décharge. Les valeurs de tension avec leurs probabilités respectives, serviront à trouver la répartition de probabilité qui peut s'adapter à nos données avec un degré de confiance suffisant. Dans le passé, la répartition normale a été généralement acceptée [OUY67] et les travaux antérieurs de notre laboratoire [BEL94] [RAH96] ont montré que la courbe des fréquences cumulées sur une échelle Gaussienne s'apparente suffisamment avec les données dont on dispose à un tracé rectiligne. La répartition normale a donc été admise dans la présente étude. Il faut toutefois prendre en garde, dans les déductions qui en résultent au fait qu'il peut très bien y avoir d'autres répartitions convenant aussi bien ou même mieux à ces données. Les figures A.1 à A.27 de l'annexe, établies avec une échelle Gausso-arithmétique, montrent pour toutes les configurations étudiées, les courbes des probabilités de décharge en fonction des tensions appliquées. La droite a été tracée en minimisant la somme des carrés de distances des points et elle peut donc être utilisée pour obtenir la meilleure estimation possible de la moyenne  $U_{50}$  et de l'écart type  $\sigma$  [BER75]. Les corrections atmosphériques sont appliquées conformément aux recommandations de la C.E.I. [CEI 60].

## II.3 Modèle expérimental

### II.3.1 Cas du sol homogène

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige–plan dans le cas du sol homogène mauvais conducteur est représenté à la figure II.1. L'électrode de haute tension du système est une tige métallique de 4,8 mm de diamètre présentant une extrémité hémisphérique de même diamètre. La terre du système est constituée d'une couche d'eau distillée de 8 cm d'épaisseur. Elle a une surface de  $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$  et une conductivité  $\gamma$  variant de  $8 \text{ }\mu\text{S/cm}$  à  $130 \text{ }\mu\text{S/cm}$ . Cette couche d'eau repose sur un plan conducteur mis à la terre. Pour chaque conductivité du sol mauvais conducteur, la longueur de l'intervalle  $h$  est variée. Nous avons choisi quatre valeurs de  $h$  comprises entre 4 cm et 14 cm (4, 8, 12 et 14 cm). Pour chacune de ces valeurs, la tension  $U_{50}$  et l'écart type  $\sigma$  sont mesurés pour des tensions du type choc de foudre, respectivement pour la polarité positive et la polarité négative

Dans le but de comparer tous les résultats à une même référence, nous avons aussi étudié la configuration tige–plan avec sol homogène « bon conducteur ». Dans ce cas, le sol de l'intervalle est constitué seulement d'une plaque métallique mise à la terre (Figure II.2). Les mesures sont effectuées dans le cas du sol bon conducteur en respectant les mêmes longueurs d'intervalle utilisées dans le cas du sol mauvais conducteur.

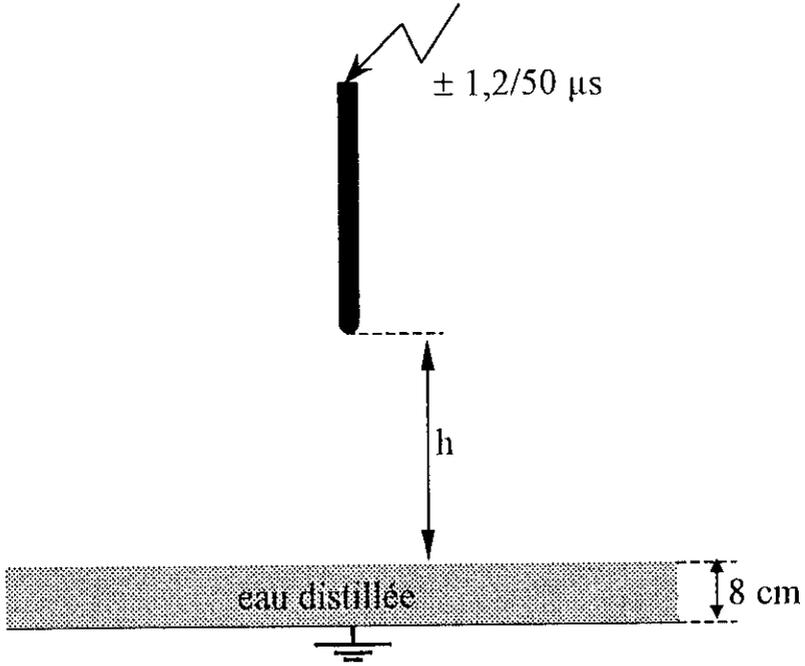


Figure II.1.– Configuration du système tige–plan avec sol homogène mauvais conducteur.

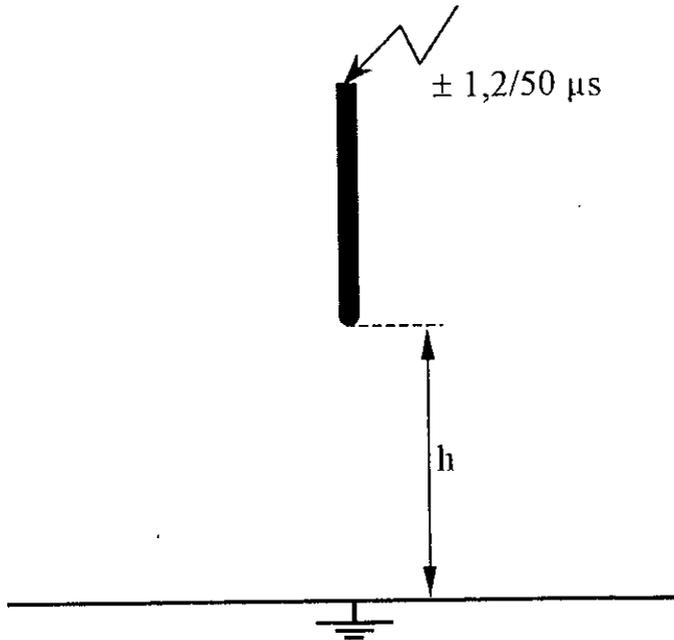


Figure II.2.– Configuration du système tige–plan avec sol homogène bon conducteur.

### II.3.2 Cas du sol hétérogène

Le modèle expérimental utilisé pour étudier la configuration tige-plan avec terre hétérogène est représenté à la figure II.3. La tige métallique verticale est la même que celle utilisée dans la configuration tige-plan avec sol homogène. Le plan est constitué de deux matériaux ayant une interface bien déterminée. Le premier matériau est constitué d'une plaque d'aluminium de 4 mm d'épaisseur ayant une surface de  $1,1 \times 1,1 \text{ m}^2$ . Il représente la partie bonne conductrice du sol. La couche d'eau distillée utilisée dans le modèle de la terre homogène, représentant la partie mauvaise conductrice, constitue le deuxième matériau. Cette couche repose sur un plan conducteur mis à la terre. L'hétérogénéité du sol est caractérisée par le rapport des conductivités des deux milieux. C'est ce rapport qui définit le degré d'hétérogénéité de la terre. La position de la tige est déterminée par sa hauteur  $h$  par rapport au sol et par la distance  $d$  entre son axe et l'interface séparant les deux milieux qui constituent la terre. Cette distance  $d$  et les trois autres paramètres rencontrés dans l'étude du sol homogène : la conductivité  $\gamma$  du matériau mauvais conducteur, la longueur  $h$  de l'intervalle tige-plan et la polarité de la tension appliquée, caractérisent la configuration du système avec terre hétérogène.

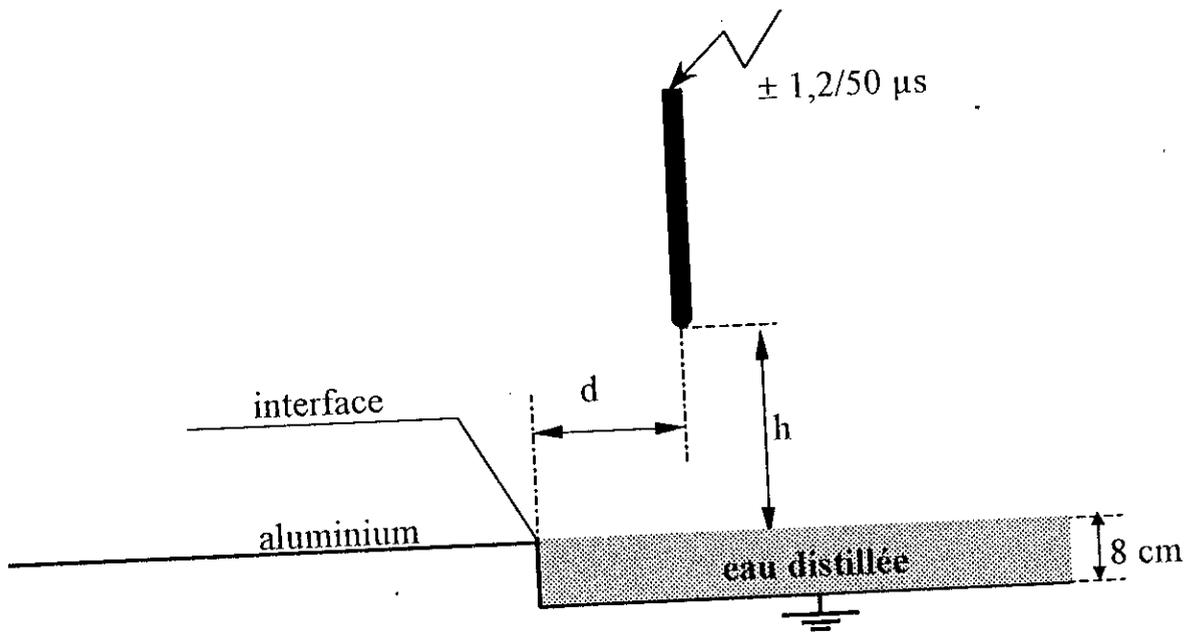


Figure II.3.- Configuration du système tige-plan avec sol hétérogène.

Pour pouvoir comparer les résultats avec ceux du sol homogène, nous avons effectué nos essais sur le sol hétérogène pour les mêmes valeurs de la conductivité  $\gamma$  et de la longueur  $h$ . Pour chaque valeur de  $h$ , nous avons choisi quatre distances  $d$  (50, 25, 15 et 5 cm) d'un côté et de l'autre de l'interface d'une façon à minimiser les effets des bords. Le cas dans lequel la tige se trouve juste au-dessus de l'interface ( $d=0$ ) est aussi envisagé. Pour chaque valeur de la conductivité  $\gamma$  nous avons donc quatre hauteurs  $h$  et pour chacune d'elles nous avons neuf valeurs de la distance  $d$ . La tension  $U_{50}$  est mesurée pour chaque  $d$ , respectivement pour la tige positive et la tige négative.

### II.3.3 Cas du sol discontinu

L'étude de ce cas n'était pas envisagée lors de l'élaboration du programme de notre recherche. Ce n'est qu'après avoir aperçu que les résultats d'essais dans le cas de la terre hétérogène, ne correspondaient pas dans certaines lignes (notamment les résultats obtenus dans le cas de la polarité négative au voisinage de l'interface) à nos prévisions, que l'étude d'une telle configuration du sol a été jugée très utile. Dans cette configuration l'air remplit le volume précédemment occupé par la couche d'eau distillée (figure II.4.). Nous referons dans ce manuscrit à cette configuration par le nom "cas du sol discontinu".

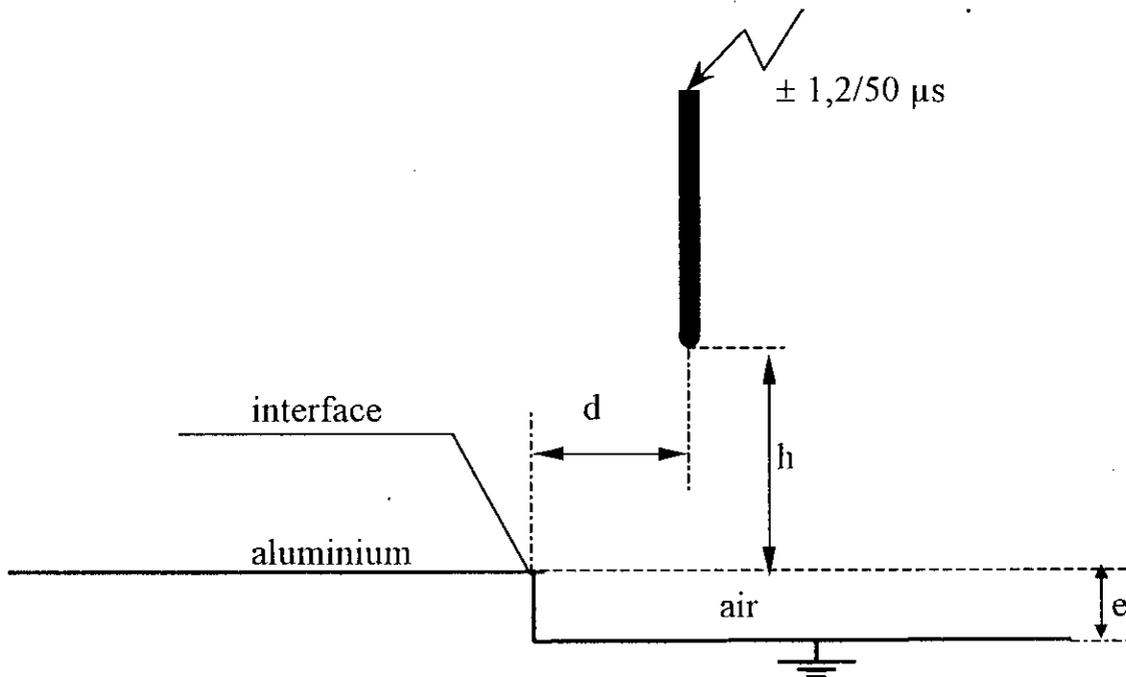


Figure II.4. – Configuration du système tige-plan avec sol discontinu.

Limités par la hauteur des tensions délivrées par le générateur de choc, nous nous sommes trouvés pendant l'étude du cas du sol discontinu, dans l'obligation de faire quelques modifications sur les valeurs de la longueur  $h$ . Ainsi, pour la polarité positive l'étude a été faite pour trois longueurs seulement (4 cm, 8 cm et 12 cm). Pour la polarité négative, nous étions contraints à réduire davantage la longueur de l'intervalle. Nous avons ainsi pris les deux valeurs 4 cm et 6 cm. Mais, dans le but d'avoir un nombre plus grand de données, nous avons envisagé comme solution dans le cas de la polarité négative, de réduire l'épaisseur  $e$  (figure II.4). Nous avons choisi la valeur  $e = 4$  cm. Ces modifications ne permettront pas bien sûr de faire une étude comparative complète entre les deux cas du sol hétérogène (avec et sans couche mauvaise conductrice), surtout du point de vue quantitatif, mais les résultats des essais permettront au moins de comparer les comportements globaux de la configuration tige-plan avec sol hétérogène dans ces deux cas.

# **RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS**

## **III.1 INTRODUCTION**

Nous présentons dans ce chapitre, en première partie, les résultats obtenus sur le modèle expérimental de la configuration tige-plan avec sol homogène. Cette présentation concerne l'influence de : l'intervalle  $h$ , la conductivité  $\gamma$  et la polarité.

En seconde partie, nous présentons les résultats expérimentaux concernant le cas du sol discontinu et en dernier lieu ceux concernant le cas du sol hétérogène.

## **III.2 SOL HOMOGENE**

### **III.2.1 Influence de la longueur de l'intervalle tige-plan "h"**

Pour les différentes valeurs de la conductivité du sol homogène, la courbe représentant les variations de la tension  $U_{50}$ , lorsque l'intervalle  $h$  varie, conserve son caractère linéaire. Ceci reste vrai pour les deux polarités (figures III.1 et III.2).

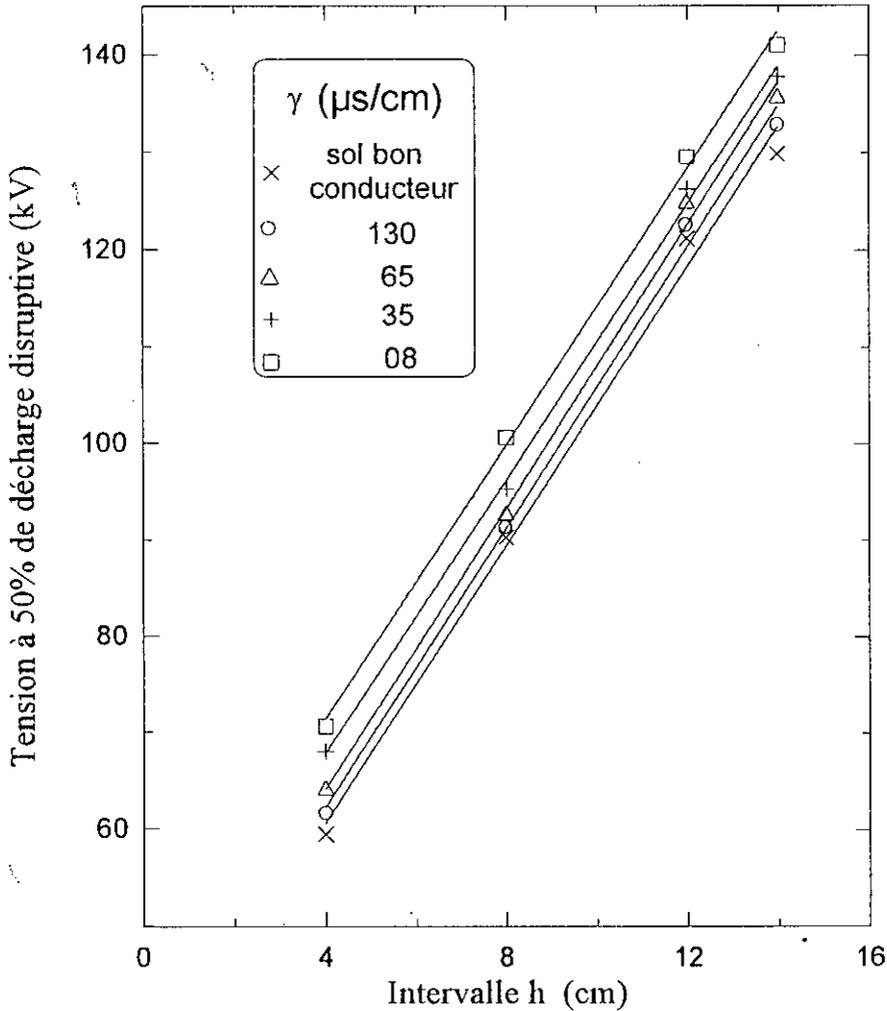


Figure III.1. --  $U_{50}$  en fonction de h. Intervalle tige positive-plan. Sol homogène.

### III.2.2 Influence de la conductivité du sol

Les figures III.1 et III.2 montrent aussi que, pour une même longueur d'intervalle, la tension  $U_{50}$  s'éloigne de la valeur obtenue pour le sol bon conducteur de plus en plus que la conductivité du sol s'affaiblit. Autrement dit, une diminution de la conductivité du sol entraîne une augmentation de la tension  $U_{50}$ . Ceci est mis en évidence par les deux figures III.3 et III.4 qui représentent les variations de la tension  $U_{50}$  en fonction de la conductivité du sol mauvais conducteur respectivement pour la polarité positive et la polarité négative. Ces courbes démontrent que lorsque la conductivité du sol devient très élevée, le système avec sol mauvais conducteur devient équivalent au système avec sol conducteur.

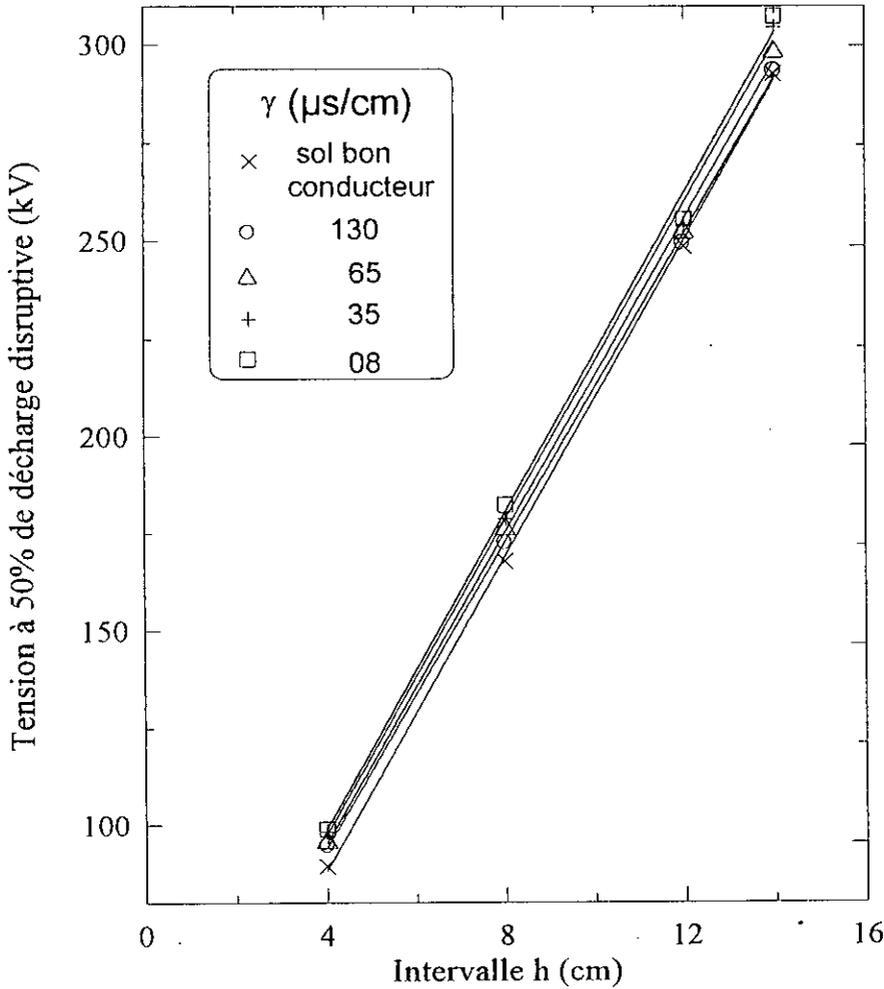


Figure III.2. –  $U_{50}$  en fonction de h. Intervalle tige négative–plan. Sol homogène

Il est important de noter aussi qu'aux figures III.1 et III.2, les droites donnant  $U_{50}$  en fonction de l'intervalle h sont parallèles. Chacune de ces droites peut être donc obtenu par une translation de la droite relative au sol bon conducteur dans le sens des h négatives. Ceci laisse supposer que l'intervalle tige–plan avec sol homogène mauvais conducteur peut être équivalent à un intervalle tige–plan avec sol bon conducteur dont la longueur est majorée d'une certaine valeur constante qui n'est autre que la constante de translation. Cette valeur, notée  $\Delta h$  (figure III.5), dépend évidemment de la conductivité  $\gamma$ . A la figure III.6 qui représente les variations de  $\Delta h$  en fonction de la conductivité  $\gamma$ , nous constatons que  $\Delta h$  tend vers zéro lorsque  $\gamma$  devient très grand. Nous remarquons aussi que, pour les faibles conductivités, le  $\Delta h$  obtenu dans le cas de la tige positive est nettement supérieur à celui obtenu avec la tige négative.

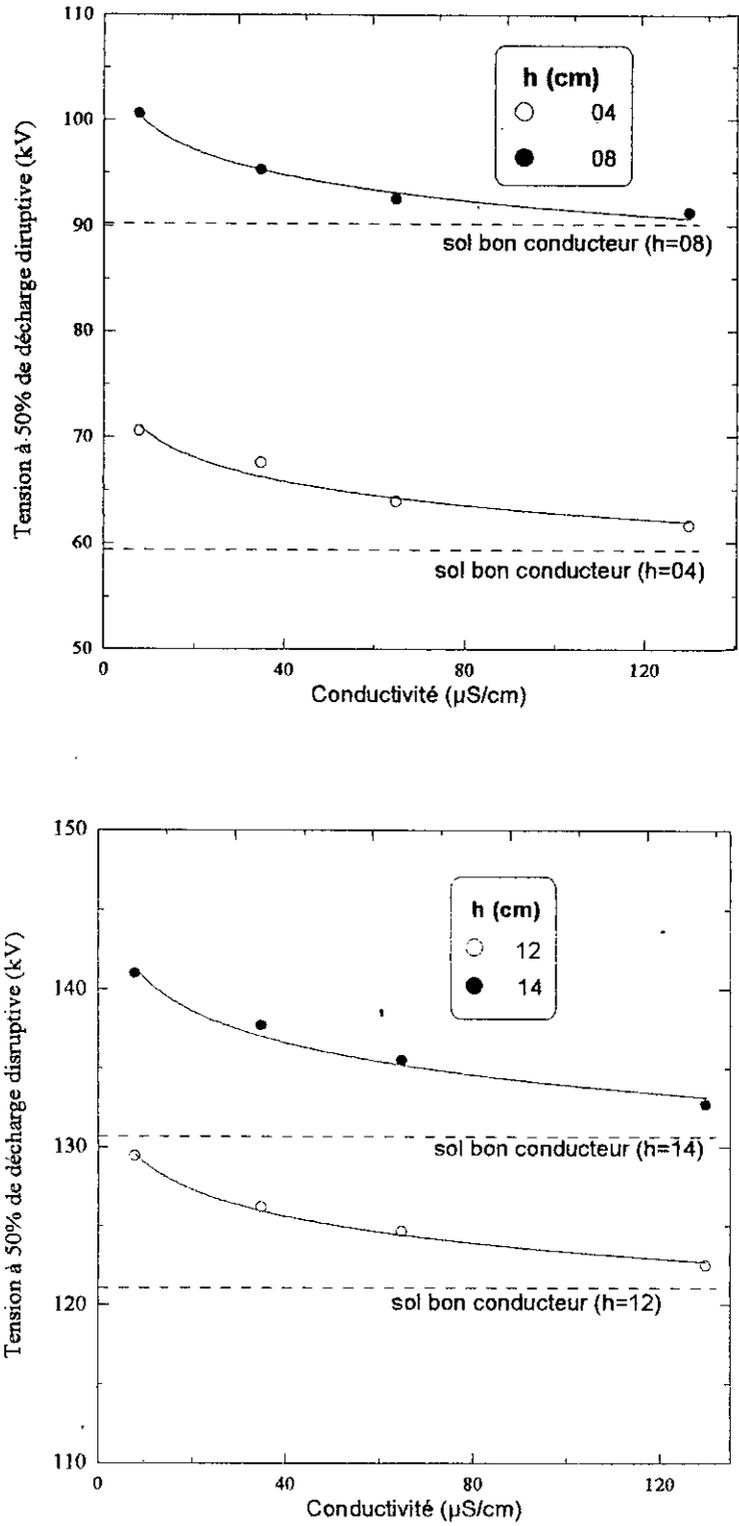


Figure III.3.-  $U_{50}$  en fonction de la conductivité du sol dans le cas de la tige positive.

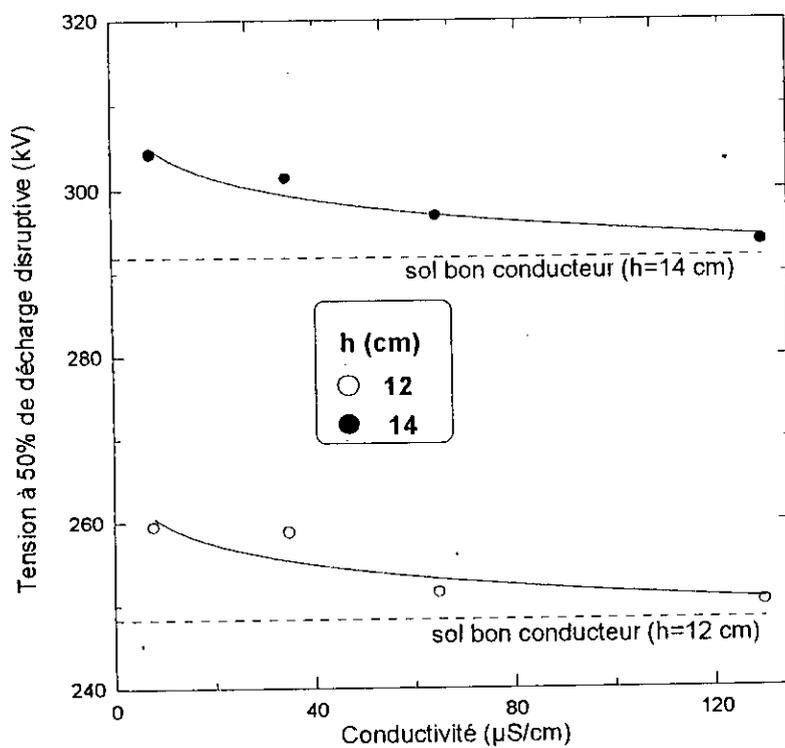
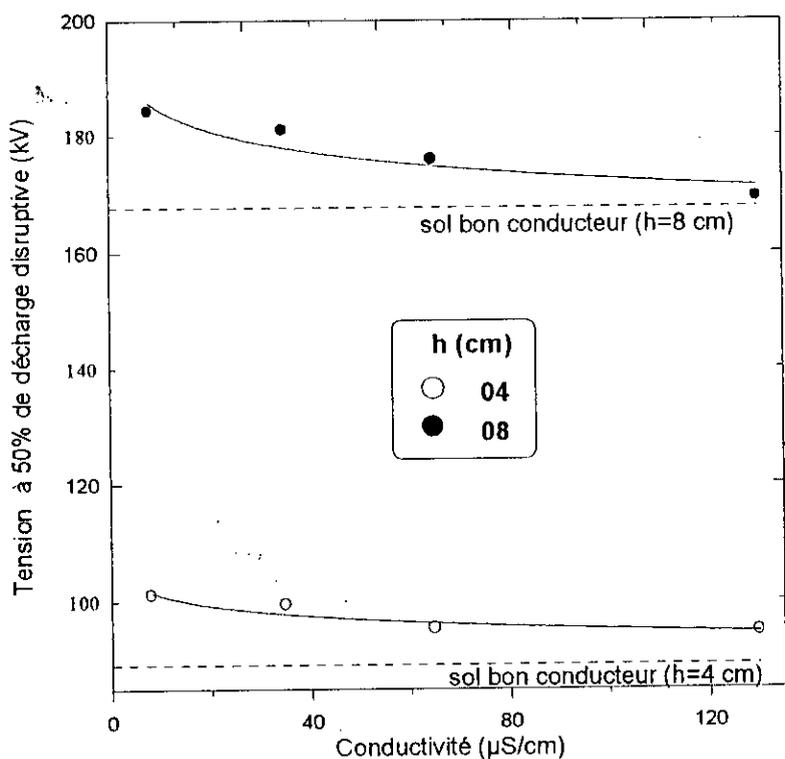


Figure III.4. –  $U_{50}$  en fonction de la conductivité du sol dans le cas de la tige négative.

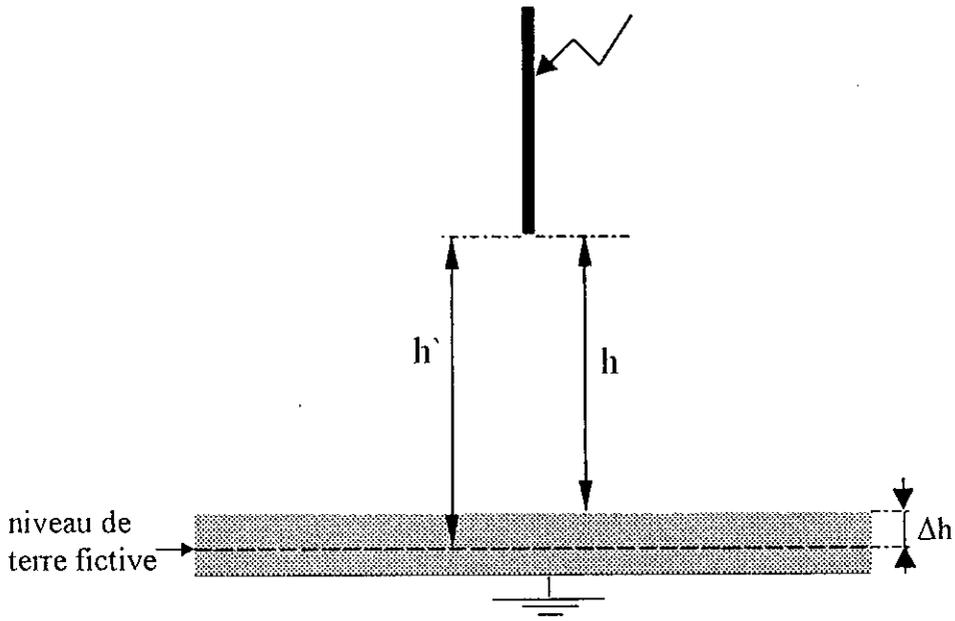


Figure III.5.– Système tige-plan avec sol conducteur équivalent au système avec sol mauvais conducteur.

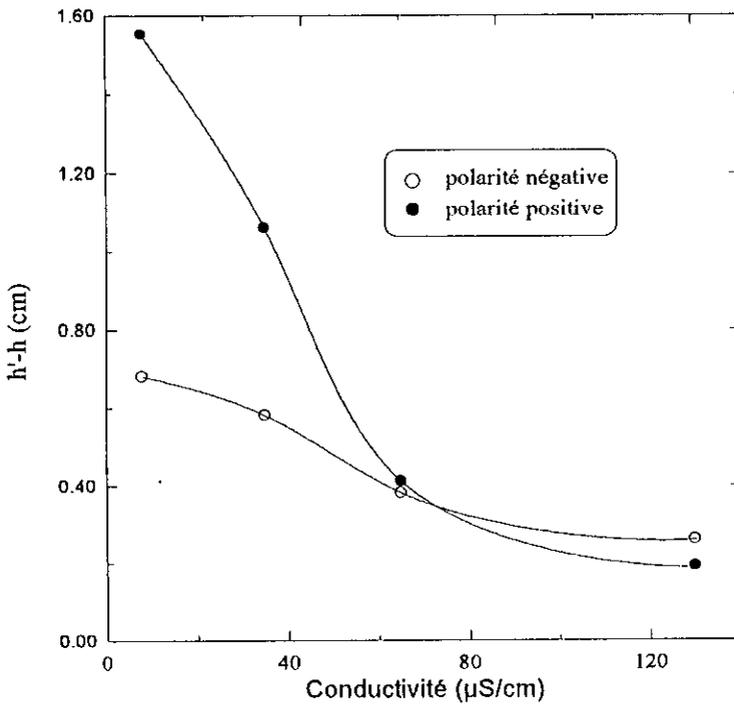


Figure III.6.–  $\Delta h$  en fonction de la conductivité  $\gamma$ .

### III.2.3 Influence de la polarité de la tige

Les résultats d'essais obtenus dans le cas du sol homogène présentés dans les paragraphes précédents, montrent que le comportement de notre système sous tension positive et son comportement sous tension négative sont dans leurs grandes lignes similaires. Cependant des différences quantitatives existent entre les deux cas. En effet les tensions  $U_{50}$  dans le cas de la polarité négative sont nettement supérieures à celles sous tension positive (figure III.7). Par conséquent le système tige négative-plan reste, dans le cas du sol homogène mauvais conducteur étudié, toujours plus rigide que le système tige positive-plan. La figure III.8 donne les variations du rapport  $U_{50-}/U_{50+}$  en fonction de la conductivité  $\gamma$  pour une longueur  $h$  donnée. Nous remarquons que ce rapport augmente avec l'intervalle  $h$ .

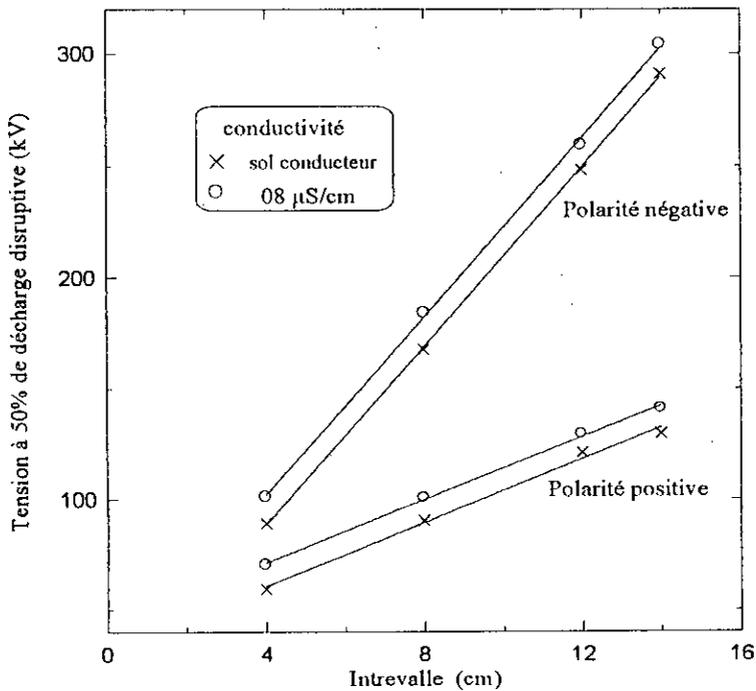


Figure III.7.-  $U_{50}=f(h)$ . Influence de la polarité.

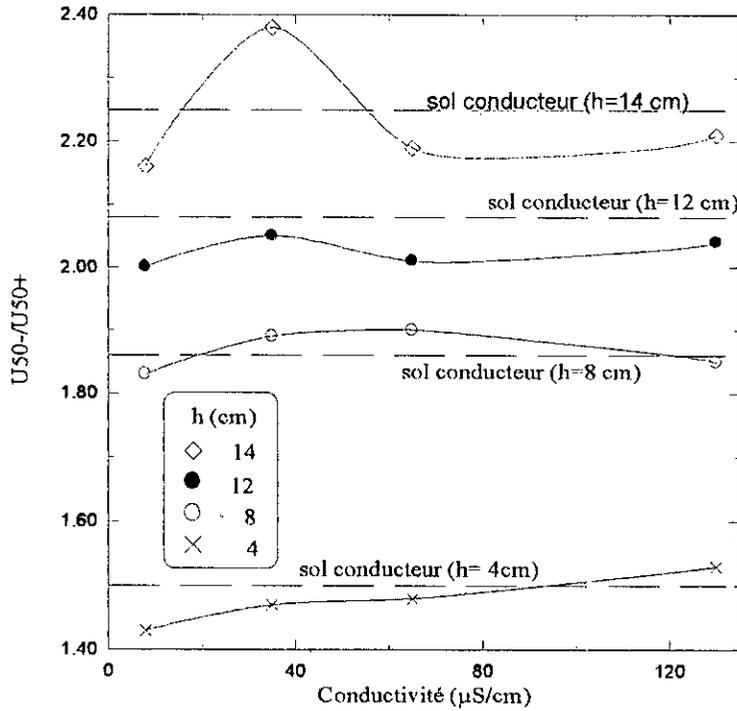


Figure III.8.— Variation de  $U_{50-}/U_{50+}$  avec la conductivité  $\gamma$ .

### III.2.4 L'écart type

Les variations de l'écart type  $\sigma$  avec la conductivité ne semblent suivre aucune forme particulière pour pouvoir dégager une certaine tendance. Ceci est valable pour les deux cas de polarité (figures III.9 et III.10). L'écart type moyen est de l'ordre de 6% dans le cas des deux polarités.

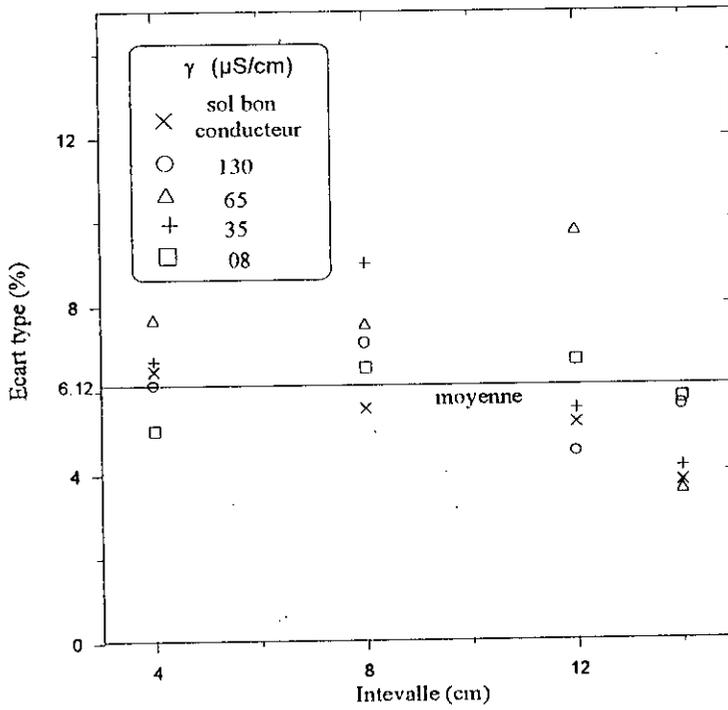


Figure III.9. – L'écart type  $\sigma$  en fonction de l'intervalle  $h$  dans le cas de la polarité positive.

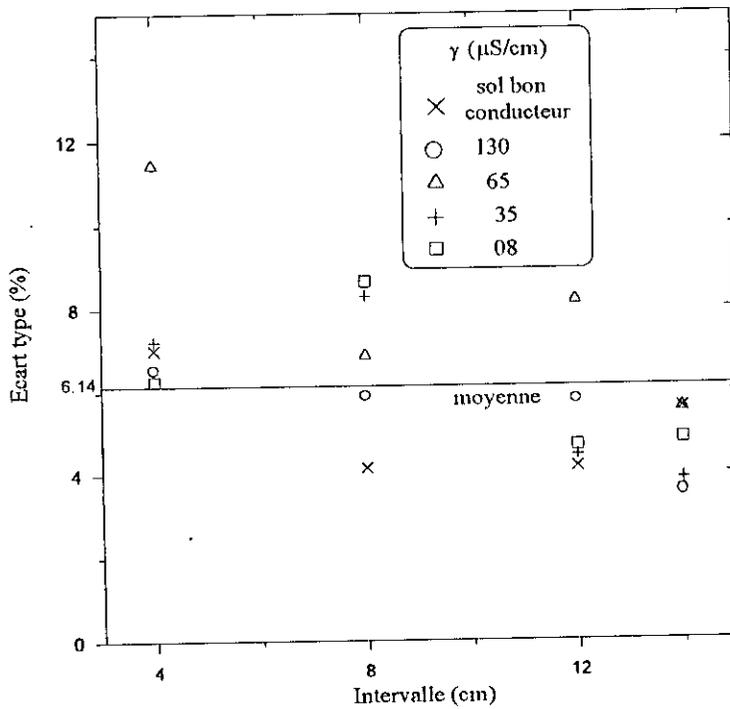


Figure III.10. – L'écart type  $\sigma$  en fonction de l'intervalle  $h$  dans le cas de la polarité négative.

### III.3 SOL DISCONTINU

Dans notre étude la configuration tige-plan avec sol discontinu est caractérisée, dans le cas de la tige positive, par deux paramètres : la longueur de l'intervalle  $h$  et la distance  $d$  entre l'axe de la tige et l'interface. Dans la cas de la tige négative, l'épaisseur  $e$  s'ajoute à ces deux paramètres comme indiqué au chapitre précédent.

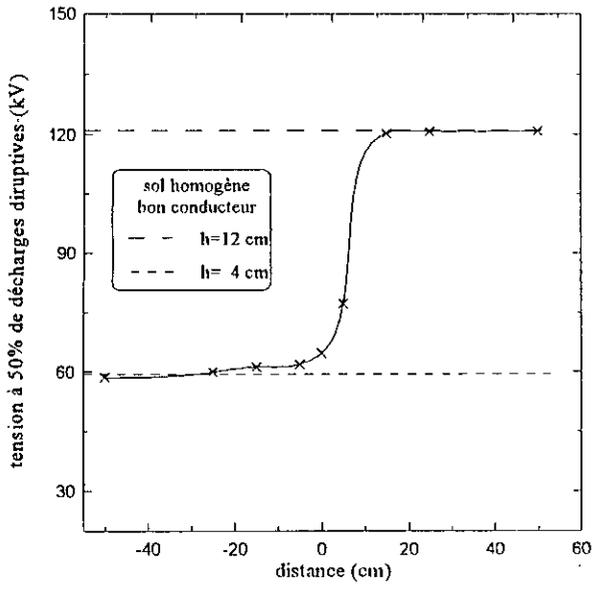
#### III.3.1 Influence de la distance "d"

Les résultats d'essais dépendent étroitement de la polarité de la tige. Ainsi nous préférons présenter chaque cas séparément.

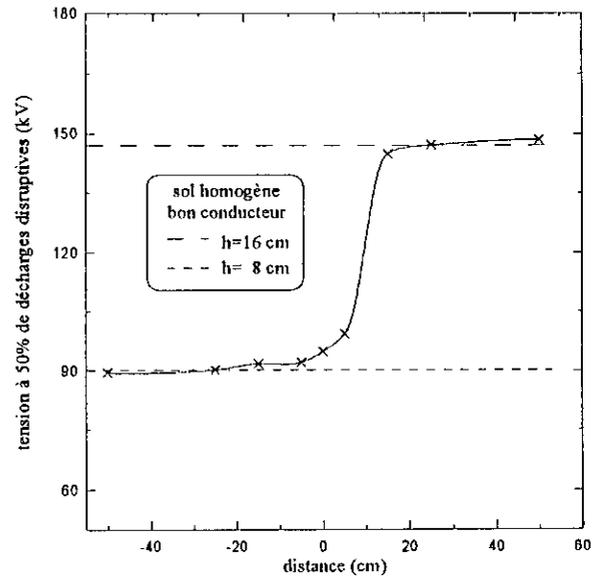
##### a) Polarité positive

Les figures III.11a, b et c donnent, pour les différentes valeurs de la l'intervalle  $h$ , les variations de  $U_{50}$  en fonction de la distance  $d$ . Les valeurs de  $d$  correspondantes au cas où la tige se trouve au-dessus de la partie bonne conductrice (côté gauche de l'interface sur la figure II.4) sont affectées d'un signe moins. Les distances sont considérées positives dans l'autre cas. Ces figures montrent clairement que la rigidité de l'intervalle est considérablement influencée par la position de la tige par rapport à l'interface au dessus du sol. En effet :

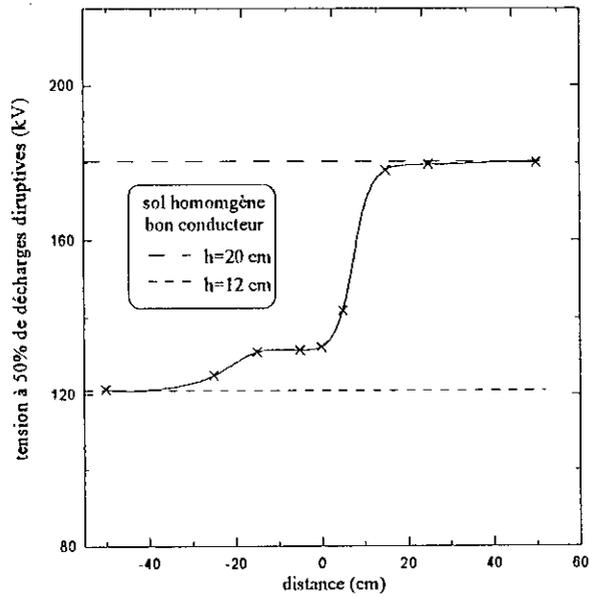
- Pour une longueur  $h$  donnée, la tension  $U_{50}$  s'affaiblit lorsque la tige s'éloigne de l'interface vers le côté des distances négatives, pour tendre vers la valeur obtenue dans le cas du sol homogène bon conducteur de même longueur ; le système est ainsi équivalent au système avec sol homogène bon conducteur.
- Lorsque la tige s'éloigne de l'interface dans l'autre côté ( $d$  positive), le système est plus rigide. Il devient équivalent au système avec sol homogène dont la longueur est égale à la longueur de l'intervalle étudié majorée de 8 cm (valeur de l'épaisseur  $e$ ).
- Au voisinage de l'interface ( $d = \pm 10$  cm), la tension  $U_{50}$  passe brusquement d'une valeur limite à l'autre. A  $d=0$ , la distance tige-interface a une rigidité comprise entre celle du système tige-tige et celle du système tige-plan.



(a)



(b)



(c)

Figure III.11. – Evolution de  $U_{50}$  en fonction de la distance  $d$  dans le cas de la tige positive.

(a)-  $h= 4$  cm.

(b)-  $h= 8$  cm.

(c)-  $h= 12$  cm.

## b) Polarité négative

L'influence de la position de la tige par rapport à l'interface dans le cas de la tige négative est illustrée par la figure III.12.

- Pour les grandes distances  $d$ , le comportement de l'intervalle sous tension négative est similaire à son comportement sous tension positive. Le système est équivalent au système tige-plan avec sol homogène bon conducteur: de même longueur pour les distances négative et de longueur majorée avec la valeur de l'épaisseur  $e$  pour les distances positives.
- Au voisinage de l'interface nous observons, différemment au cas de la polarité positive, une sorte de discontinuité dans l'évolution de la tension  $U_{50}$ . Celle-ci, en diminuant, devient inférieure à la valeur obtenue dans le cas du sol bon conducteur de même longueur.

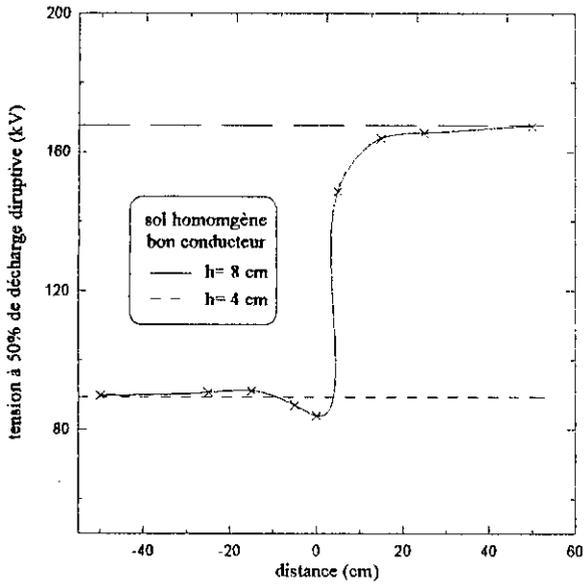
Cette différence dans les comportements de la tension d'amorçage entre les deux cas de polarité, peut être expliquée par le fait qu'au niveau de l'interface notre système se comporte comme un système tige-tige. Or sous tension négative celui-ci est moins rigide que le système tige-plan alors qu'il ne l'est pas sous tension positive [LER84]. Ceci peut expliquer l'observation, dans le cas de notre configuration, d'une décroissance dans la tension  $U_{50}$  au niveau de l'interface sous la polarité négative et sa non observation dans l'autre cas de polarité.

### III.3.2 Influence de la longueur de l'intervalle "h"

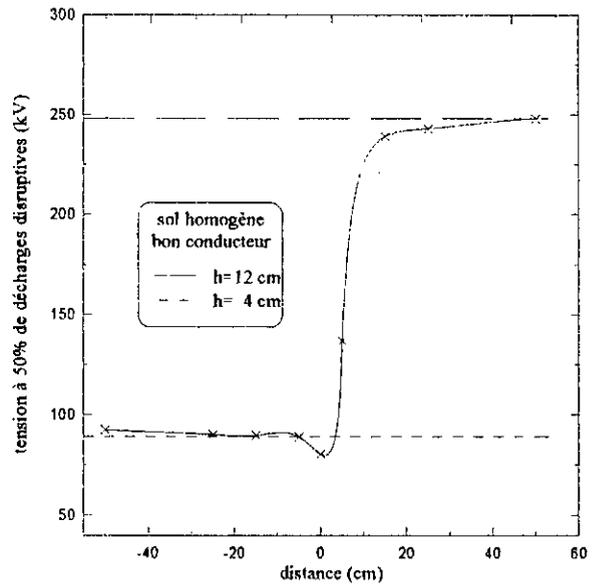
#### a) polarité positive

A la figure III.13 sont illustrées les variations de la tension  $U_{50}$  en fonction de la longueur de l'intervalle  $h$  pour différentes distances  $d$ . Pour toutes les distances, la relation  $U_{50}=f(h)$  garde sa caractéristique linéaire. La loi linéaire entre tension disruptive  $U_{50}$  et longueur d'intervalle se conserve ainsi dans le cas d'une discontinuité du sol.

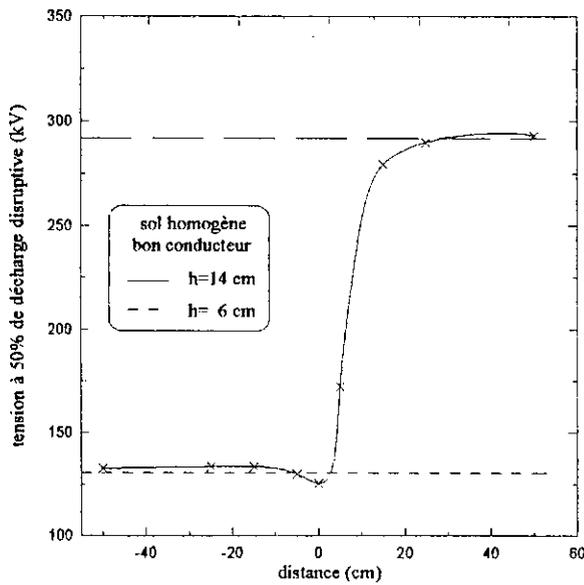
Aux figures III.14 et III.15 sont présentées les courbes donnant les variations du rapport  $k=U_{50}/U_{\text{hom}}$  en fonction de la distance  $d$ , respectivement pour le cas des distances positive et le cas des distances négatives. Le facteur  $k$  représente, pour une distance donnée, le rapport de la tension d'amorçage  $U_{50}$  de l'intervalle tige-sol discontinu à la tension d'amorçage  $U_{\text{hom}}$  correspondant à l'intervalle tige-plan de même longueur sans compter la profondeur de la discontinuité. La figure III.14 met en évidence le fait que pour les grandes distances positives (côté droit de l'interface), le rapport  $U_{50}/U_{\text{hom}}$  est plus grand pour les faibles longueurs  $h$ . Pour les positions de la tige qui correspondent à l'autre côté (à gauche de l'interface), on ne remarque aucune variation importante de  $k$  avec la longueur de l'intervalle.



(a)



(b)



(c)

Figure III.12. – Evolution de  $U_{50}$  en fonction de la distance  $d$  dans le cas de la tige négative.

(a)-  $e= 4$  cm,  $h= 4$  cm.

(b)-  $e= 8$  cm,  $h= 4$  cm.

(c)-  $e= 8$  cm,  $h= 6$  cm.

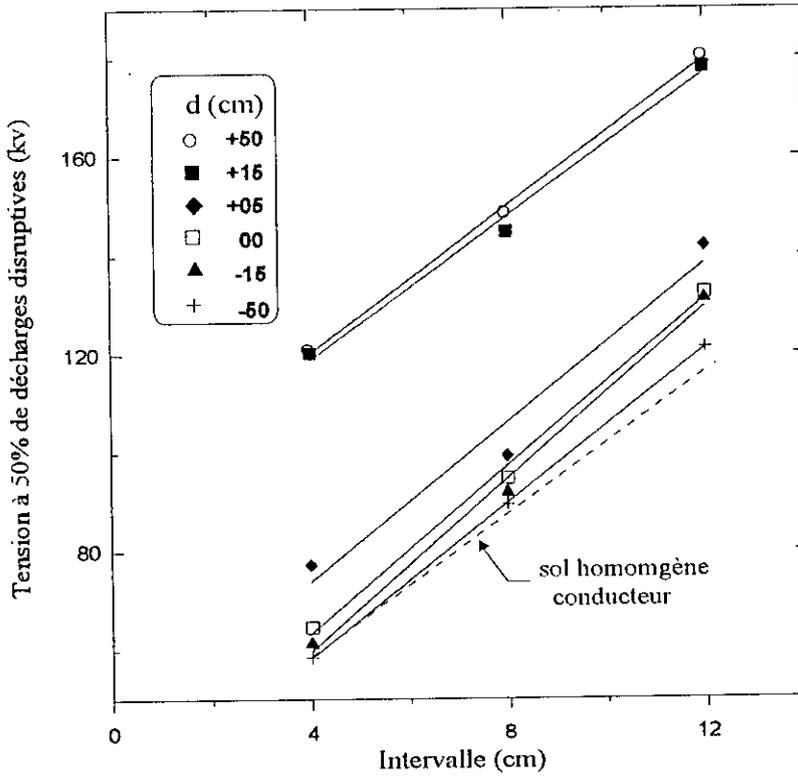


Figure III.13. –  $U_{50}$  en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive.

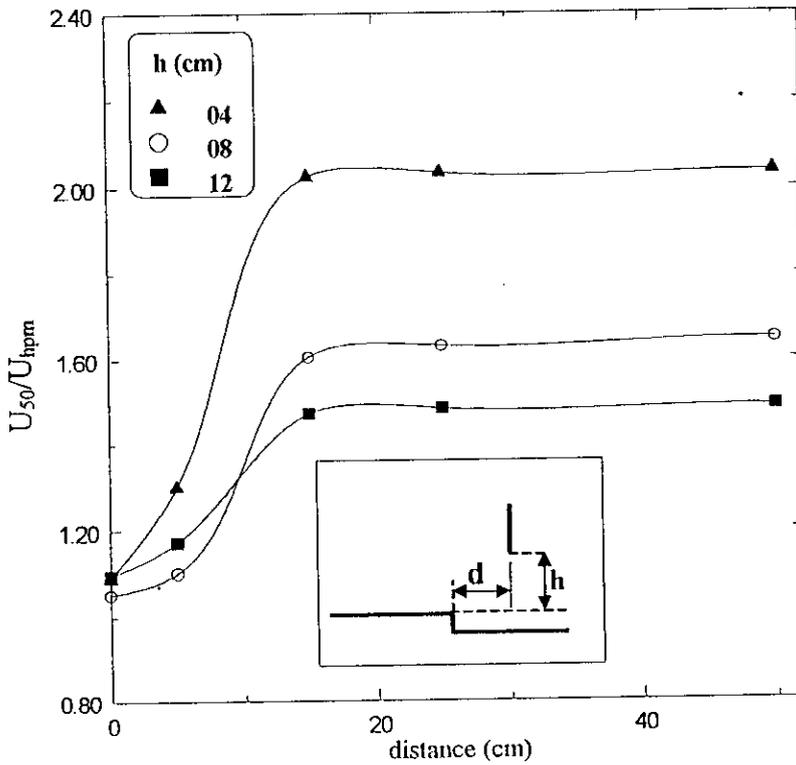


Figure III.14. – Influence de la longueur  $h$  sur  $U_{50}/U_{hpm}$  dans le cas de la tige positive. Tige à droite de l'interface.

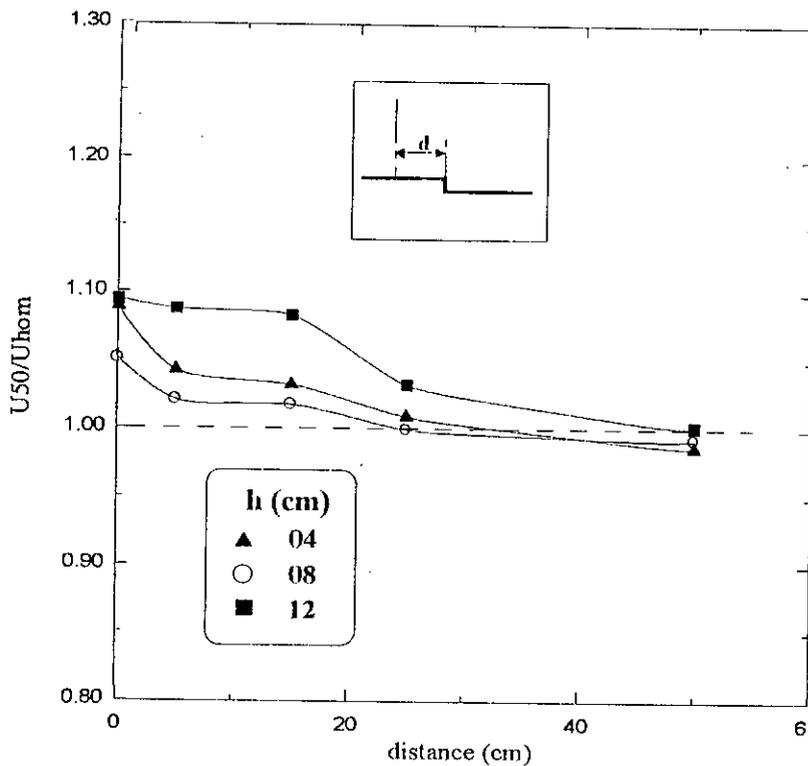
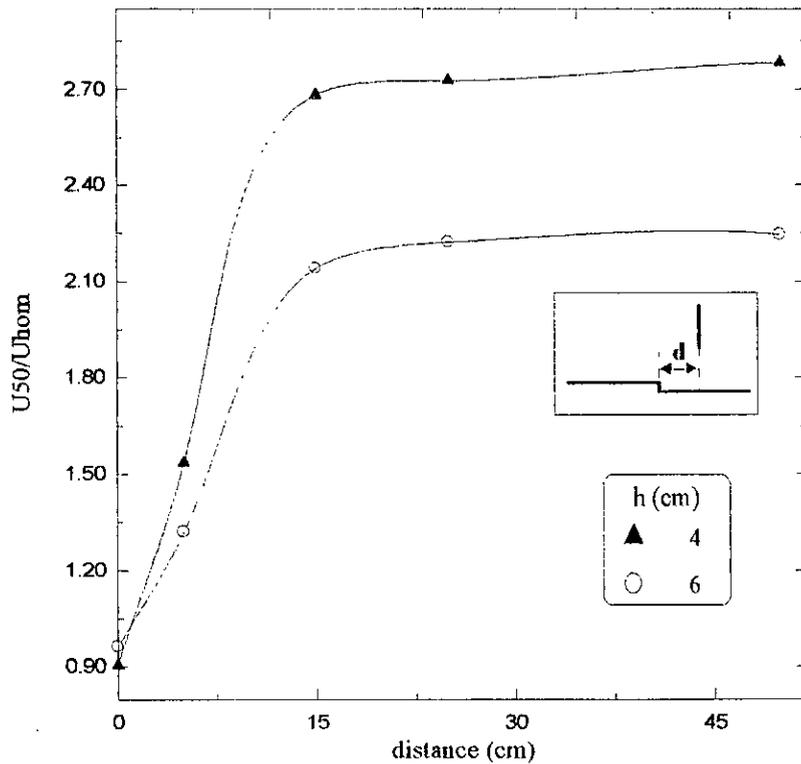


Figure III.15. – Influence de la longueur  $h$  sur  $U_{50}/U_{hom}$  dans le cas de la tige positive. Tige à gauche de l'interface.

#### b) polarité négative

Sur l'effet de la longueur de l'intervalle  $h$  sur la tension  $U_{50}$ , dans le cas de la tige négative, les résultats obtenus permettent de faire les remarques suivantes:

- Pour les grandes distances positives, le rapport  $U_{50}/U_{hom}$  est plus grand pour  $h=4$  cm que pour  $h=6$  cm (figure III.16).
- Pour les distances négatives aucune influence importante de  $h$  n'est remarquée. le rapport  $U_{50}/U_{hom}$  est voisin de l'unité pour les deux intervalles.
- La réduction de la tenue au voisinage de l'interface est plus marquée pour  $h=4$  cm (9,71%) que pour  $h = 6$  cm (3,85%) (figure III.12)



**Figure III.16.** – Influence de longueur  $h$  sur  $U_{50}/U_{hom}$  dans le cas de la tige négative.  
Tige à droite de l'interface

### III.3.3 Influence de l'épaisseur

En comparant les résultats obtenus pour les deux épaisseurs, pour l'intervalle 4 cm, on peut noter que:

- pour les grandes distances positives l'influence de la discontinuité est plus importante pour  $e=8$  cm que pour  $e=4$  cm (figure III.17).
- Pour les distances négatives aucune influence importante n'est remarquée. Le rapport  $U_{50}/U_{hom}$  est voisin de l'unité pour les deux épaisseurs.
- Au voisinage de l'interface la diminution de la tension  $U_{50}$  est plus sensible pour  $e=8$  cm (9,71%) que pour  $e=4$  cm (5,9%) (figure III.12).

### III.3.4 L'écart type

Les résultats obtenus concernant l'écart type sont, comme dans le cas du sol homogène, dispersés (figures III.18a et b).

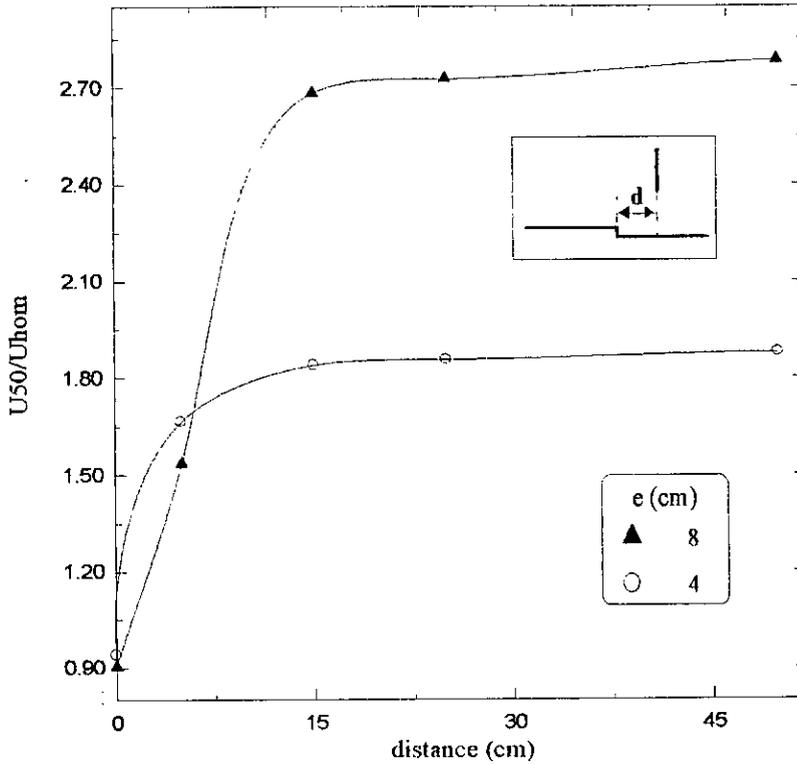


Figure III.17. – Influence de l'épaisseur  $e$  sur  $U_{50}/U_{hom}$  dans le cas de la tige négative. Tige à droite de l'interface.

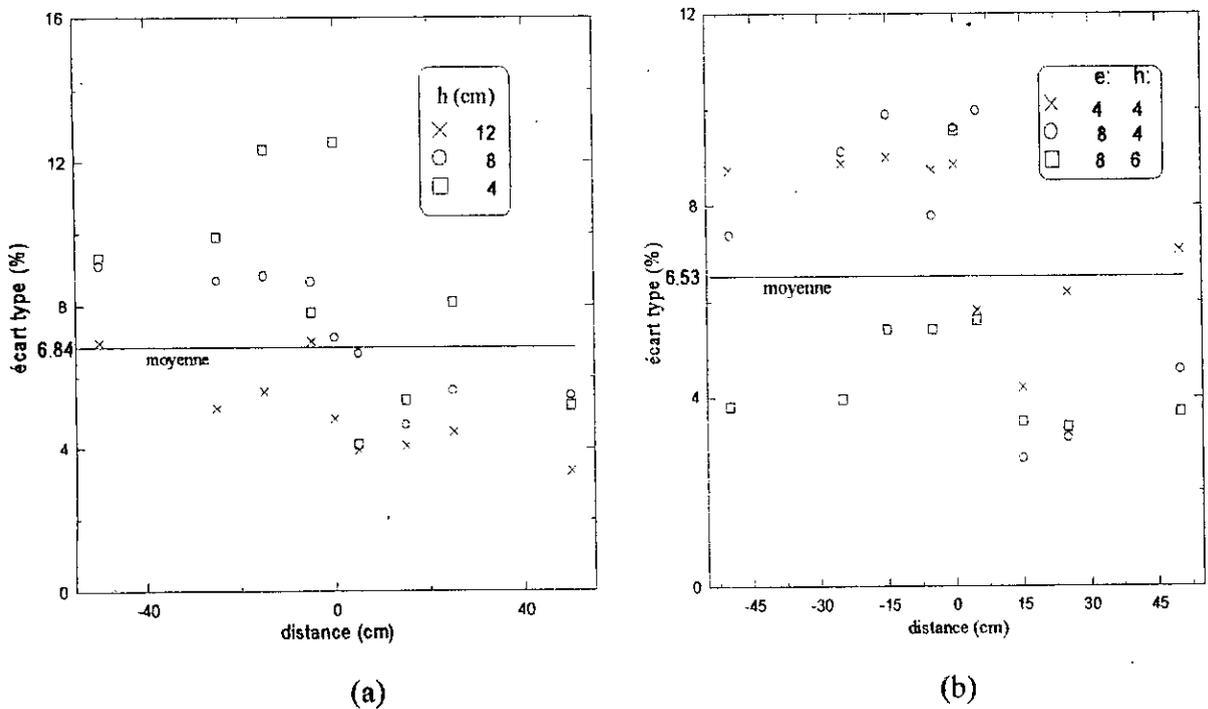


Figure III.18. – Ecart type en fonction de la distance.  
 (a)- Polarité positive.  
 (b)- Polarité négative.

## III.4 SOL HETEROGENE

### III.4.1 Types de décharges observées

Lors des essais avec la configuration tige-sol hétérogène, cinq types de décharge ont été observés :

- a) Décharge directe ayant lieu entre la tige et la surface de la couche d'eau distillée (figure III.19.a). Ce type de décharge a été observé pour les grandes distances positives
- b) Décharge complexe ayant lieu entre la tige et la surface de l'eau puis glissant sur celle-ci vers l'interface (figure III.19.b). Ce type a caractérisé les petites distances. Pour les grandes distances, ce type de décharge a été quelques fois observé, dans le cas de la polarité négative, pour  $h = 14$  cm et pour  $h = 12$  cm.
- c) Décharge directe, ayant lieu entre la tige et l'interface (figure III.19.c), observée lorsque la tige est au voisinage de l'interface ( $d = 5$  cm,  $d = 0$  cm).
- d) Décharge atteignant deux points simultanément à l'interface et à la surface de l'eau (figure III.19.d). Ce cas est très rares.
- e) Décharge directe ayant lieu entre la tige et la plaque d'aluminium (figure III.19.e). Ce type a caractérisé toutes les positions occupées par la tige au-dessus de la partie bonne conductrice du sol.

### III.4.2 Influence de la distance

#### a) Polarité positive

Qualitativement, la présence de la couche mauvaise conductrice, comparativement au cas du sol discontinu, n'a pas modifié le comportement de l'intervalle. Pour les grandes distances positives, la configuration tige-sol hétérogène tend vers le système tige-sol homogène de même longueur et de même conductivité. Pour les grandes distances négatives elle tend vers le système tige-plan bon conducteur de même longueur. Pour les distances intermédiaires elle se situe entre ces deux systèmes (figures III.20 à 23)

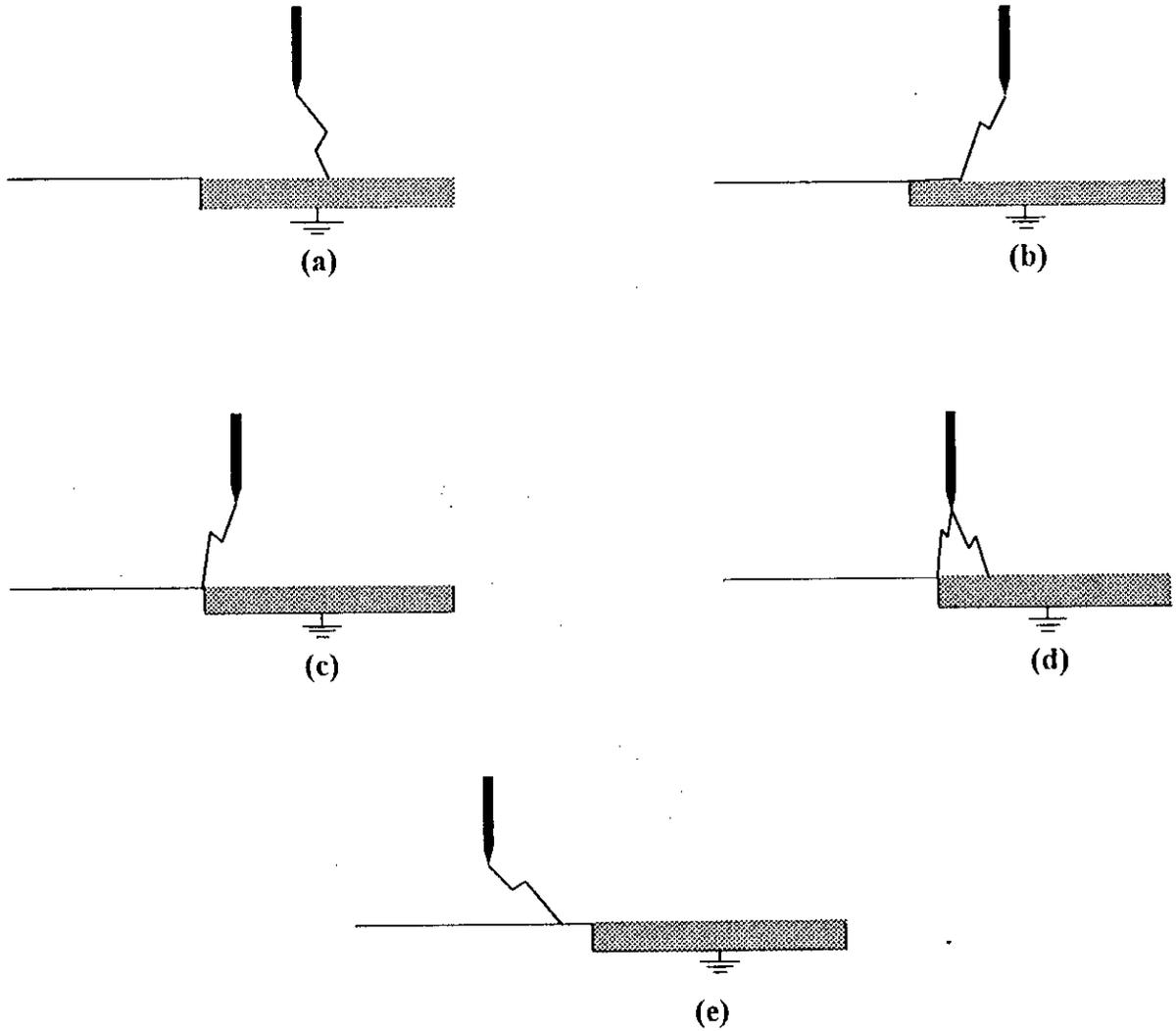


Figure III.19. – Types de décharge observés.

### b) Polarité négative

Contrairement au cas du sol discontinu, le comportement du système tige-sol hétérogène sous tension négative est similaire à son comportement sous tension positive. On note particulièrement, la disparition de la diminution de la tenue de l'intervalle au niveau de l'interface observée dans le cas du sol discontinu (figure III.24 à 27). Deux explications peuvent être avancées.

- La présence de la couche mauvaise conductrice, en modifiant les phénomènes entrant dans le développement de la décharge (l'observation des décharges glissantes le confirme), aurait changé considérablement le comportement du système tige négative-sol hétérogène au niveau de l'interface.

- En restant fidèles à l'idée que la partie mauvaise conductrice du sol est équivalente à un plan conducteur situé à une profondeur dépendant de la conductivité (figure III.5), nous pouvons assimiler le système tige-sol hétérogène à un système tige-sol discontinu de profondeur correspondant à la conductivité de la couche. La plus grande valeur que peut prendre cette profondeur est de l'ordre de 0,7 cm (figure III.6), valeur qui correspond à la plus faible conductivité. Suivant ce raisonnement et vu aussi (paragraphe III.3.3) que la réduction de la tenue au niveau de l'interface dépend de la profondeur  $e$  (elle passe de 9,71% pour  $e=8$  cm (figure III.12) à 5.9% pour  $e=4$  cm), nous pouvons penser que même si une diminution de la tenue au voisinage de l'interface existait dans le cas du sol hétérogène, elle serait très faible et indétectable par notre dispositif expérimental.

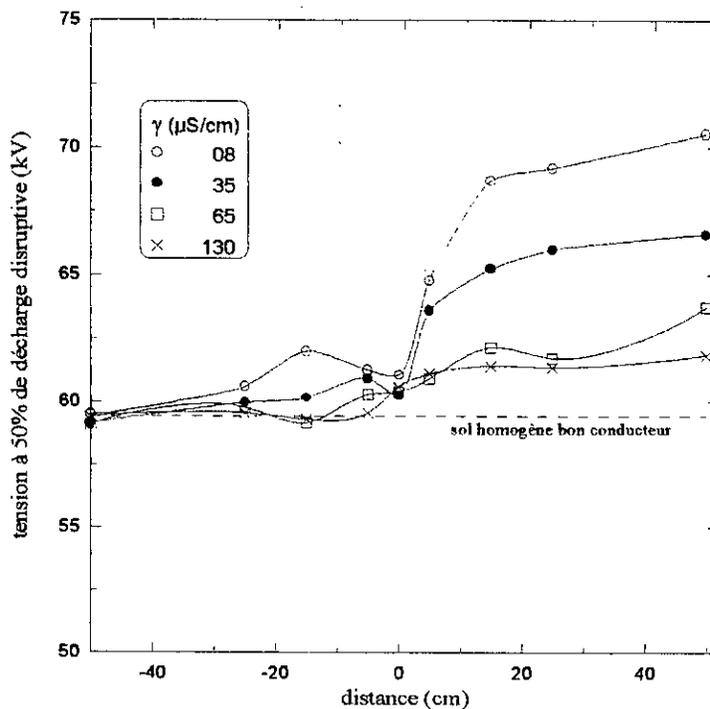


Figure III.20. –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ( $h=4$  cm).

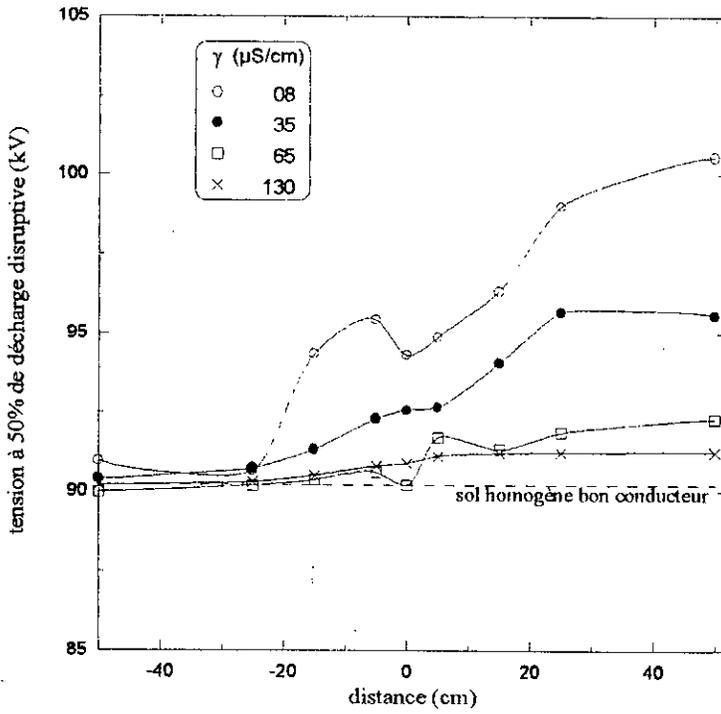


Figure III.21. –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ( $h=8$  cm).

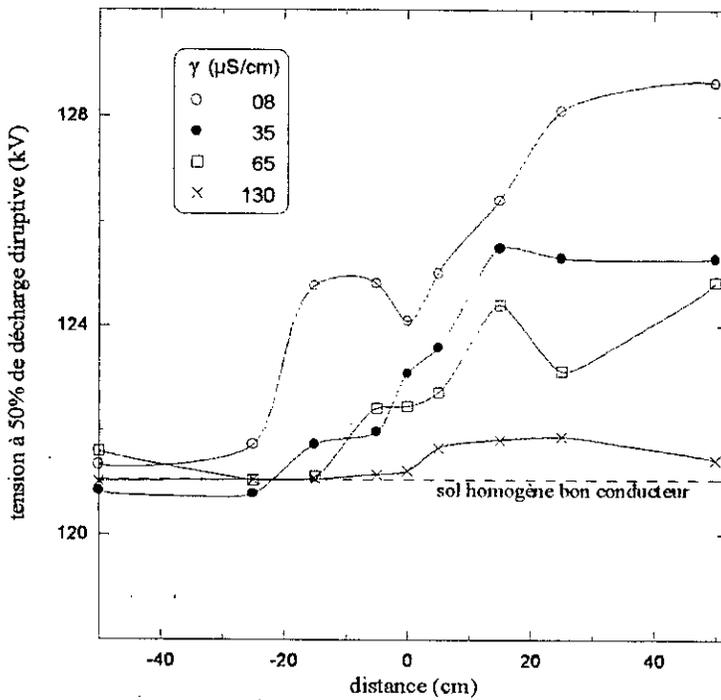


Figure III.22. –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ( $h=12$  cm).

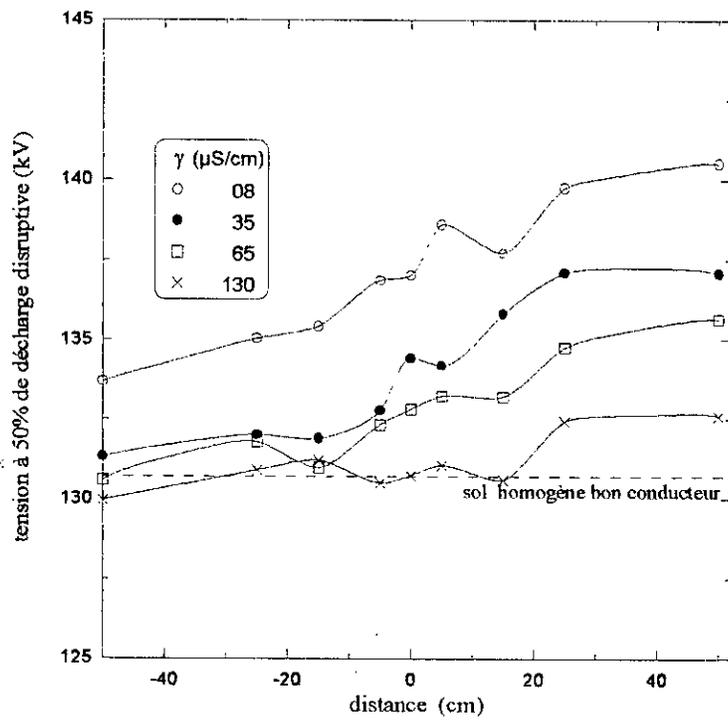


Figure III.23. –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige positive ( $h=14$  cm).

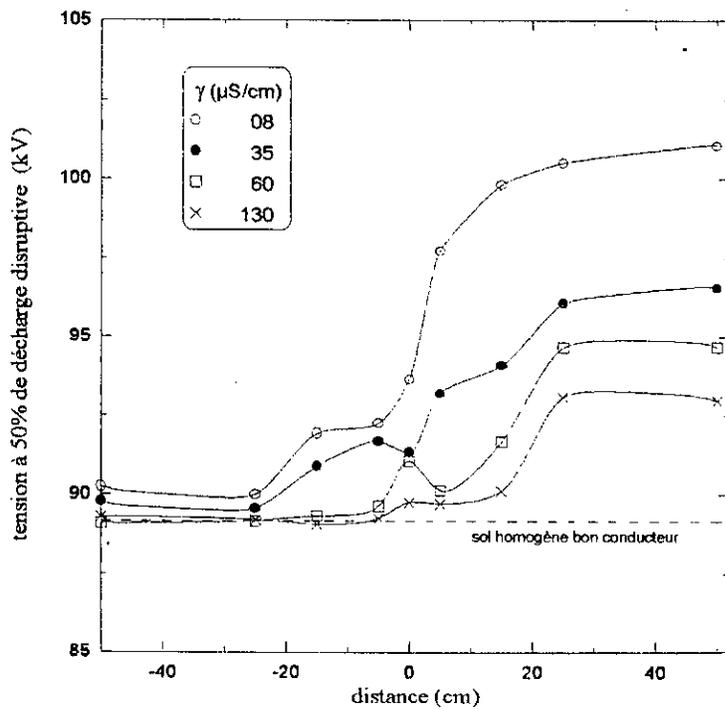


Figure III.24. –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige négative ( $h=4$  cm).

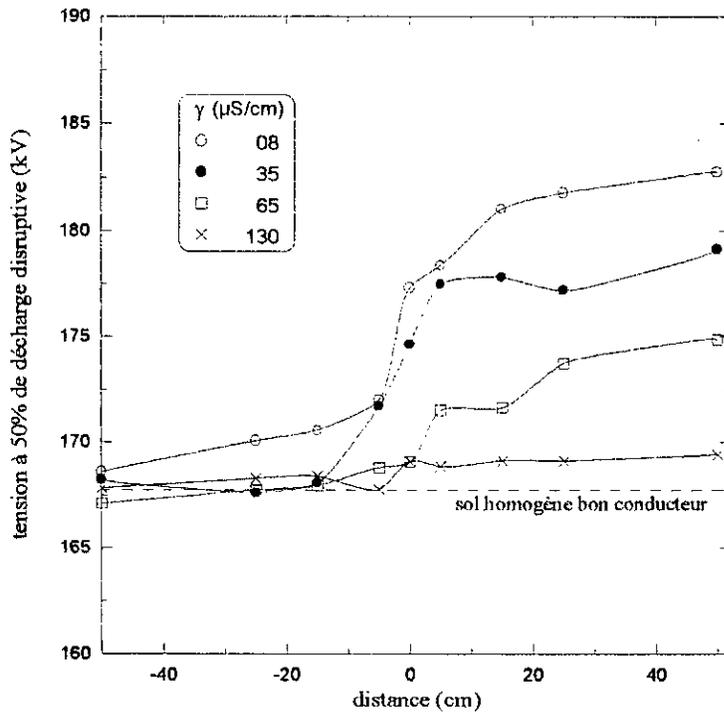


Figure III.25. –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige négative ( $h=8$  cm).

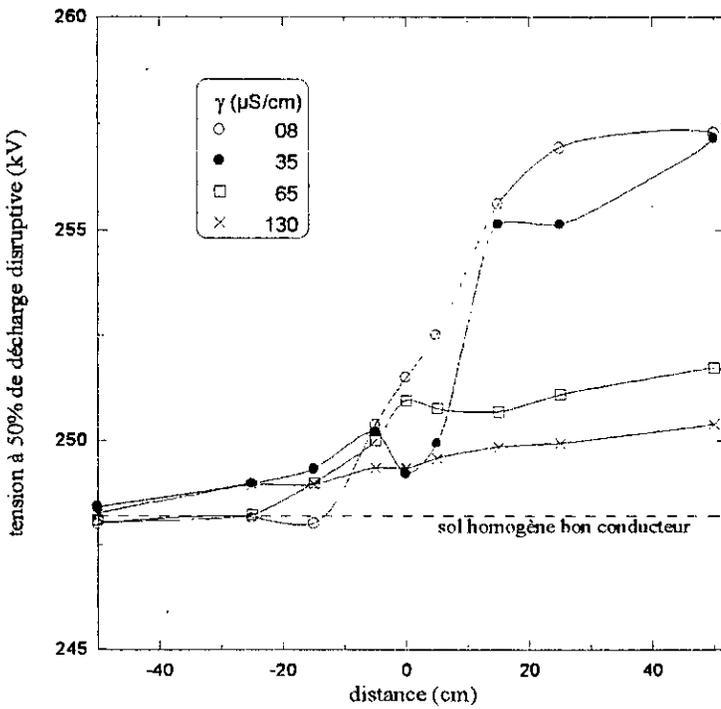
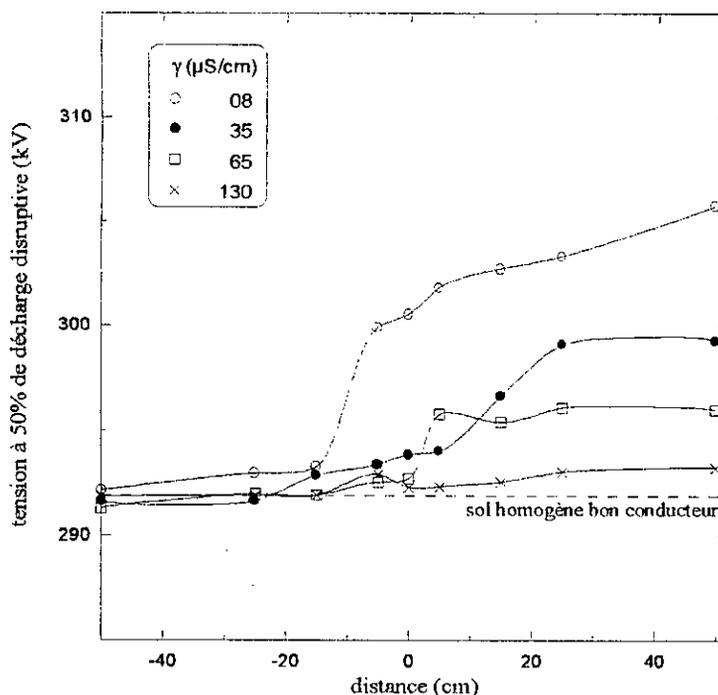


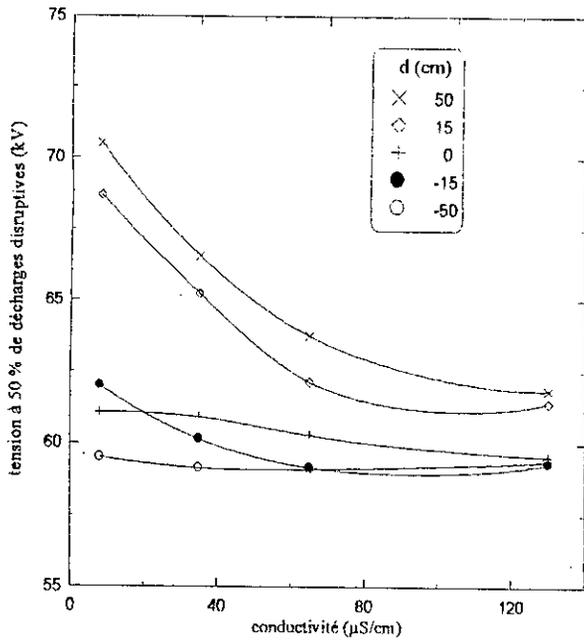
Figure III.26. –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige négative ( $h=12$  cm).



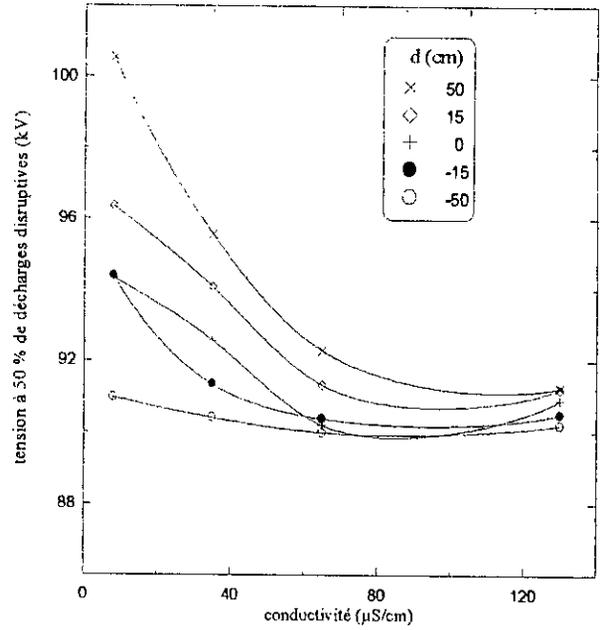
**Figure III.27.** –  $U_{50}$  en fonction de la distance dans le cas de la tige négative ( $h=14$  cm).

### III.4.3 Influence de la conductivité

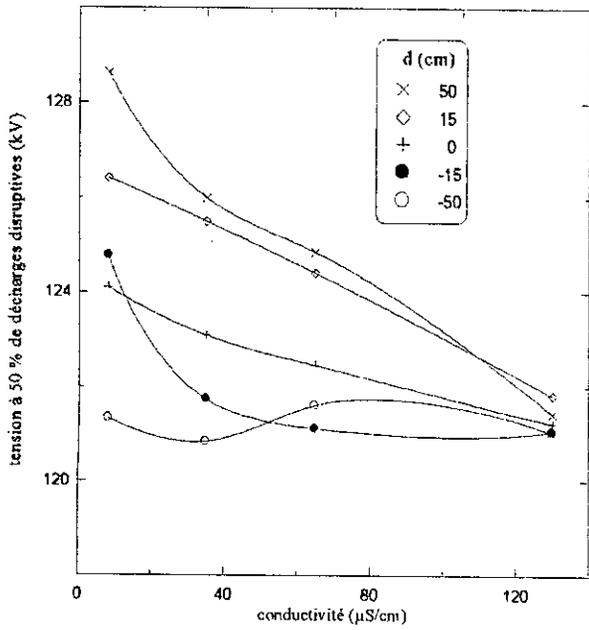
Les figures III.20 à III.27 montrent clairement que les variations de la tenue avec la position de la tige sont plus importantes lorsque la conductivité du sol s'affaiblit, c'est à dire lorsque le degré d'hétérogénéité du sol est élevé. Sur les figures III.28 et III.29 nous avons présenté, respectivement pour les deux polarité, les variations de  $U_{50}$  en fonction de la conductivité pour différentes distances. L'influence de la conductivité est plus significative pour les positions de la tige correspondant au côté mauvais conducteur du sol.



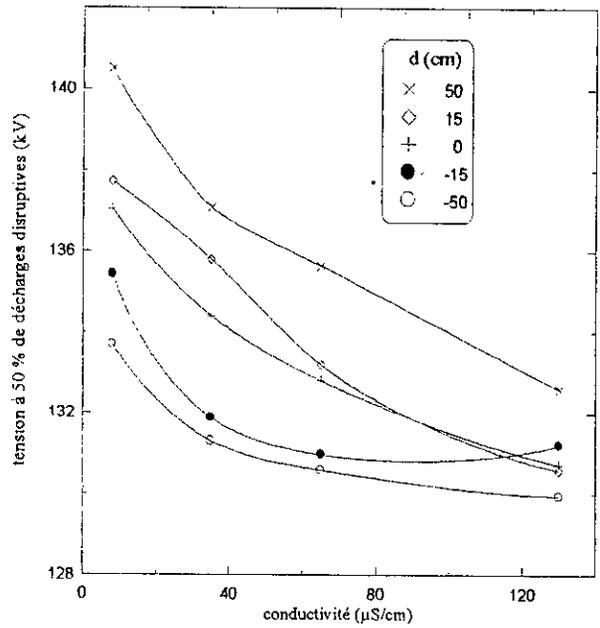
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure III.28.** –  $U_{50}$  en fonction de la conductivité dans le cas de la tige positive.

- (a) –  $h=4$  cm.
- (b) –  $h=8$  cm.
- (c) –  $h=12$  cm.
- (d) –  $h=14$  cm.

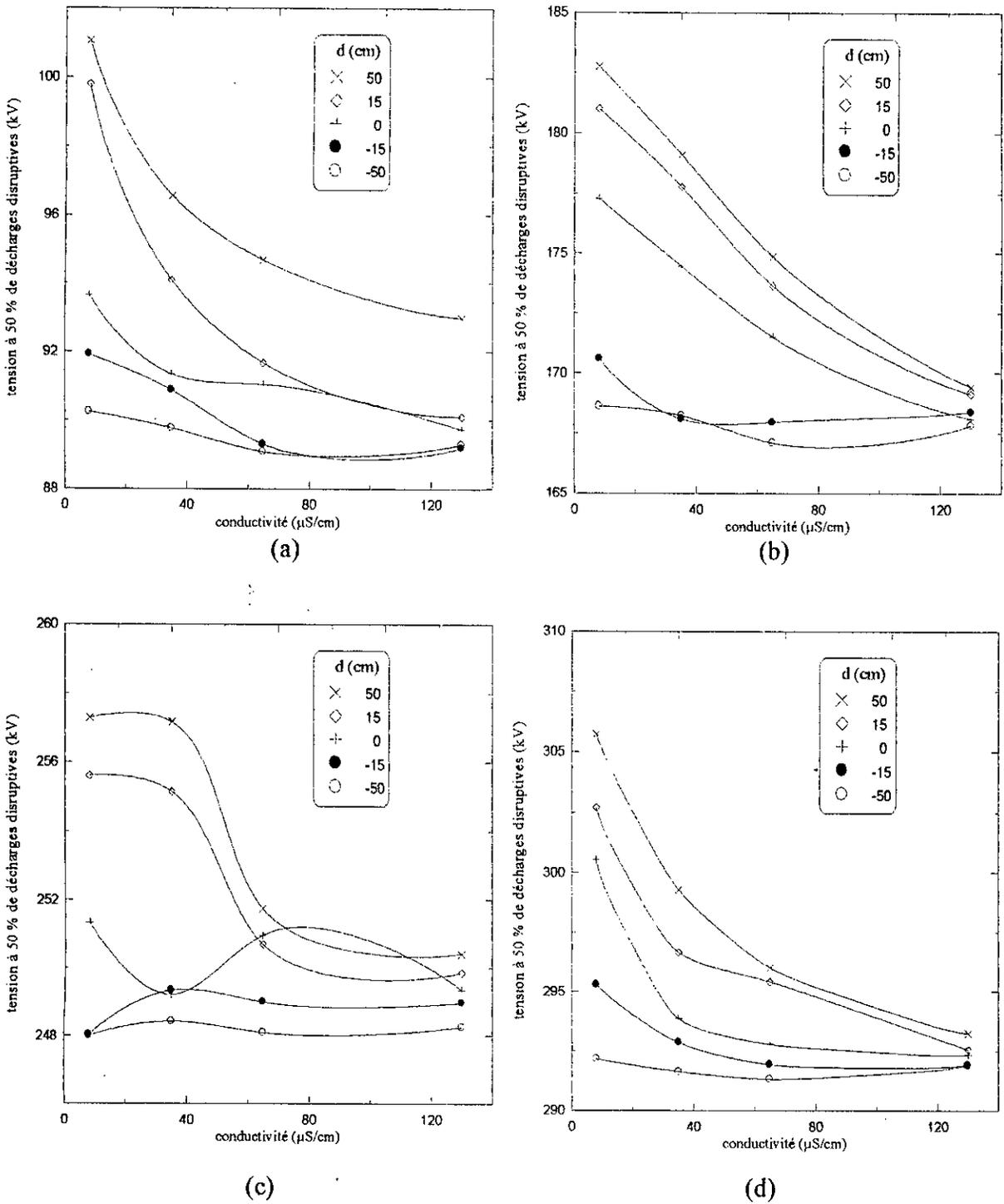


Figure III.29. –  $U_{50}$  en fonction de la conductivité dans le cas de la tige négative.

(a) –  $h = 4$  cm.

(b) –  $h = 8$  cm.

(c) –  $h = 12$  cm.

(d) –  $h = 14$  cm.

### III.4.4 Influence de l'intervalle

La linéarité de la relation  $U_{50}=f(h)$  est conservée dans le cas du sol hétérogène. Sur les figures III.30 et III.31 nous avons présenté cette relation, pour différentes distances, pour les deux conductivités  $\gamma=8 \mu\text{S/cm}$  et  $\gamma=35 \mu\text{S/cm}$  c'est à dire pour les conductivités pour lesquelles l'hétérogénéité du sol est importante. Nous avons aussi essayer de dégager pour quelles longueur d'intervalle l'influence de l'hétérogénéité est plus importante en traçant les courbes  $U_{50}/U_{\text{hom}}=f(d)$  mais les résultats obtenus ne permettent pas de tirer des conclusions précises.

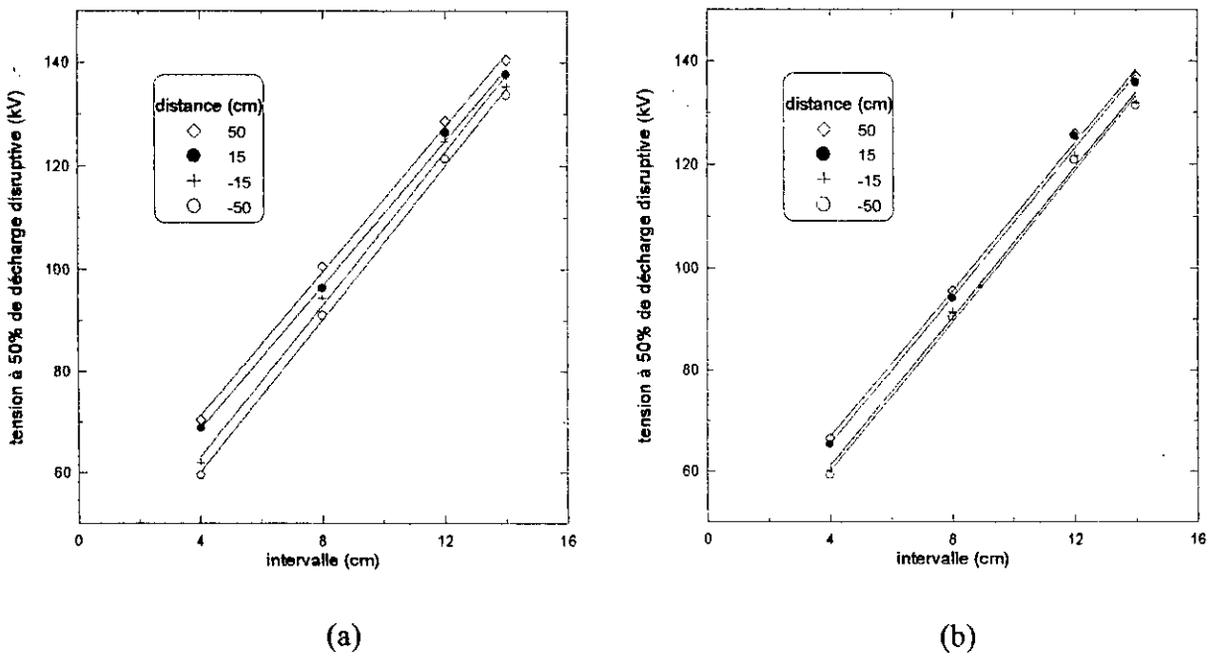


Figure III.30. –  $U_{50}$  en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige positive.

(a) –  $\gamma = 8 \mu\text{S/cm}$ .

(b) –  $\gamma = 65 \mu\text{S/cm}$ .

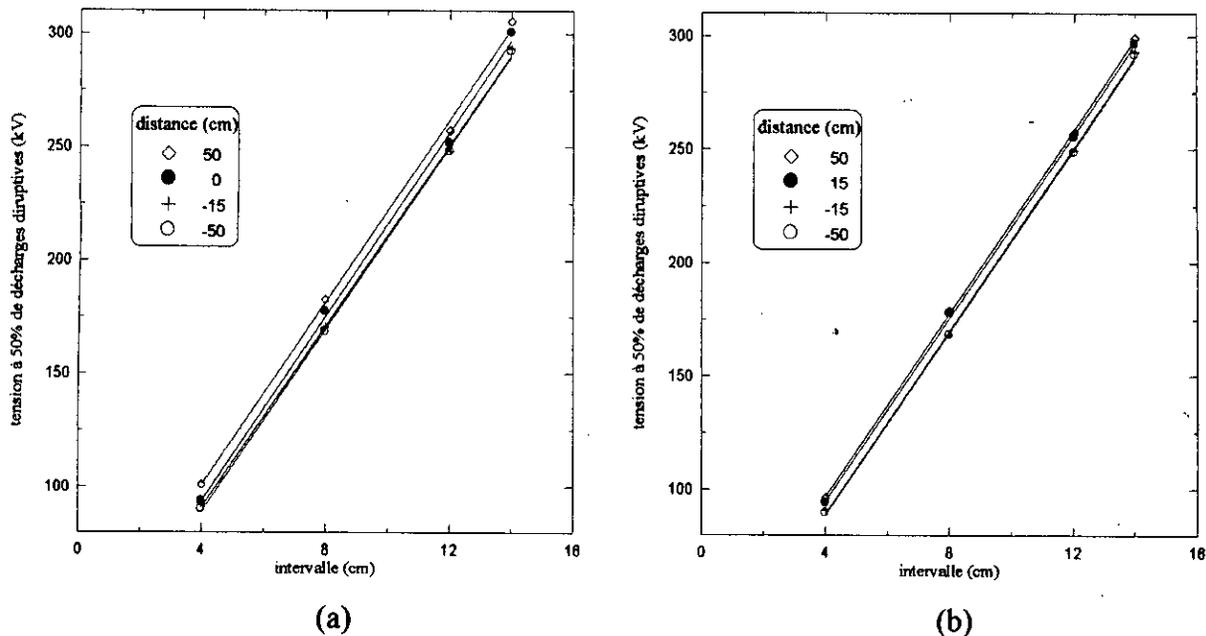


Figure III.31. –  $U_{50}$  en fonction de l'intervalle dans le cas de la tige négative.

(a) –  $\gamma = 8 \mu\text{S/cm}$ .

(b) –  $\gamma = 65 \mu\text{S/cm}$ .

### III.4.5 L'écart type

Les variations de l'écart type  $\sigma$  avec la distance  $d$ , pour différentes longueurs  $h$  et pour différentes conductivités  $\gamma$ , sont représentées aux figures A.28 à A.31 de l'annexe. La dispersion est là aussi importante. Nous notons cependant, qu'en moyenne, l'écart type sous tige positive est légèrement plus grand que sous tige négative.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre travail a été l'étude de l'influence de l'hétérogénéité du sol sur les tensions à 50% de décharges disruptives des petits intervalles d'air tige-plan sous les ondes de choc de foudre positif et négatif. Trois configurations du sol ont été envisagées; la première concerne un sol homogène de conductivité variable, la seconde un sol discontinu et la troisième un sol hétérogène.

- Dans le cas de la terre homogène, la rigidité diélectrique de l'intervalle dépend de la conductivité du sol. L'intervalle est plus rigide pour les plus faibles conductivités. Cette influence est du même ordre pour les deux types de polarité de la tige.
- Dans le cas de la terre discontinue, la rigidité de l'intervalle dépend essentiellement de la position, au-dessus du sol, de l'électrode sous tension. Une nette différence est apparue au voisinage de la discontinuité entre le comportement de l'intervalle sous tension positive et son comportement sous tension négative. L'influence de la conductivité semble dépendre de la grandeur relative de la longueur de l'intervalle par rapport à la profondeur de la discontinuité. Les résultats sont cependant trop peu nombreux pour que cette tendance puisse être affirmée sans réserve. Il serait très intéressant de faire une étude plus approfondie de ce cas en envisageant plusieurs profondeurs et des intervalles plus longs.
- Dans le cas de la terre hétérogène la tenue de l'intervalle d'air pointe-plan dépend étroitement de la position de la tige par rapport à l'interface. Cette influence de la position est plus marquée lorsque la conductivité de la partie mauvaise conductrice est plus faible. Elle dépend donc du degré d'hétérogénéité du sol défini par le rapport des conductivités des deux composantes constituant la terre. Les comportements de l'intervalle sous les deux

polarités semble être similaires. Là aussi la question est à approfondir en utilisant, essentiellement, des modèles de plus grandes épaisseurs.

Les résultats obtenus permettent aussi de faire les conclusions suivantes:

- La caractéristique linéaire de la relation liant la tension à 50% de décharge disruptive et l'intervalle est conservée pour les trois structures étudiées.
- Le système pointe négative-plan reste toujours plus rigide que le système pointe positive-plan pour les trois configurations.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ALS68] **L. L. Alston**, High-Voltage technology, Oxford U. London, 1968.
- [AND79] **R. B. Anderson, A. J. Eriksson**, "Lightning parameters for engineering application", CIGRE Study Committee 33, Juin 1979, pp. 25-29.
- [BAZ75] **E. M. Bazelian, T.G. Valamat-Zade, A.V. Shikilev**, "Along spark in the presence of reduced air density", Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Energeticka: Transport, Vol. 13, n°6, 1975, pp. 149-154.
- [BER77] **K. Berger**, The Earth Flash, Academic Press, 1977.
- [BER75] **K. Berger, R.B. Anderson, H. Kröniger** "Paramètres des coups de foudre", Electra, N°41, 1975, pp. 23-37.
- [BEL94] **R. Belaïcha**, *Zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice*, Thèse de Magister, U.T.O Tizi-Ouzou, 1994.
- [BOU71] **M. Boutteau, A. Boillot, P. Claverie, L. Duranton, G. Gallet, D. Larton**, "Guide pour le traitement statistique de résultats d'essais effectués à des niveaux prédéterminés de la contrainte", E.D.F. Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, série B, N°3, 1971, pp. 57-72.
- [BOU87a] **A. Boubakeur, J. Ferras**, "Décharge de foudre dans les intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène", 8<sup>ème</sup> Journées Tunisiennes de l'Electrotechnique et de l'Automatique JTEA-87, Rap. N°7, Tunis, Tunisie, 1987.

- [BOU87b] **A. Boubakeur, J. Ferras**, "Negative lightning breakdown of rod-plane air gaps with heterogeneous earth", 5<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering (5<sup>th</sup>-ISH), paper 14-26, Braunschweig, RFA, 1987.
- [BOU89] **A. Boubakeur, J. Ferras**, "Negative lightning breakdown of rod-plane air gaps with heterogeneous earth", Middle East Power Systems Conference, MEPCOM-89, paper EE05-025, Assiut, Egypt, 1989.
- [BOU90] **A. Boubakeur, A. Atek, S. Chemlal**, "Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène", 1<sup>er</sup> colloque sur l'Electrotechnique et l'Automatique, rapport I-6, Alger, 1990.
- [BOU91] **A. Boubakeur**, "Protection contre la foudre dans le cas d'une terre hétérogène", Séminaire sur la Sécurité et la Protection des Installations et des Equipements Electriques, ENSEM-LPEE, Casablanca, Maroc, 1991.
- [BOU92] **A. Boubakeur, A. Mekhaldi**, "Capture zones of a lightning conductor in the case of bad conducting earth", Middle East Power Systems Conference, MEPCOM-92, Assiut, Egypt, 1992, pp. 136-142.
- [BOU93] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, "Contribution à l'étude d'un modèle électrogeométrique élargi", Journées Tunisiennes de l'Electrotechnique et de l'Automatique JTEA-93, Hammamet, Tunisie, 1993, pp. 136-142.
- [BOU94] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, "Modèle de protection en cas de terre mauvaise conductrice", Congrès International "Foudre et Montagne", SEE, Chamonix, 1994, pp. 100-103.
- [BOU95a] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, "Influence of the earth conductivity on negative lightning breakdown of rod-plane air gaps", 9<sup>th</sup> Symposium on High Voltage Engineering (ISH95), Vol. S6, paper 6711, Graz, Austria, 1995.
- [BOU95b] **A. Boubakeur, R. Belaïcha**, "Modèle de protection contre la foudre dans le cas d'une terre mauvaise conductrice", AJOT, Special issue, Proceedings of CEA94, 1995.
- [BOU96] **A. Boubakeur, R. Belaïcha, A. Rahmani, R. Boudissa**, "Influence of earth conductivity on the capture zones of an horizontal lightning conductor", 23<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP96), Vol.1, Firenzy, Italy, 1996, pp. 453-456.

- [BOU97] **A. Boubakeur**, "Influence of earth electrogeological properties on lightning protection modelisation", Proceeding of the IEEA'97, Vol.1-Electrical engineering, Université de Batna, 1997, pp. 17-21.
- [BOW65] **A. H. Bowker, G. j. Lieberman**, Méthodes statistiques de l'ingénieur, Dunod, 1965.
- [BÜS78] **W Büsch**, "Air humidity: an important factor for U.H.V. design", IEEE Trans. on Power and Apparatus, Vol. PAS. 97, n°6, 1978, pp. 2086-2093.
- [CAR72] **G. Carrara, L. Dellerà**, "Accuracy of an extended up-and-down method in statistical testing in insulation", Electra, 1972, n°23, pp. 159-179.
- [CEI60] **C.E.I. 60**, "Techniques d'essai de haute tension", 1973 (60-01/02).
- [FER87] **J. Ferras**, *Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre*, Thèse de Magister, E.N.P, Alger, 1987.
- [GIR67] **M. Girault**, Eléments de méthodologie statistique, Dunod, 1967.
- [GAR94] **C. Gary**, La foudre: Des mythologies antiques à la recherche moderne, Masson, 1994.
- [HAH76] **G. Hahn, P. Zacke, A. Fischer, H. Boecker**, "Humidity influence on switching impulse breakdown of a 50 cm rod-plane air gap", IEEE Trans. on Power App. and Syst., Vol. PAS95, n°4, 1976.
- [HAR70] **T. Harada, Y. Aoshima, Y. Ishida, Y. Ichihara, K. Anjo, N. Nimura**, "Influence of air density on flashover voltages of air gaps and insulators", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS89, n°6, 1970, pp.1192-1202.
- [HUT88] **B. Hutzler**, "Simulation de la foudre en laboratoire", EDF Bull. D.E.R, serie B, Réseaux Electrique, Matériels Electriques N°3,1988, pp. 31-40.
- [HYL83] **N. Hylter-cavalluis, F. A. Chagas**, "Possible precision of statistical insulation test methods", IEEE PAS-102, n°8, 1983, pp. 2372-2378.
- [KIN78] **D. Kind**, High voltage experimental technique: Text book for Electrical Engineers, Friedr Vieweg & Sohn, 1978.
- [KIN85] **D. Kind, H Karner**. High voltage insulation technology : Text book for Electrical Engineers, Friedr Vieweg & Sohn, 1985.

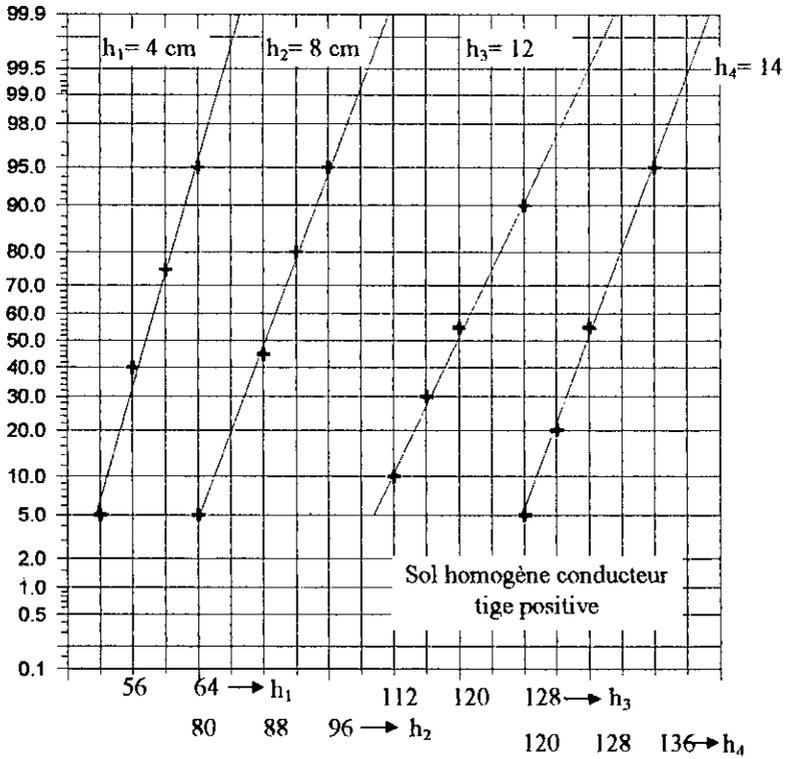
- [KRU79] **Z. Krulk**, "Nouvelles prospections géologiques et géoélectriques du danger d'atteinte par la foudre", 15<sup>ème</sup> Conf. Int. Protec. Contre la Foudre, R-3.10, 1979.
- [KUF84] **E. Kuffel, W. S. Zaengl**, High-Voltage Engineering, Pergamon Press, 1984.
- [KUC72] **J. Kucera, T.W. Liao, A. F. Rohlfis**, "Facteurs de correction atmosphérique pour les essais à haute tension", *Electra*, n°21, 1972, pp. 74-85.
- [LER84] **G. LeRoy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Dubaton**, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, Editions Eyrolles, 1984.
- [LET80] **C. Leteinturier, B. Djebari, J. Hamelin, J. Fontaine**, "Electromagnetic field emitted by lightning stroke. Theoretical model taking into account the ground conductivity. Comparison with experimental measurements made at Saint-Privat d'Allier", 5<sup>ème</sup> Symp. Int. EMC Wroclaw, Pologne 1980, pp 663-671.
- [NAC91] **K. Nacereddine, A. Boubakeur**, "Simulation numérique de la foudre : le programme PROC.2D", Colloque Maghrébin sur les Modèles Numériques de l'Ingénieur, Tunis, 1991.
- [NAC93] **K. Nacereddine, A. Boubakeur**, "Influence de la permittivité relative du sol sur l'attraction des décharges de foudre", Colloque Maghrébin sur les Modèles Numériques de l'Ingénieur, Alger, 1993.
- [NAS71] **E. Nasser**, Fundamentals of Gaseous Ionisation and Plasma Electronics, Wiley-Interscience, 1971.
- [NOR50] **H. Norinder, O. Salka**, "The properties of artificial lightning discharges against a geologically heterogeneous surface", CIGRE, rapport 313, 1950.
- [ORV82] **R. E Orville, V.P Idone**, "Lightning leader characteristics in the TRIP", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, 1982, pp. 11177-11192.
- [OUY67] **M. Ouyang**, "Interception of impulse tests", *Electr. Times*, Vol. 151, 1967, pp. 165-167.
- [PHI67] **T. A. Philipps, L. M. Robertson, A. F. Rohlfis, R.L. Thompson**, "Influence of air density on electrical strength of transmission line insulation", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS86, n°8, 1967, pp. 948-961.

- [RAH96] **A. Rahmani**, *Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre mauvaise conductrice*, Thèse de Magister, C.U. Bejaïa, 1996.
- [SCH34] **B. F. J. Schonland**, "Development of the spark discharge", *Nature*, London, n°134, 1934, pp. 736.
- [SCH53] **B. F. J. Schonland**, "The pilot streamer in lightning and the long spark", *Proc. Rog. Soc.*, London, 220, 1953, pp. 25-38.
- [SUZ75] **T. Suzuki**, "Breakdown process in rod-to-plane gaps with negative switching impulses", *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS94, N°4, 1975.
- [SZU79] **G. Szunyogh**, "Solution et explication mathématique de fulminabilité géologique", 15<sup>ème</sup> Conf. Int. Protec. Contre la Foudre, R-3.5, 1979.
- [WAG61] **C.F. Wagner, A.R. Hileman**, "The lightning stroke", *Trans. AIEE*, PAS80, 1961, pp. 622-642.

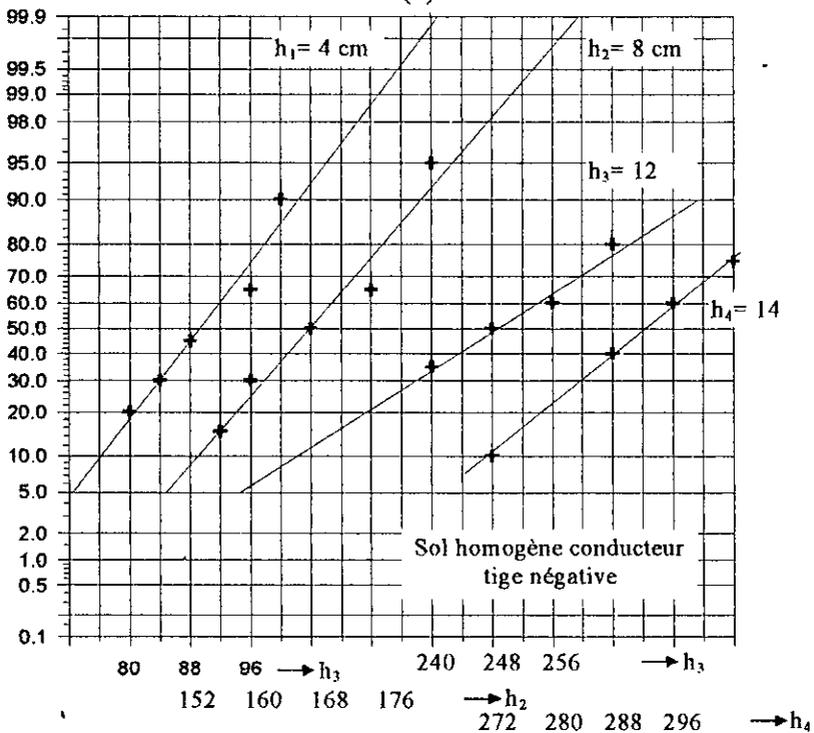
# **ANNEXE**

**A.I Probabilité de décharge  $P_A$  en fonction des tensions appliquées  $U_{cr}$  (échelle gauss-arithmétique)**

**A.I.1 Sol homogène**



(a)

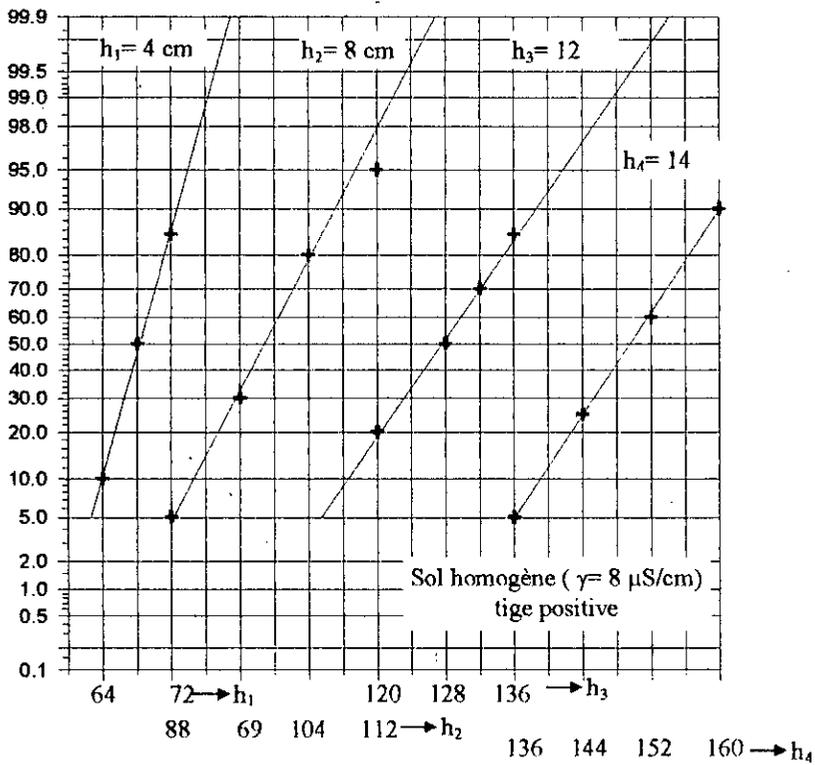


(b)

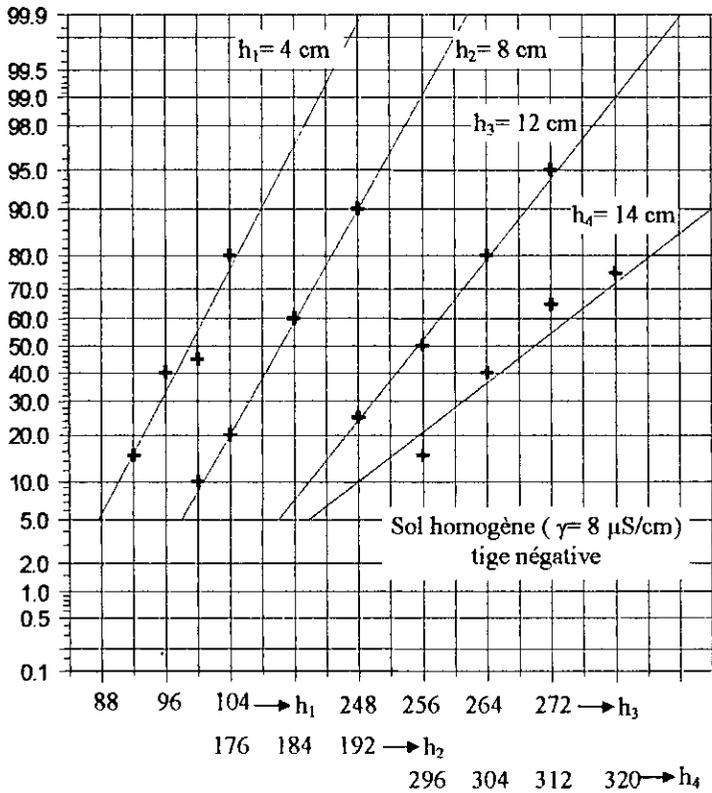
**Figure A.1.-  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol bon conducteur.**

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.

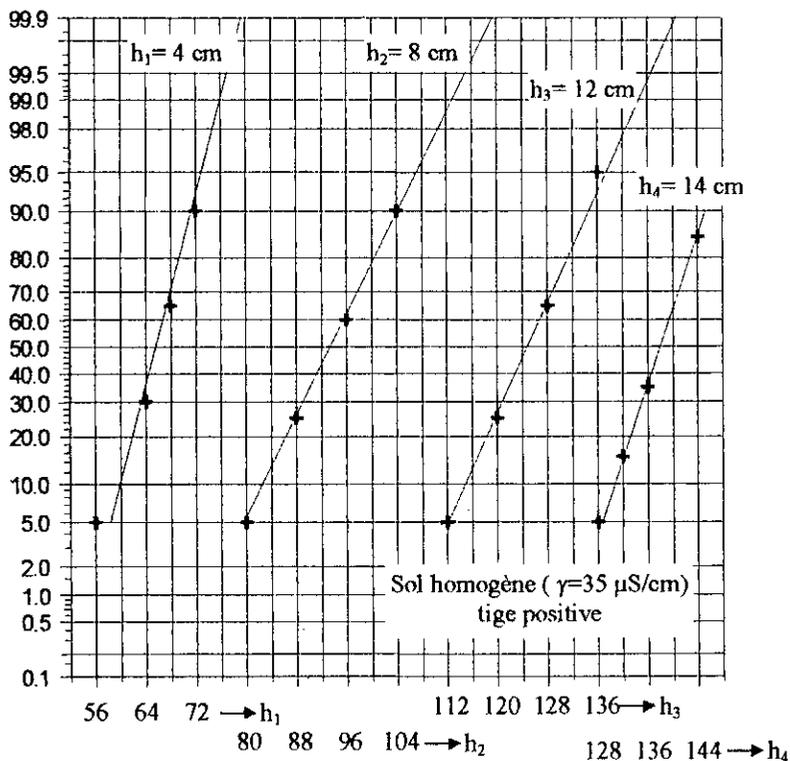


(a)

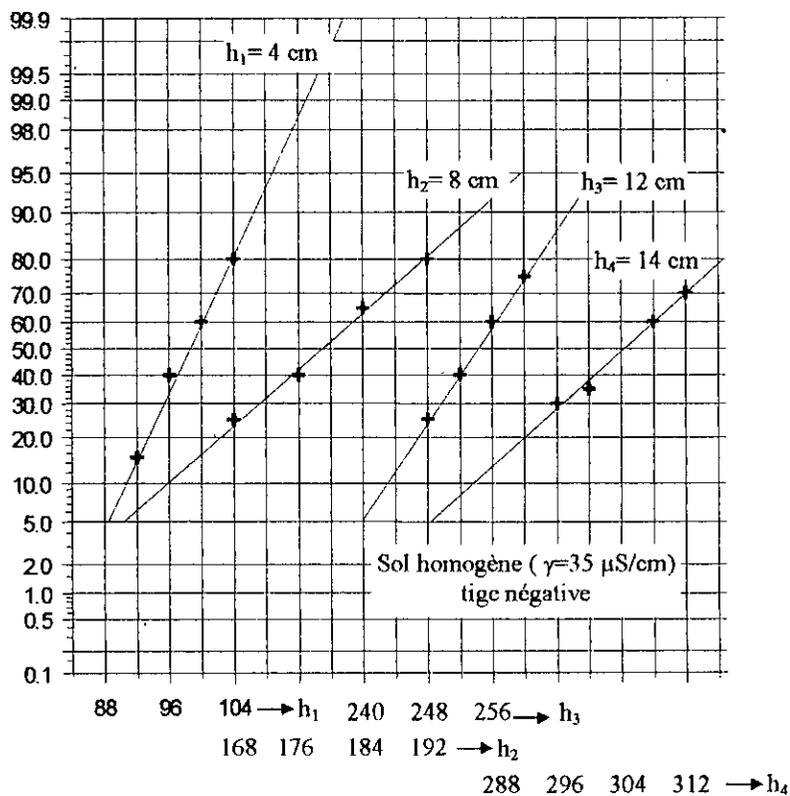


(b)

**Figure A.2.**–  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol mauvais conducteur ( $\gamma = 8 \mu\text{S/cm}$ )  
 (a)- Tige positive.  
 (b)- Tige négative.

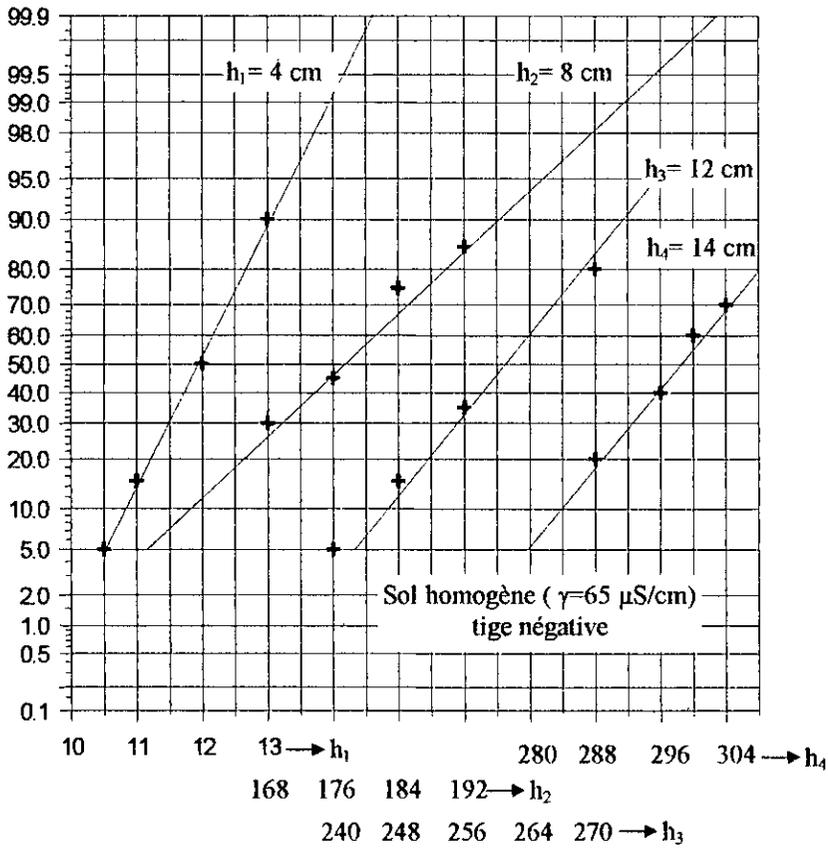


(a)

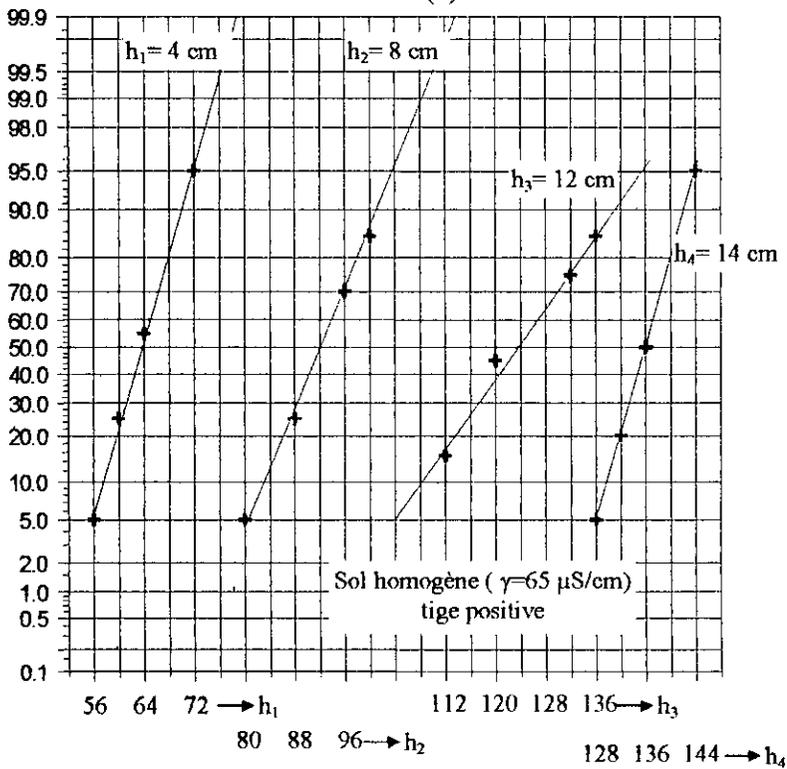


(b)

Figure A.3.-  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol mauvais conducteur ( $\gamma=35 \mu\text{S/cm}$ ).  
 (a)- Tige positive.  
 (b)- Tige négative.

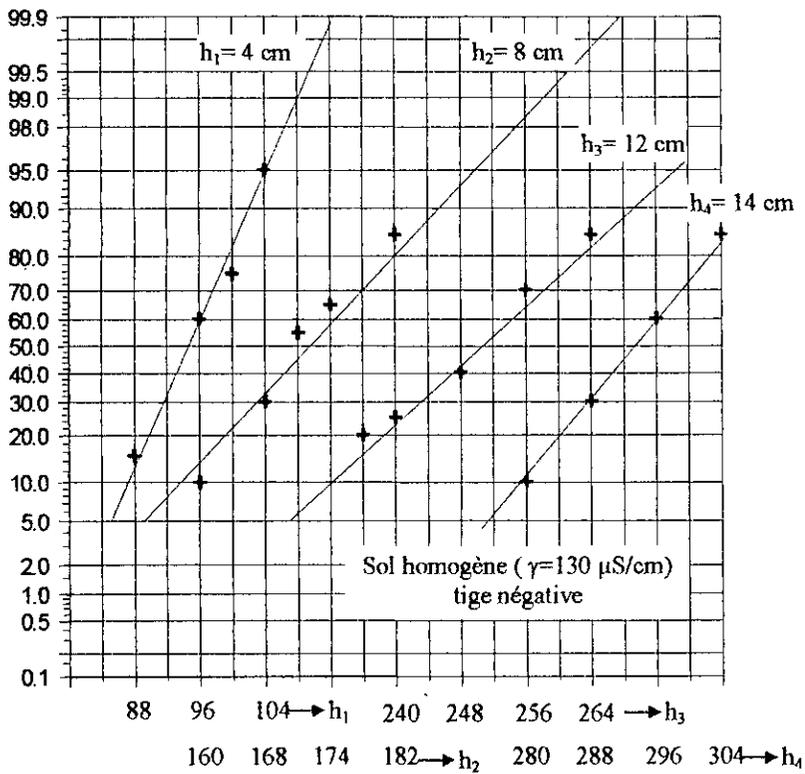


(a)

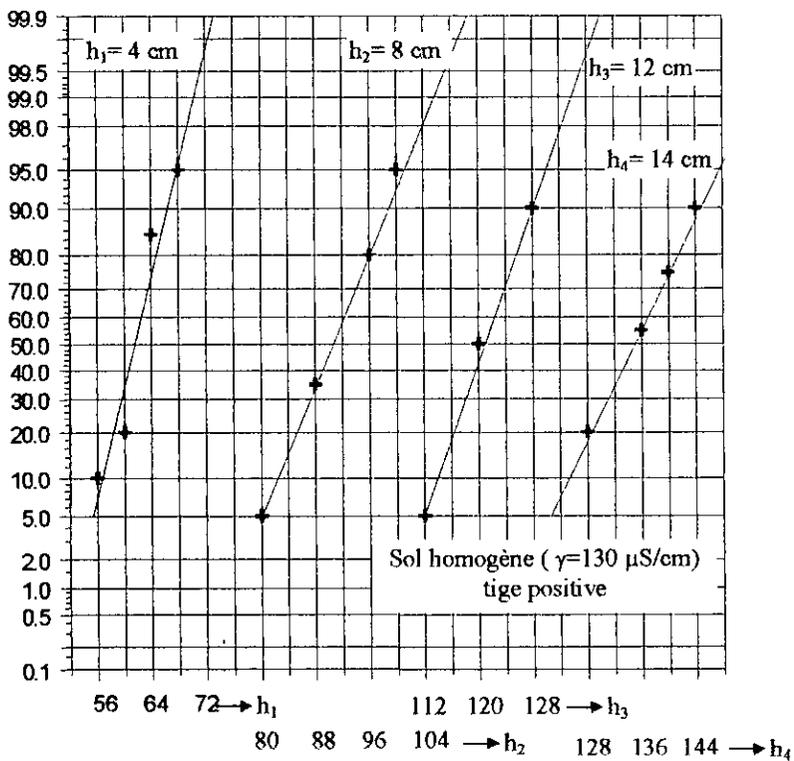


(b)

Figure A.4.—  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol mauvais conducteur ( $\gamma = 65 \mu\text{S/cm}$ ).  
 (a)- Tige positive.  
 (b)- Tige négative.

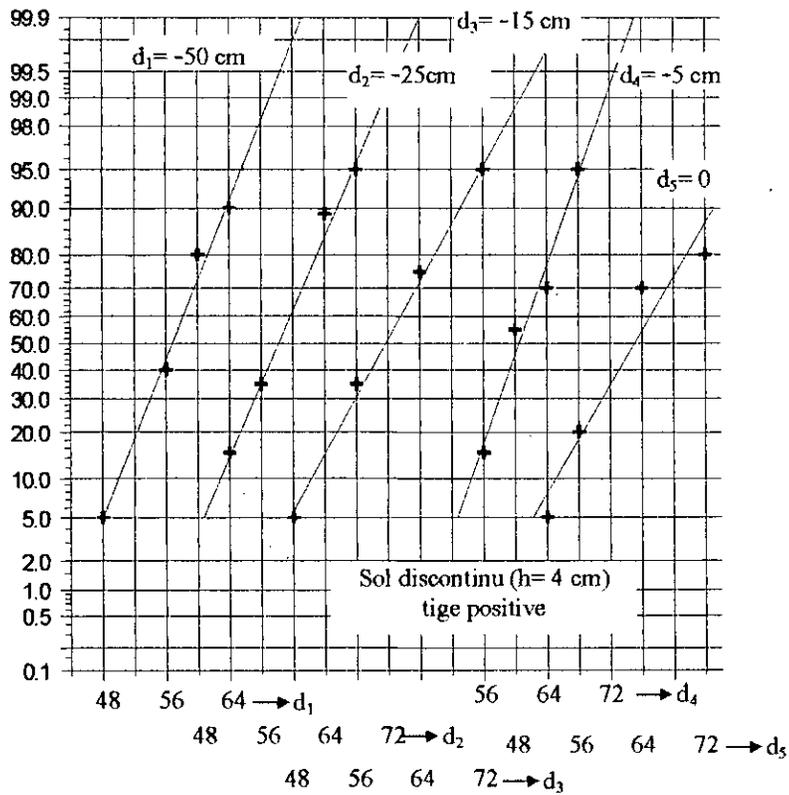


(a)

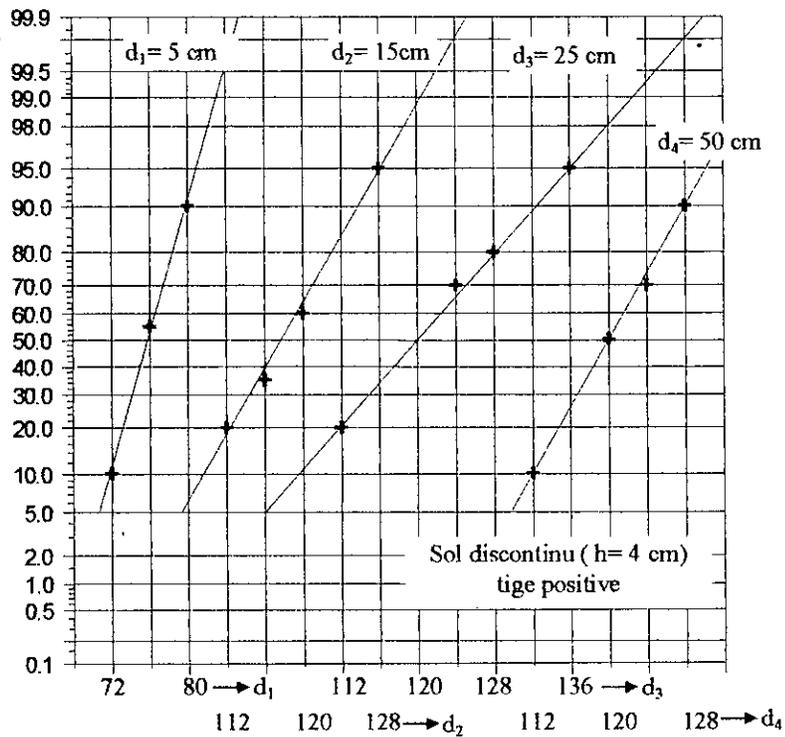


(b)

Figure A.5.—  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol mauvais conducteur ( $\gamma=130 \mu\text{S/cm}$ ).  
 (a)- Tige positive.  
 (b)- Tige négative.

**A.L2 Sol discontinu**

(a)

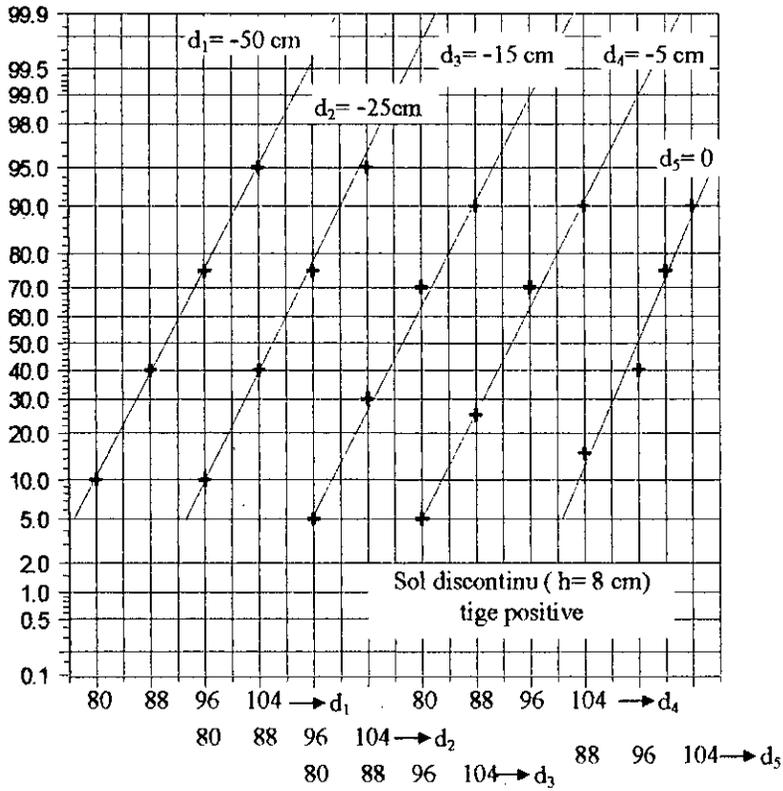


(b)

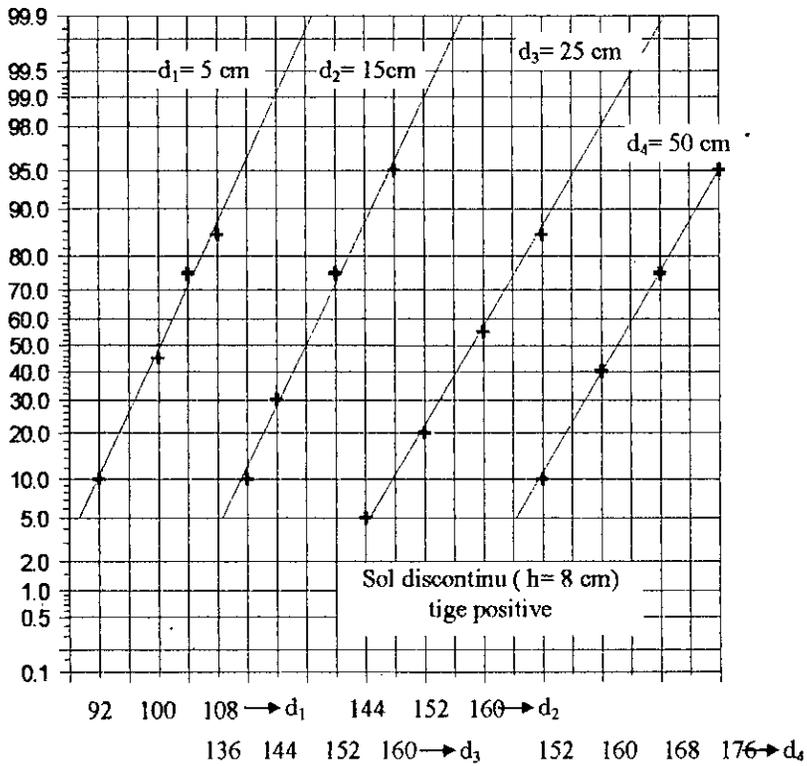
**Figure A.6.**–  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol discontinu ( $h=4$  cm).

(a)- Tige positive à gauche de l'interface.

(b)- Tige positive à droite de l'interface.



(a)

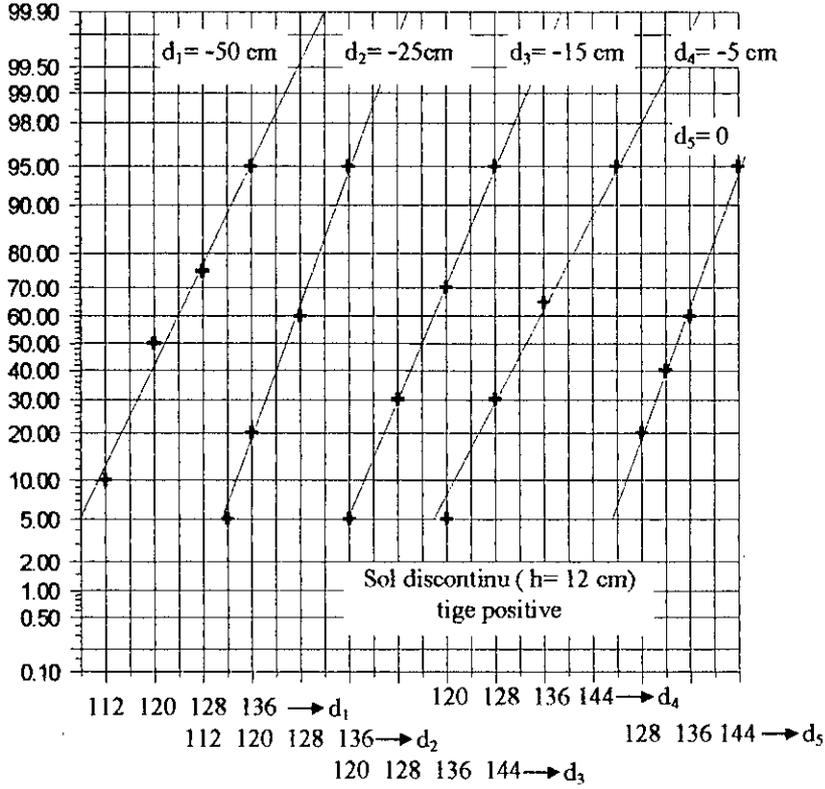


(b)

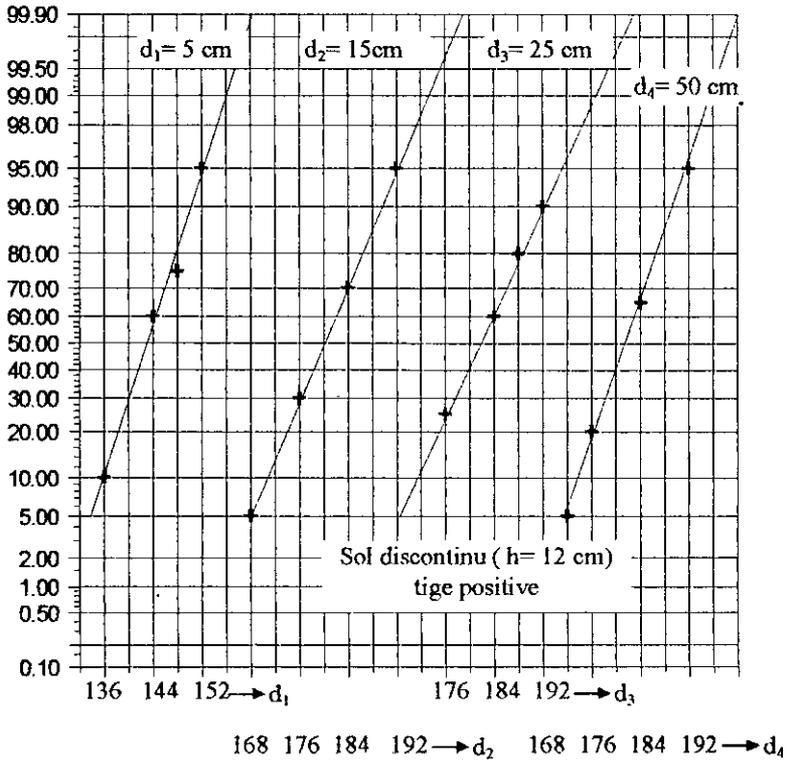
Figure A.7.—  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol discontinu ( $h=8$ cm).

(a)- Tige positive à gauche de l'interface.

(b)- Tige positive à droite de l'interface.

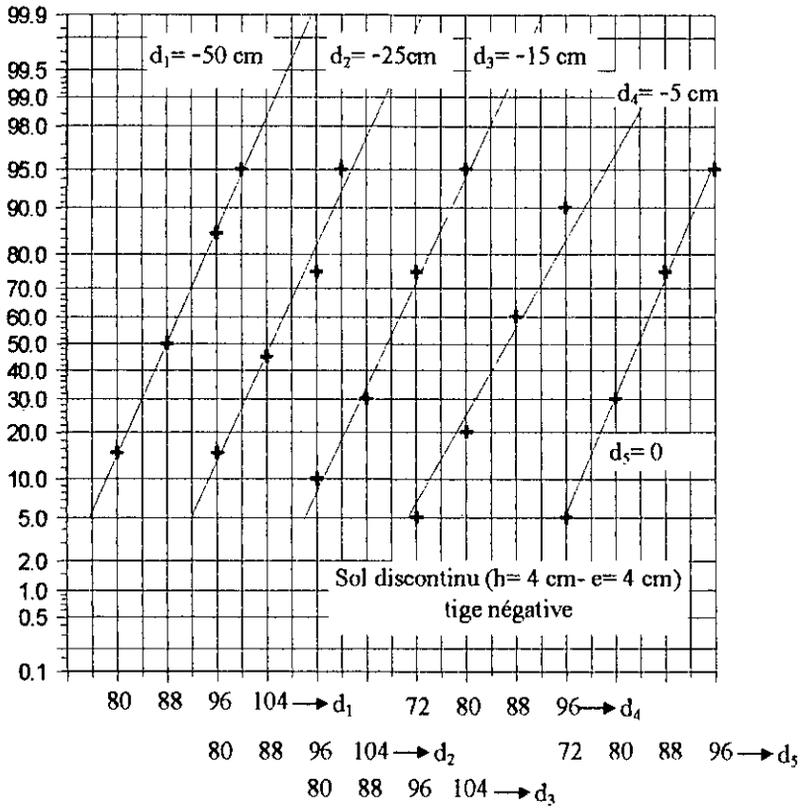


(a)

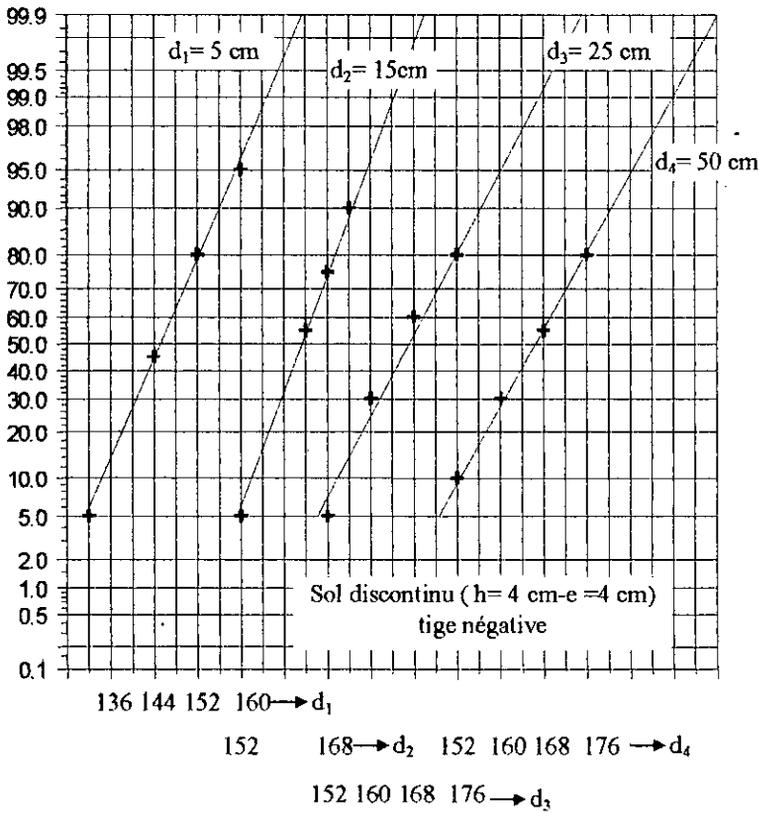


(b)

**Figure A.8.**—  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol discontinu ( $h=12$ cm).  
 (a)- Tige positive à gauche de l'interface.  
 (b)- Tige positive à droite de l'interface.

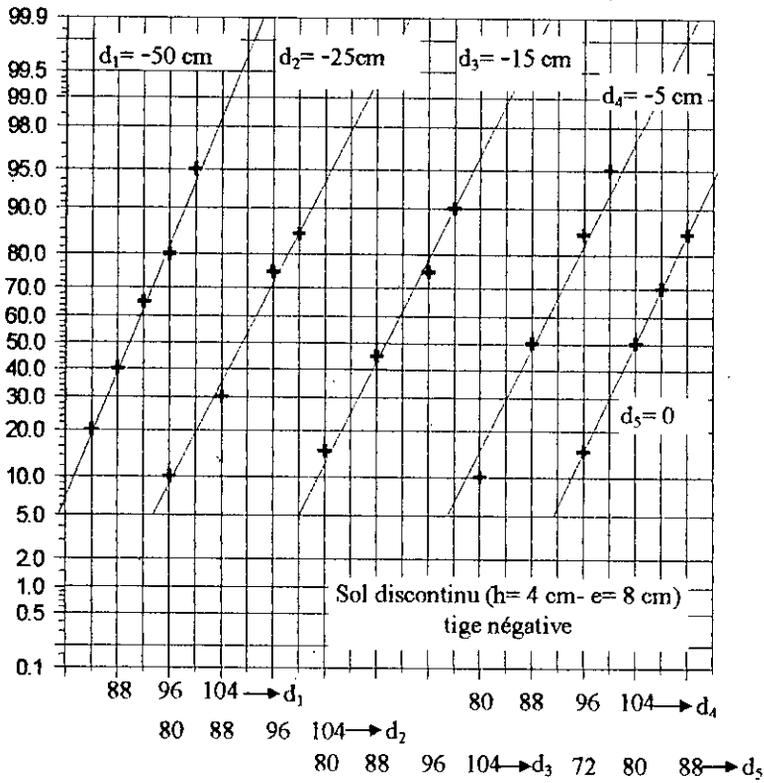


(a)

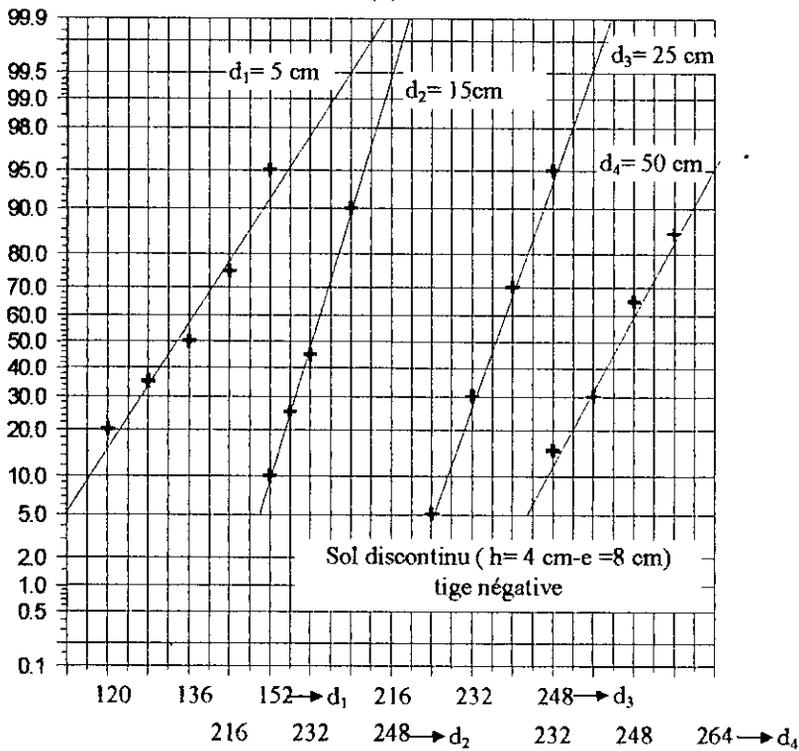


(b)

**Figure A.9.**—  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol discontinu ( $h=4$ cm,  $e=4$ cm).  
 (a)- Tige négative à gauche de l'interface.  
 (b)- Tige négative à droite de l'interface.



(a)

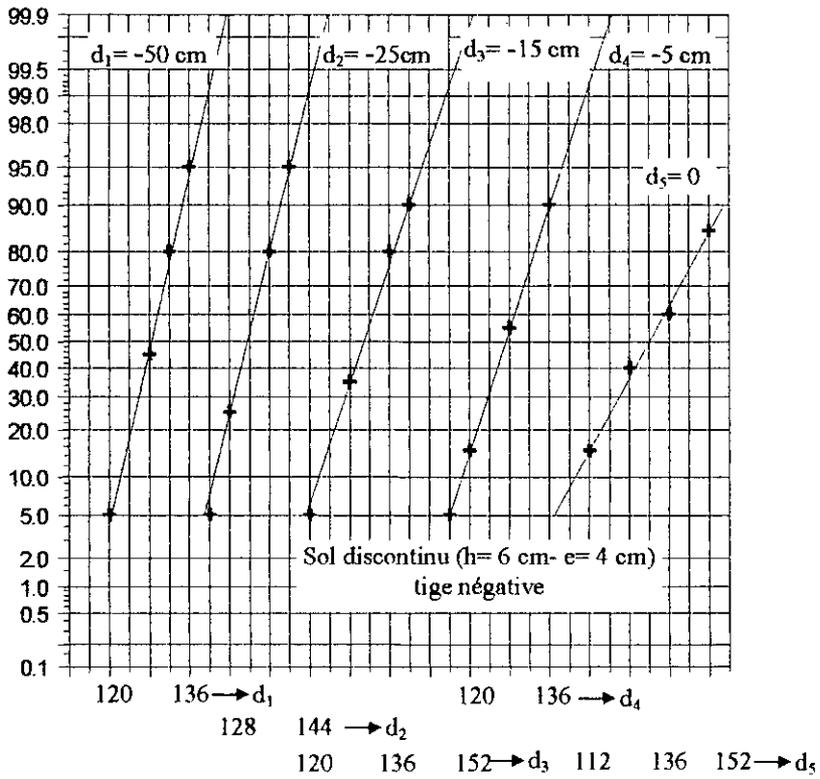


(b)

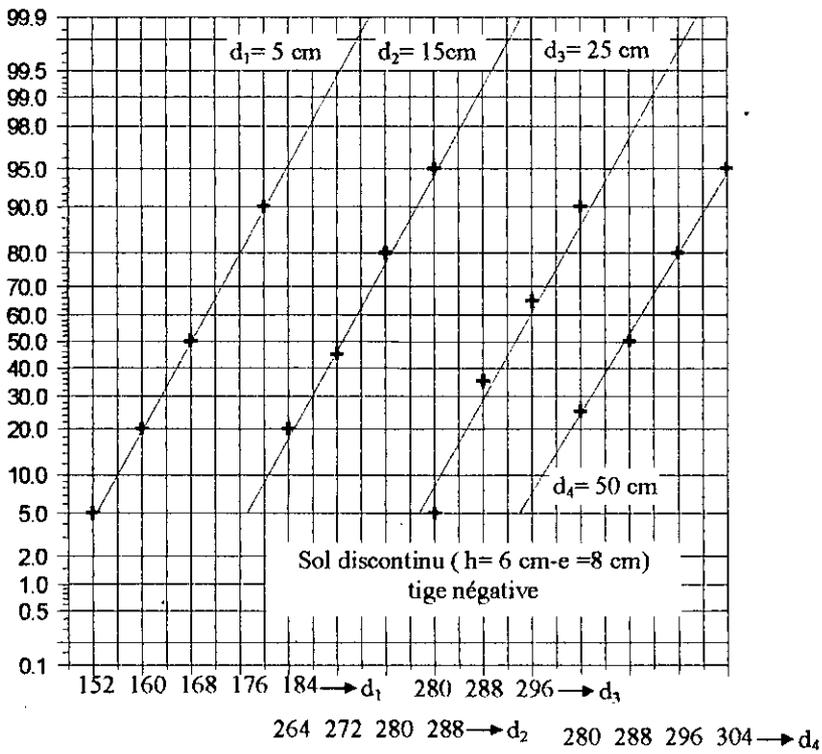
Figure A.10.-  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol discontinu ( $h=4$  cm,  $e=8$  cm).

(a)- Tige négative à gauche de l'interface.

(b)- Tige négative à droite de l'interface.



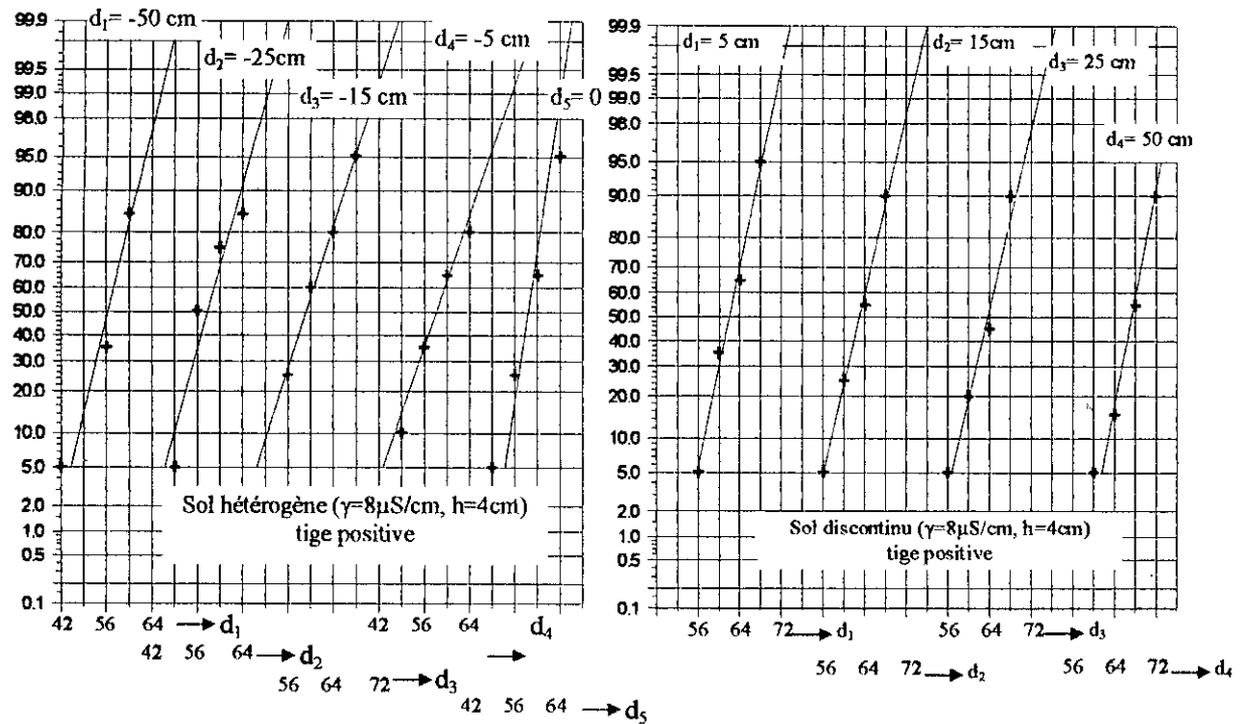
(a)



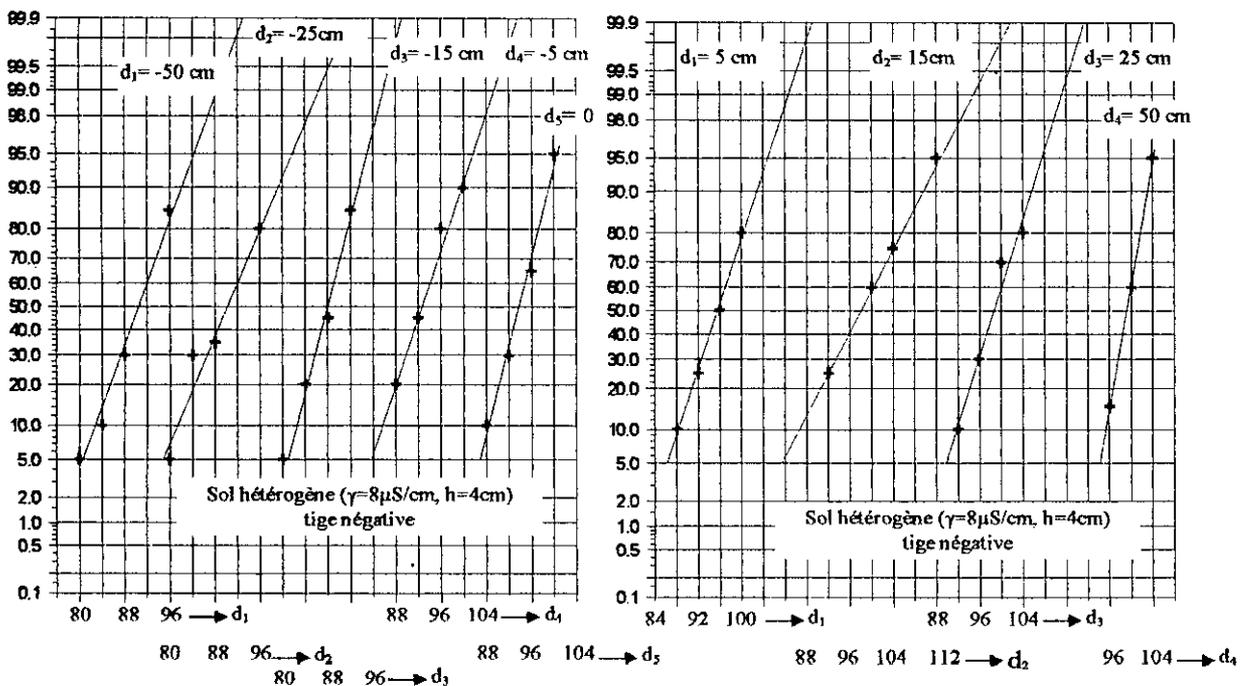
(b)

Figure A.11.-  $P_A$  en fonction de  $U_{cr}$  (kV) dans le cas du sol discontinu ( $h=6\text{cm}$ ,  $e=8\text{cm}$ ).  
 (a)- Tige négative à gauche de l'interface.  
 (b)- Tige négative à droite de l'interface.

### A.1.3 Sol hétérogène



(a)

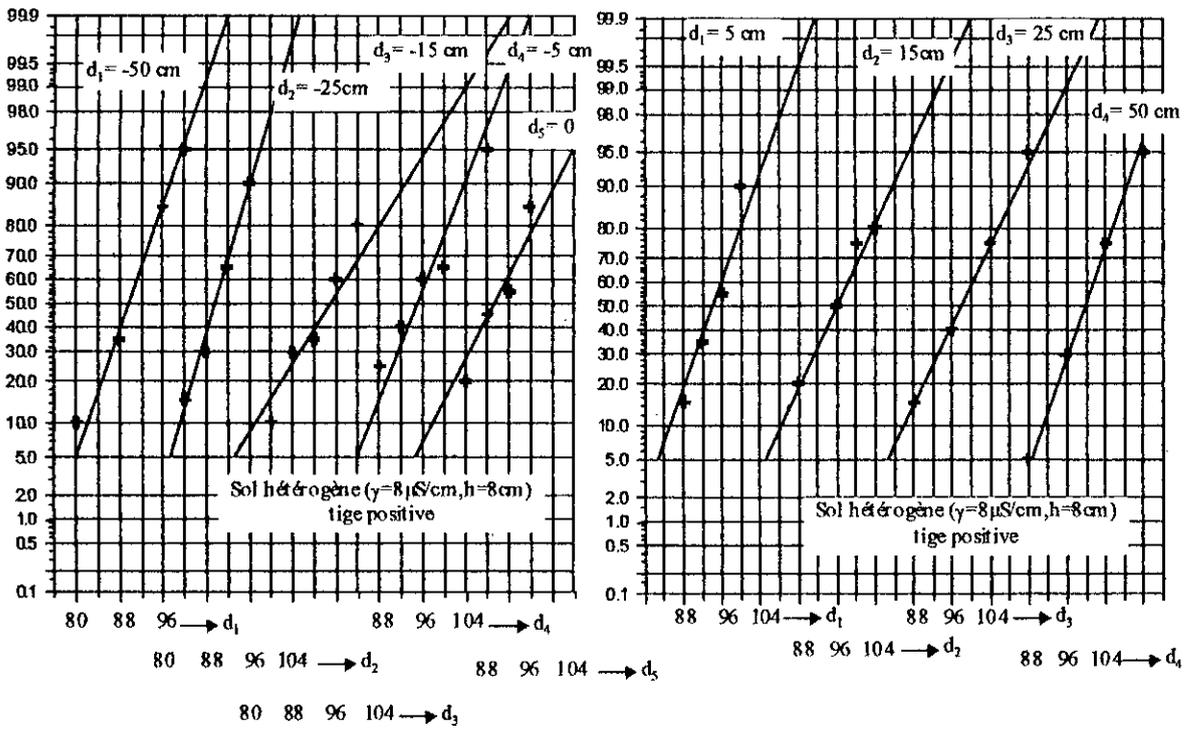


(b)

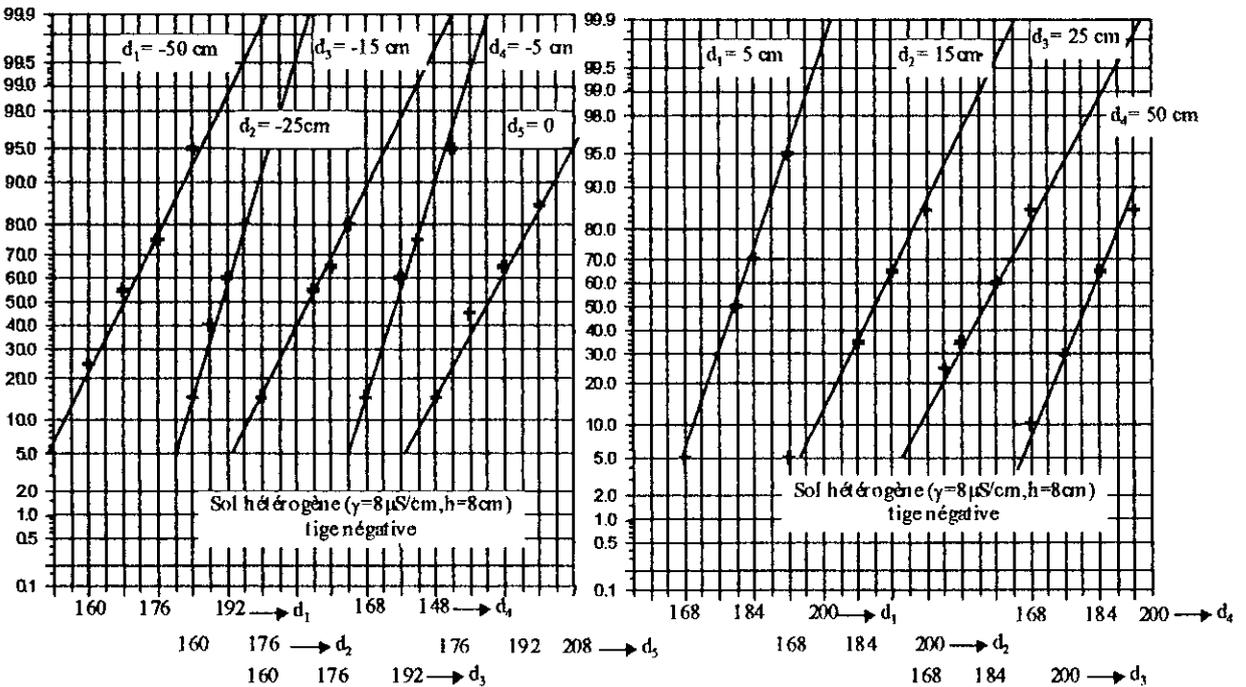
Figure A.12.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=8\mu\text{S/cm}$ ,  $h=4\text{cm}$ ).

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.



(a)

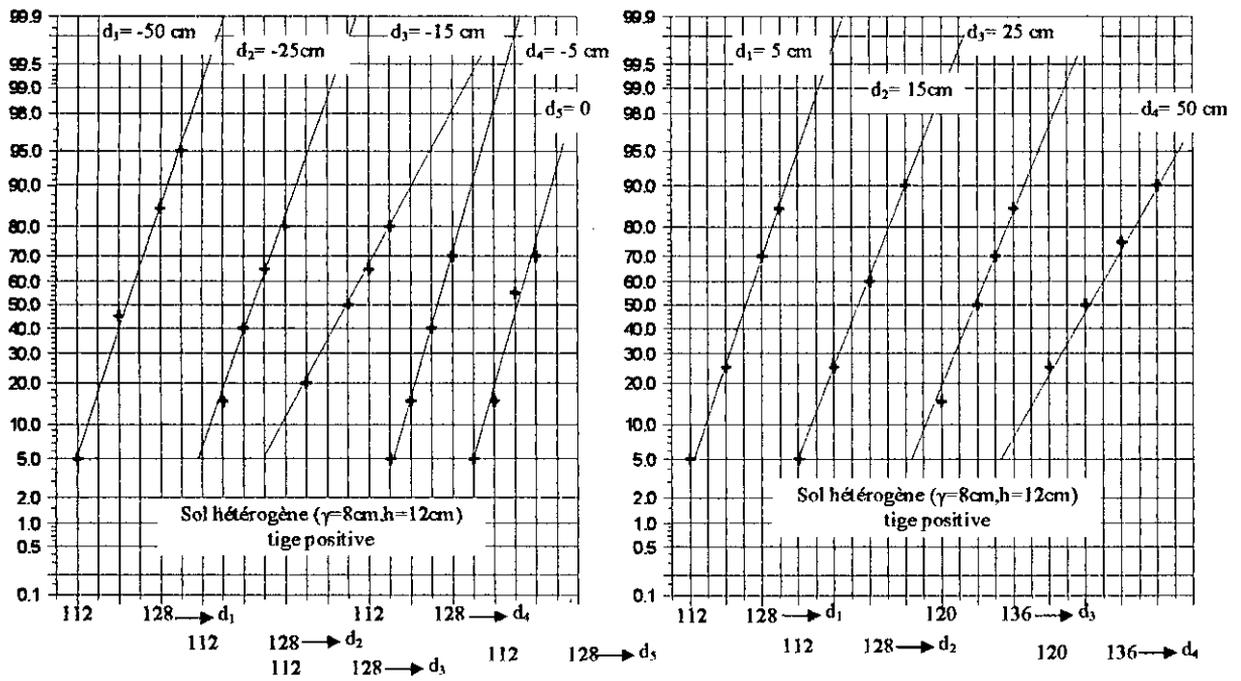


(b)

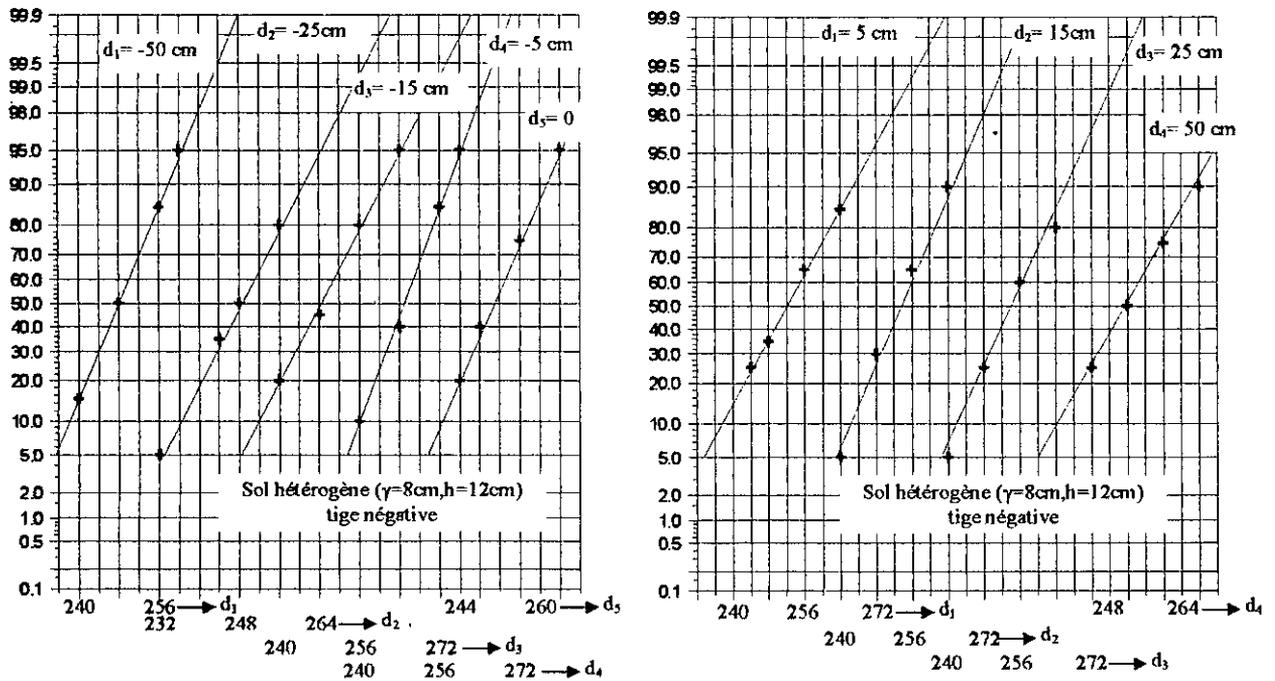
Figure A.13.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma = 8 \mu\text{S/cm}$ ,  $h = 8 \text{ cm}$ ).

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.



(a)

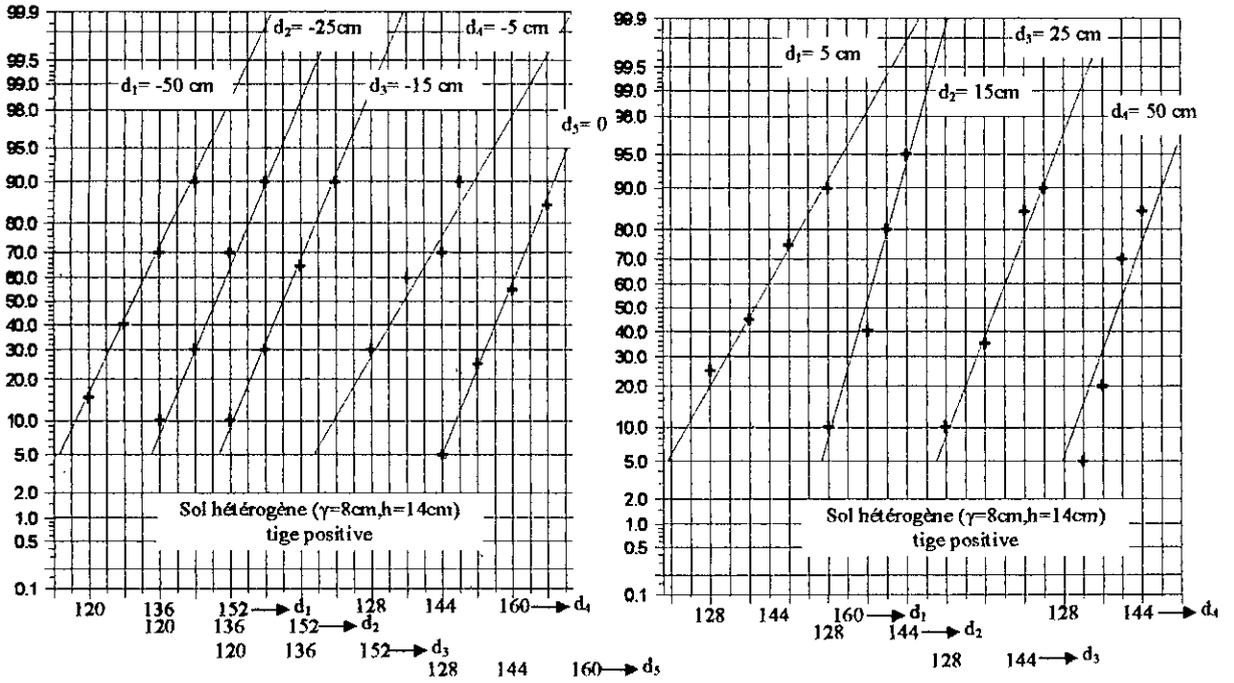


(b)

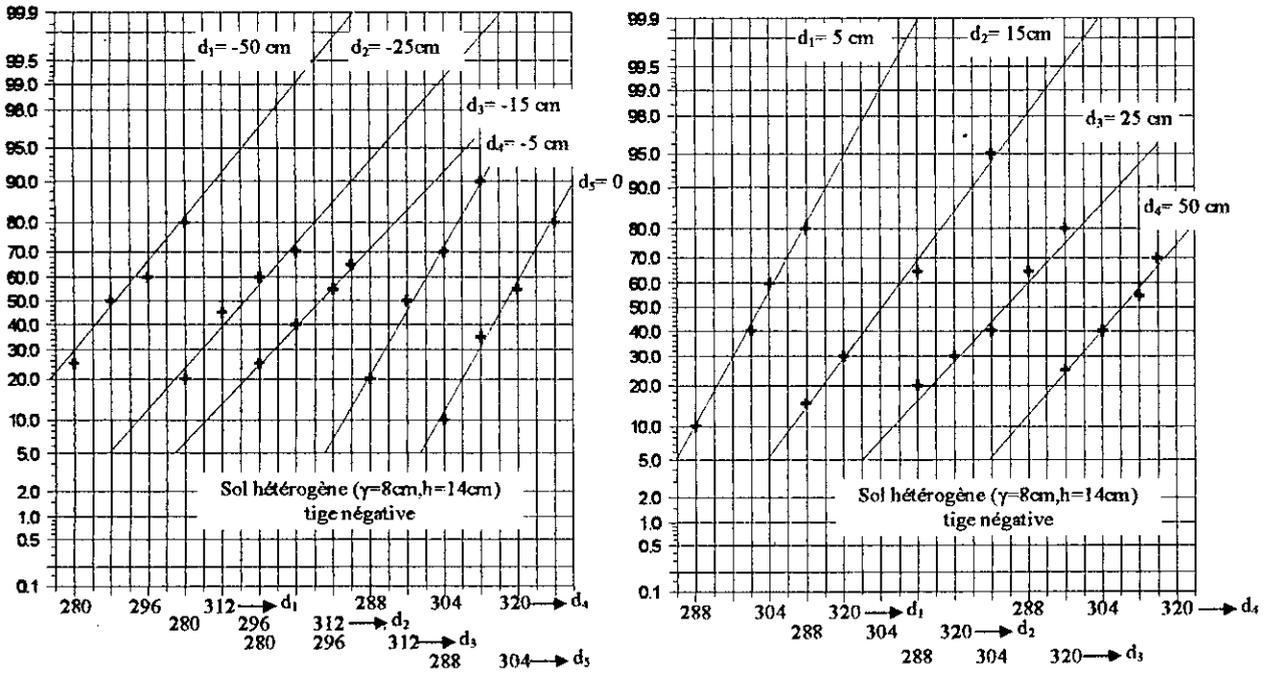
Figure A.14.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma = 8 \mu\text{S/cm}$ ,  $h = 12 \text{ cm}$ ).

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.



(a)

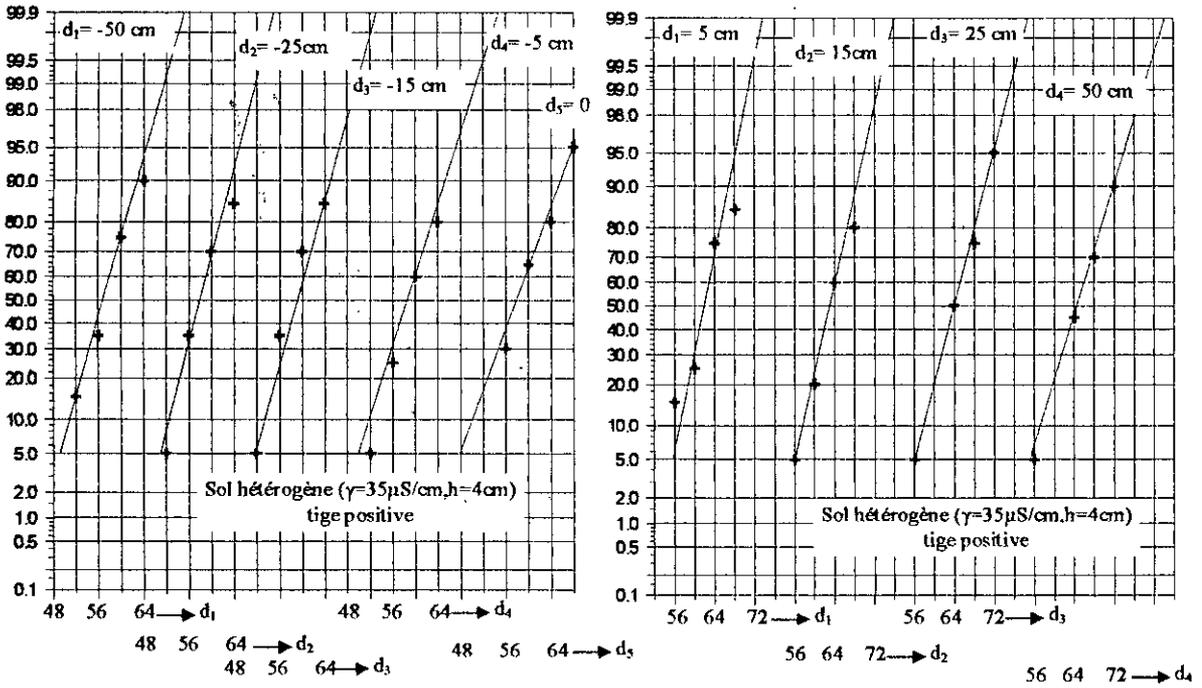


(b)

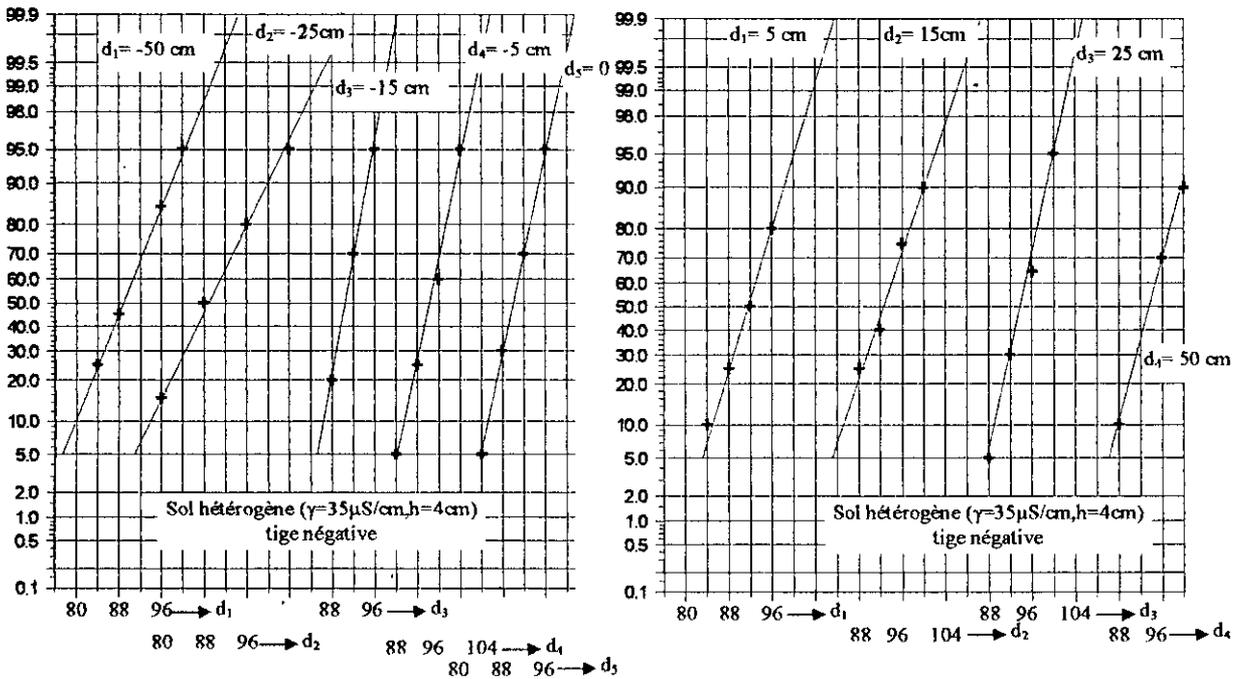
Figure A.15.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=8\mu\text{S}/\text{cm}, h=14\text{cm}$ ).

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.



(a)

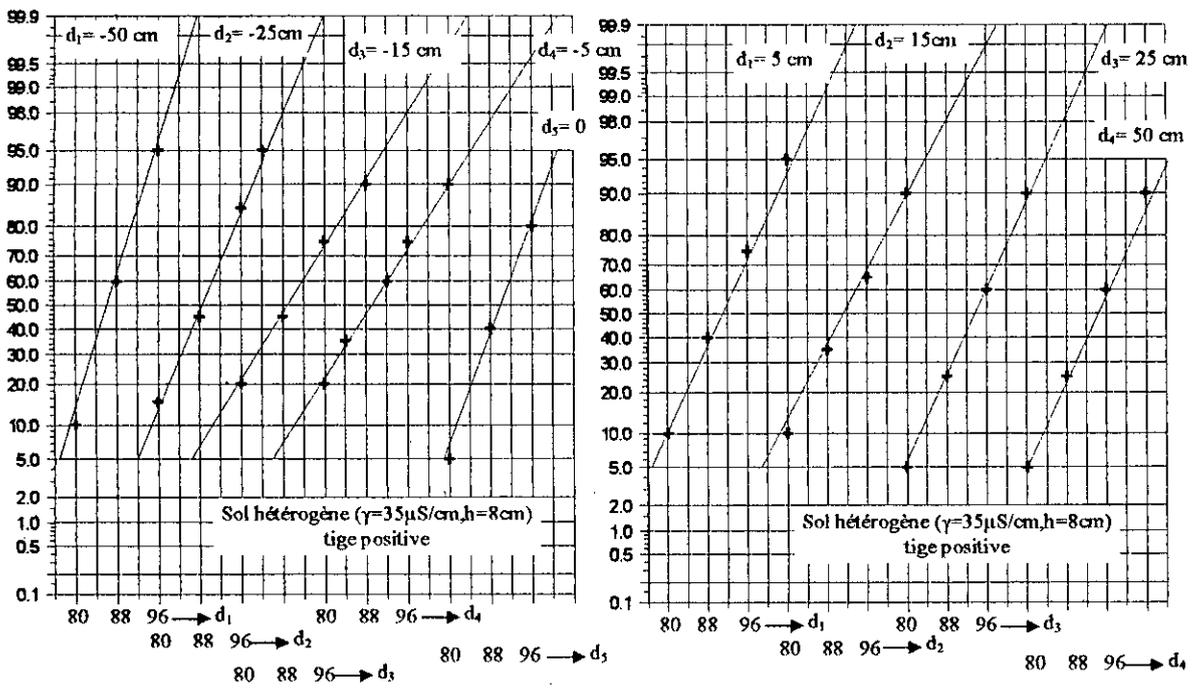


(b)

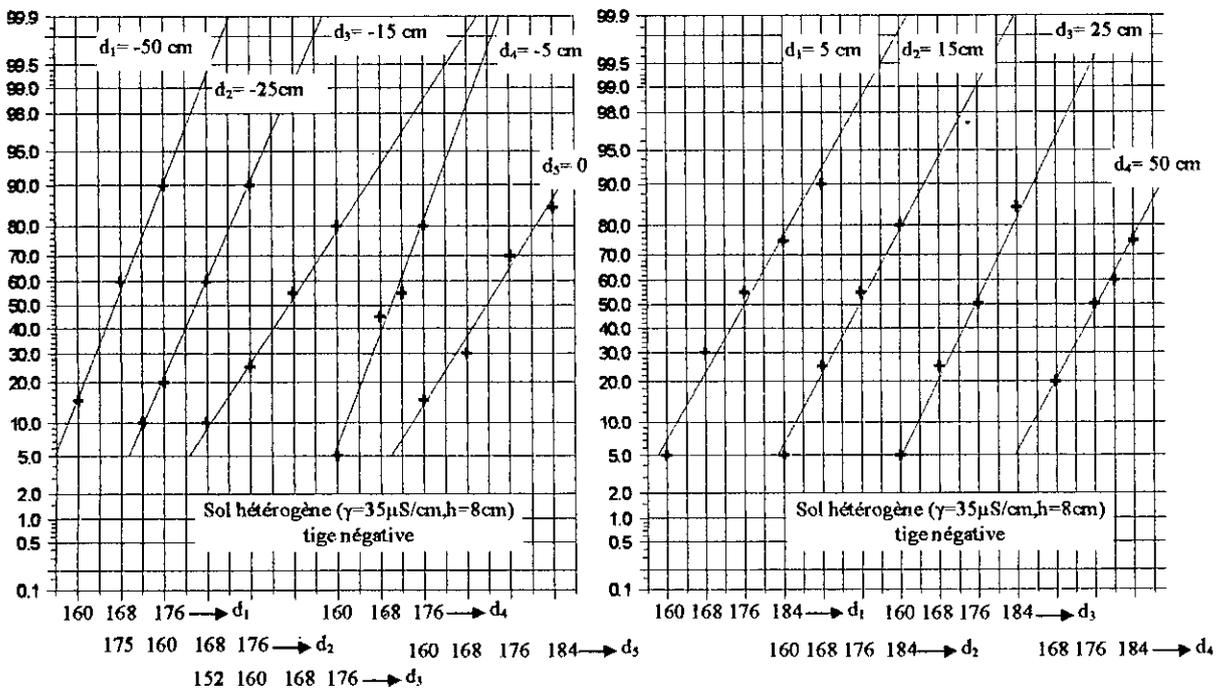
Figure A.16.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=35\mu S/cm, h=4cm$ ).

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.



(a)

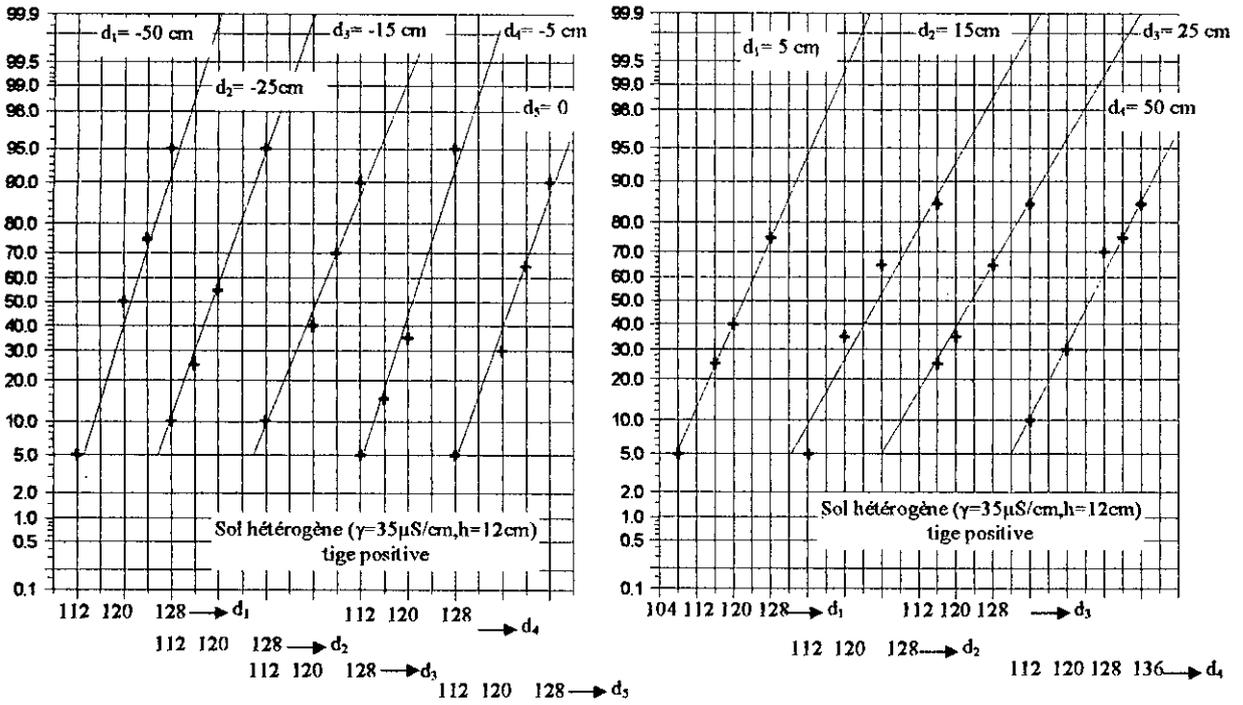


(b)

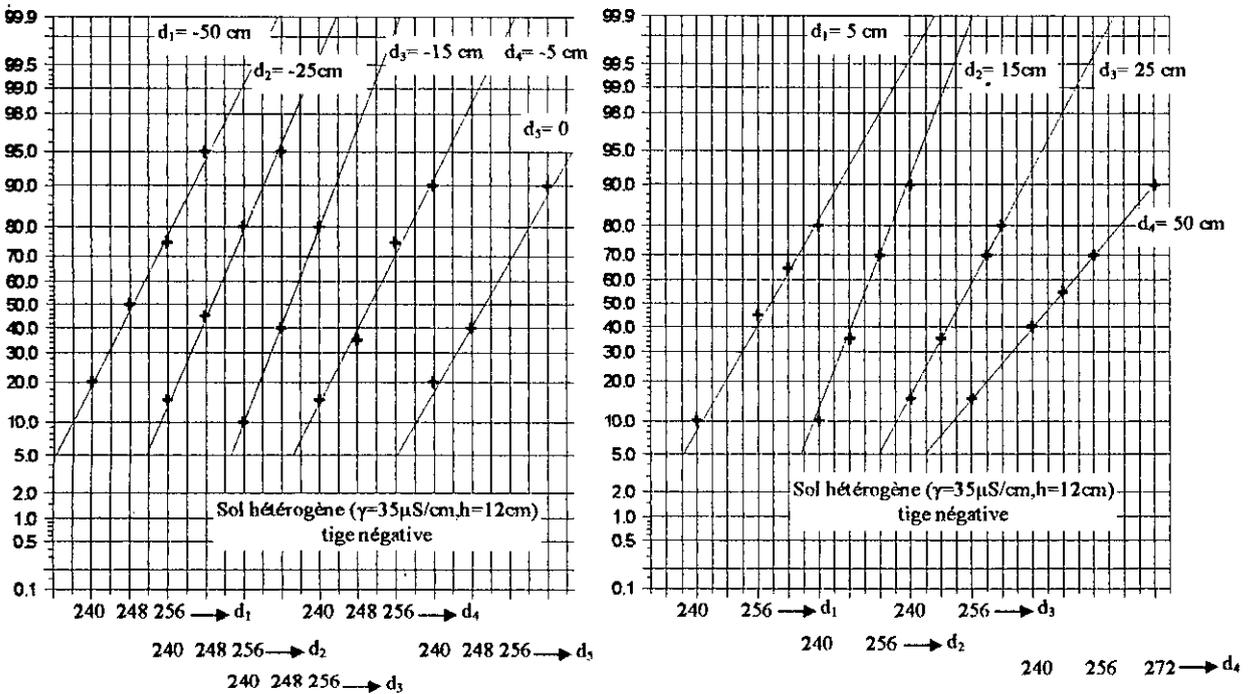
Figure A.17.-  $P_A = f(U_{Cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma = 35 \mu\text{S/cm}$ ,  $h = 8 \text{ cm}$ ).

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.

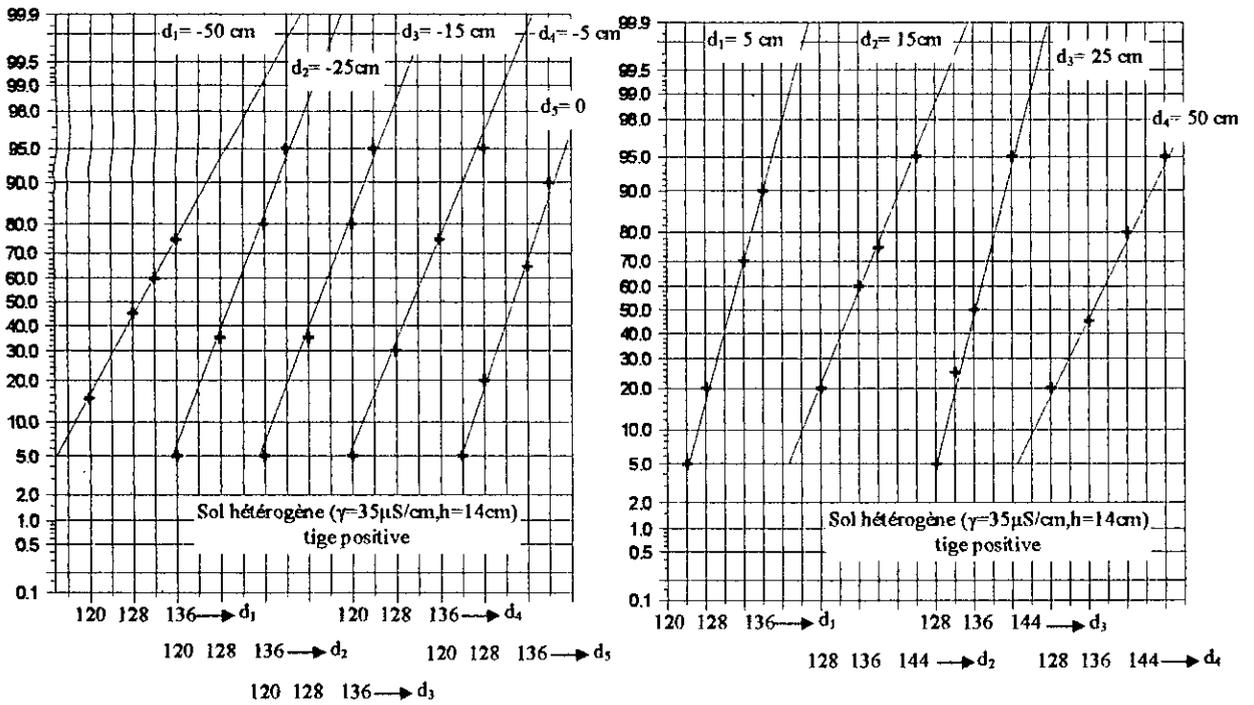


(a)

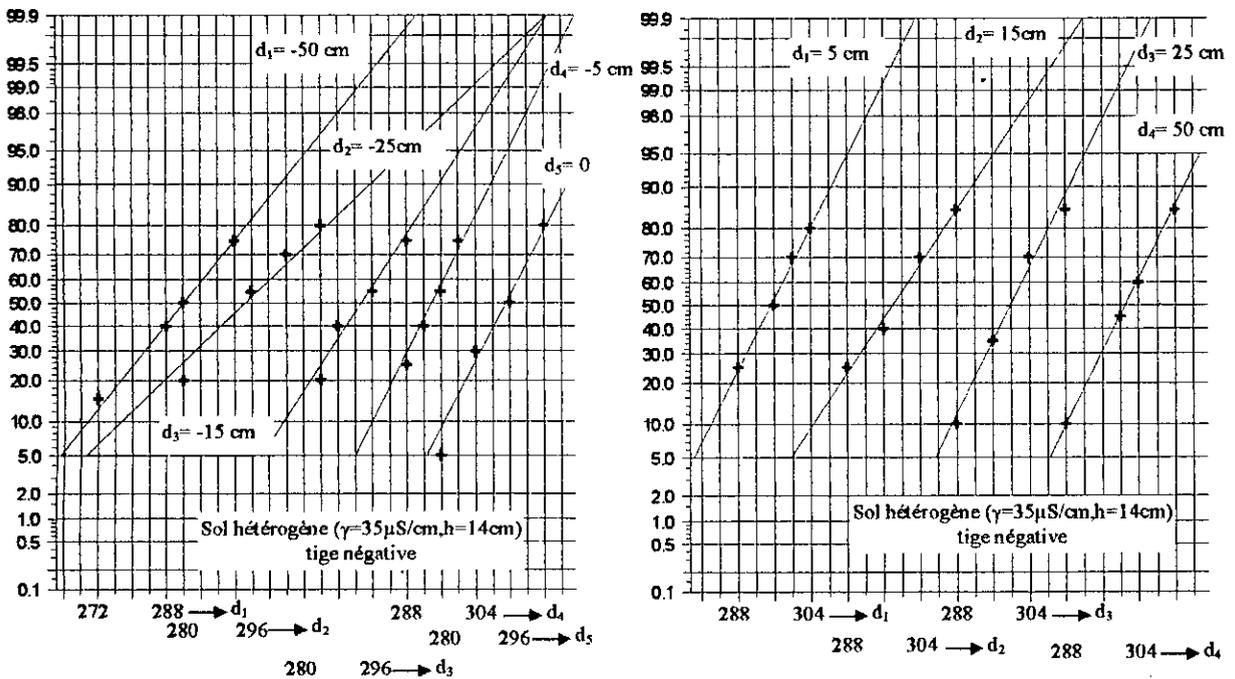


(b)

Figure A.18.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma = 35 \mu\text{S/cm}$ ,  $h = 12 \text{ cm}$ ).  
 (a)- Tige positive.  
 (b)- Tige négative.



(a)

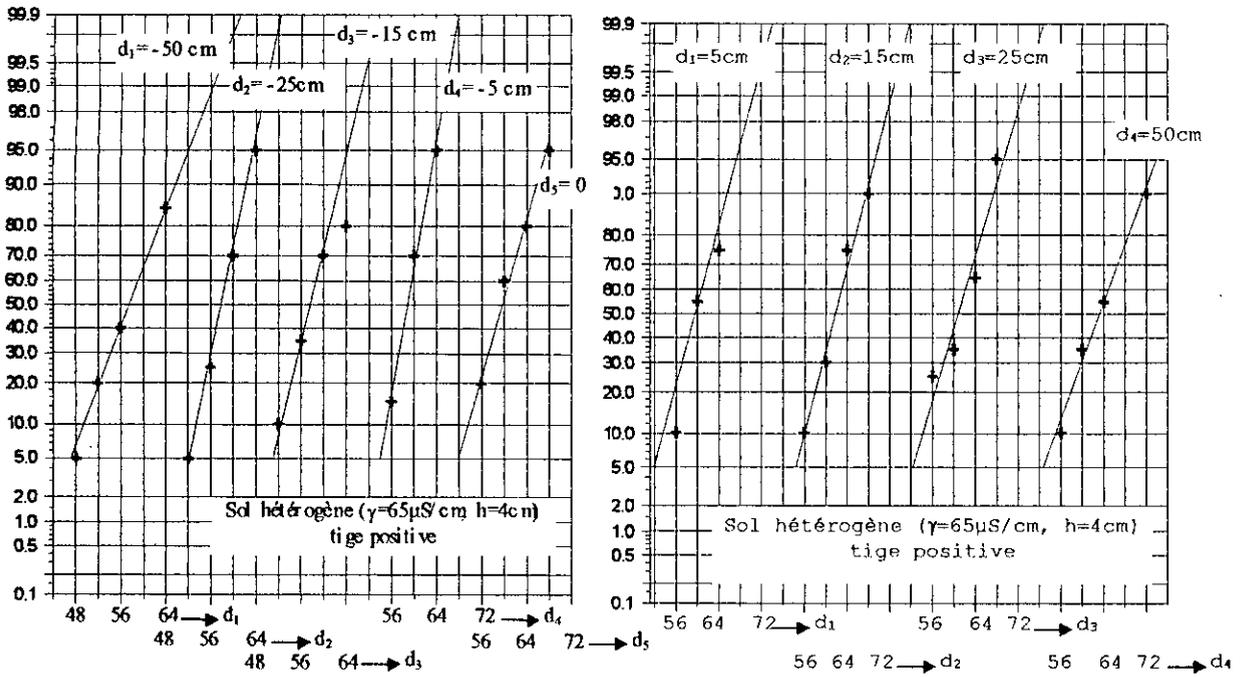


(b)

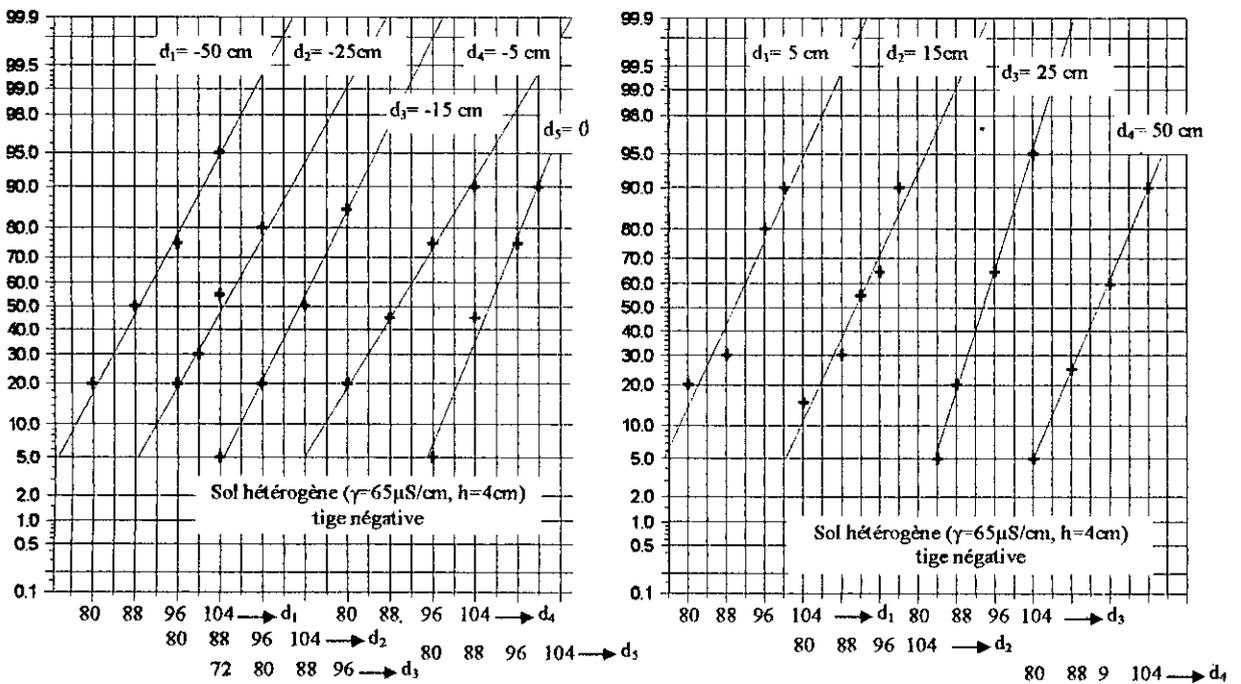
Figure A.19.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=35\mu\text{S/cm}, h=14\text{cm}$ ).

(a)- Tige positive.

(b)- Tige négative.



(a)

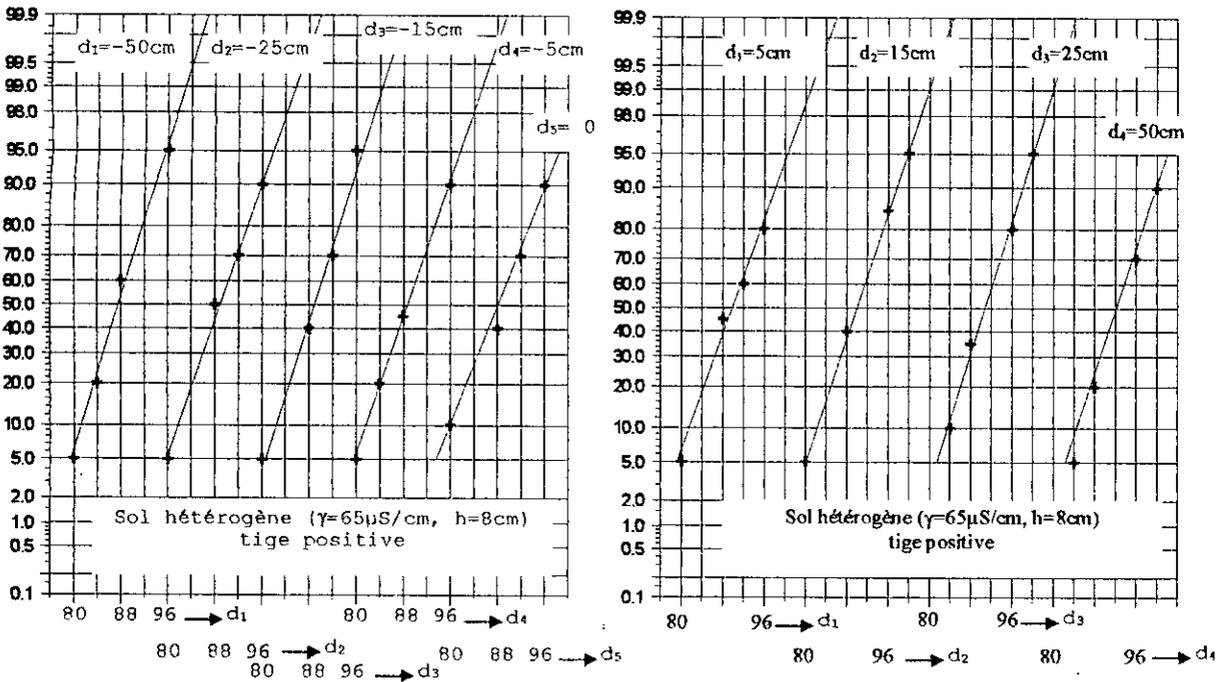


(b)

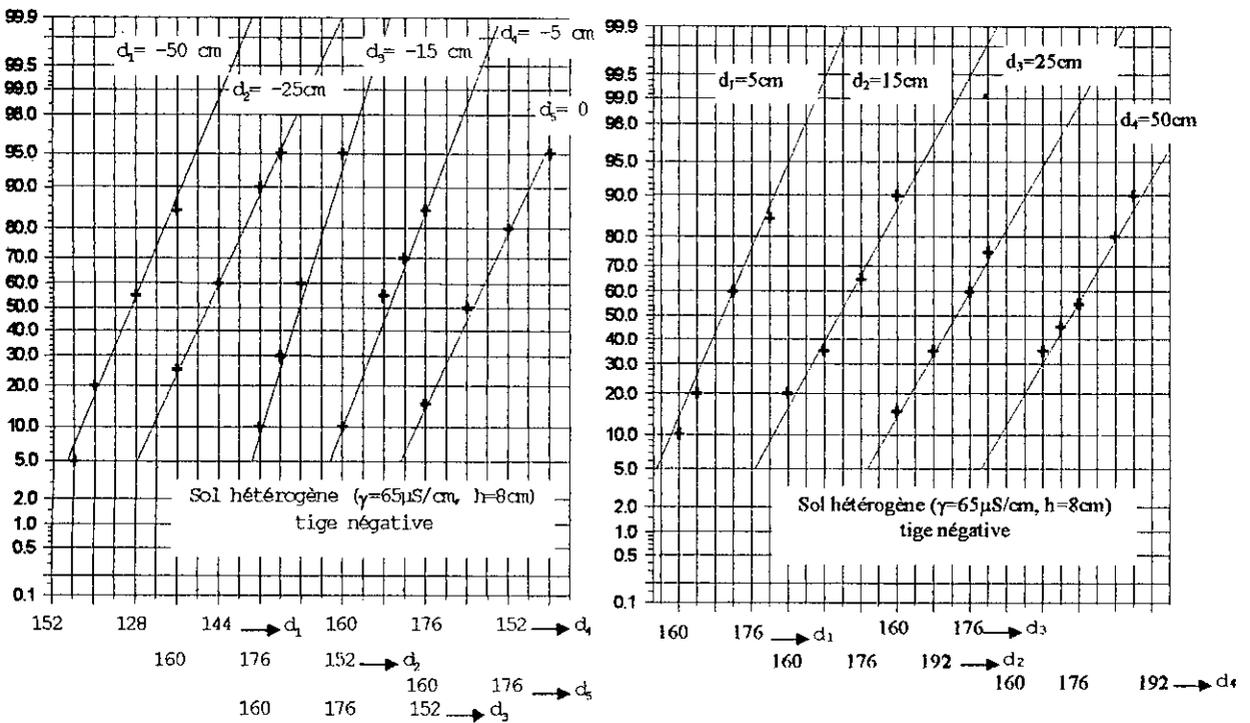
Figure A.20.-  $P_A = f(U_{\sigma T})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=65\mu\text{S/cm}$ ,  $h=4\text{cm}$ ).

(a)- tige positive.

(b)- tige négative.

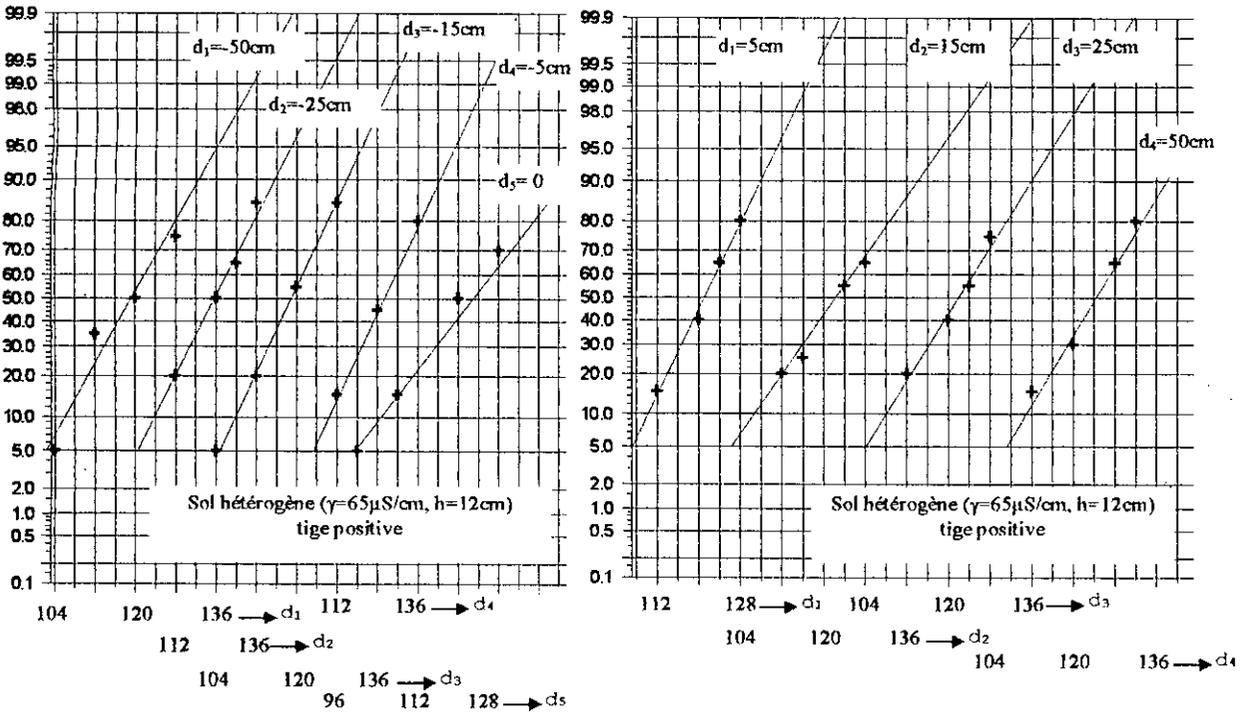


(a)

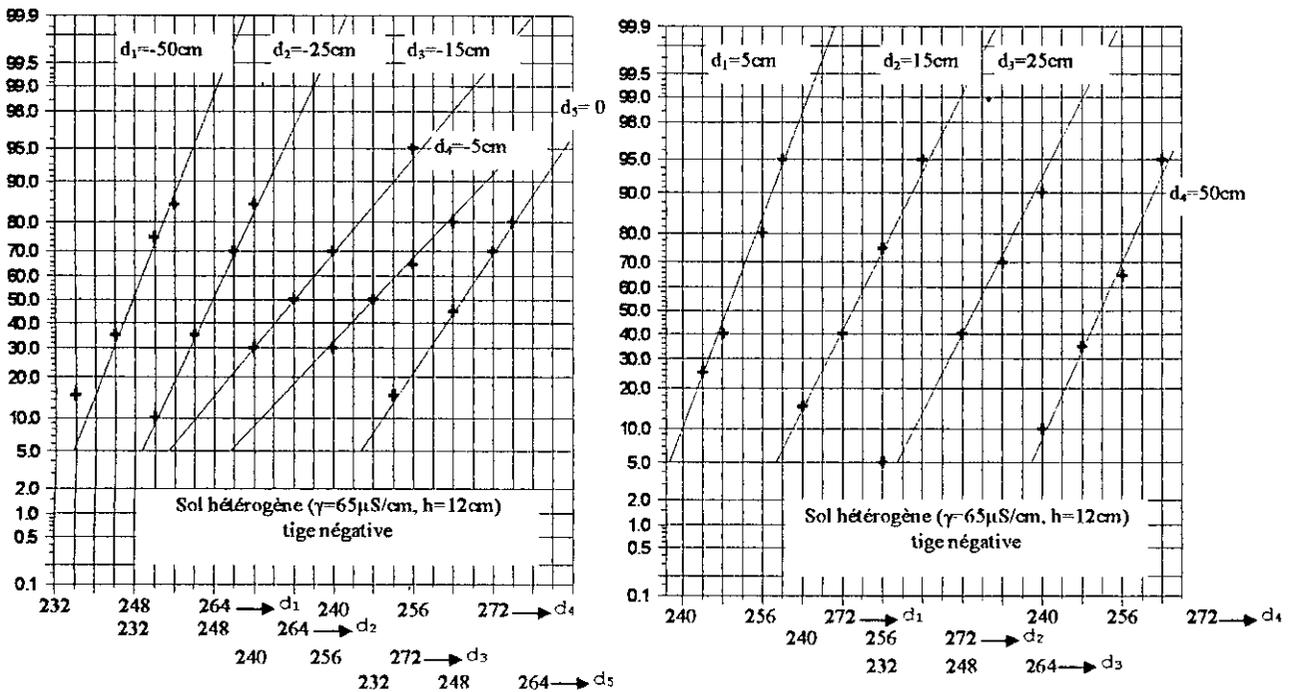


(b)

Figure A.21.-  $P_A = f(U_{\alpha})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=65\mu\text{S/cm}$ ,  $h=8\text{cm}$ ).  
 (a)- tige positive.  
 (b)- tige négative.



(a)

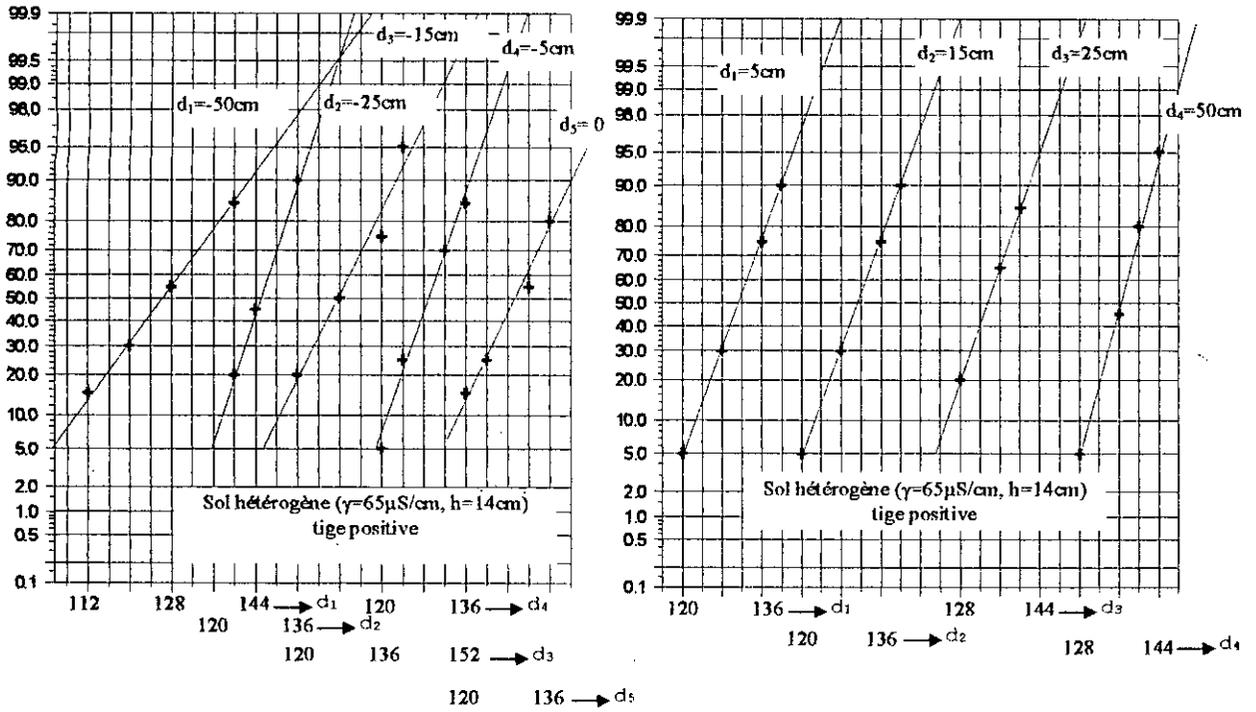


(b)

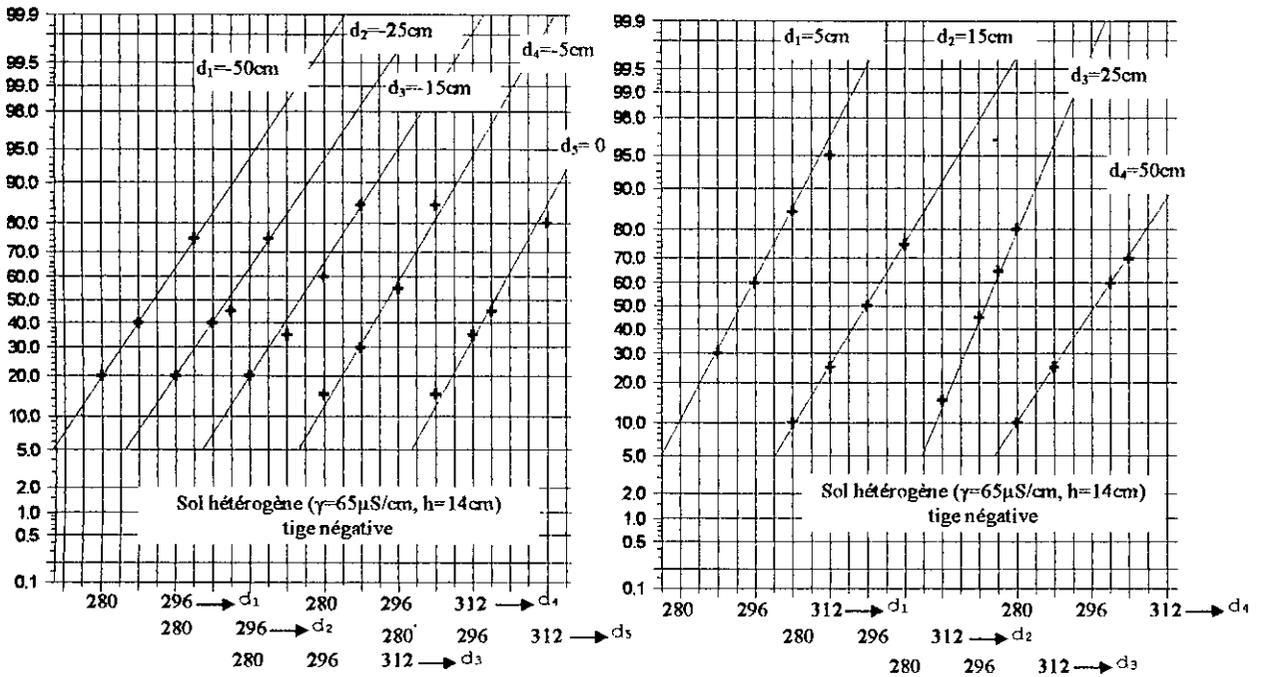
Figure A.22. –  $P_A = f(U_\sigma)$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=65\mu\text{S/cm}$ ,  $h=12\text{cm}$ ).

(a)- tige positive.

(b)- tige négative.



(a)

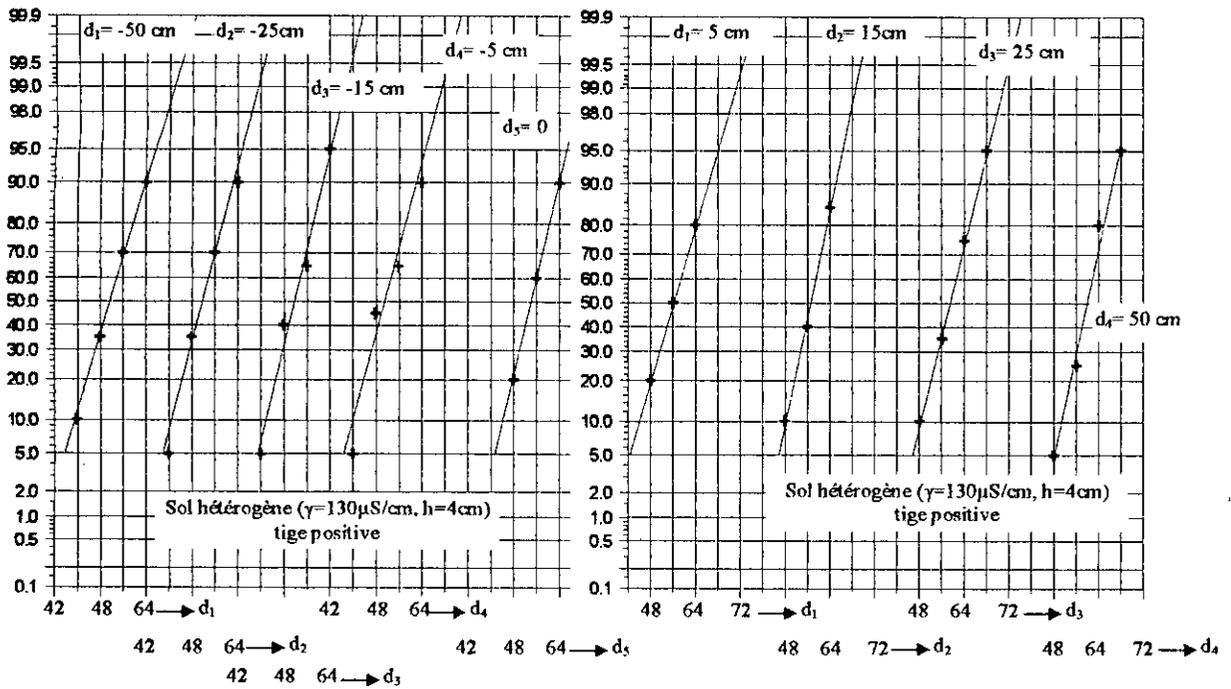


(b)

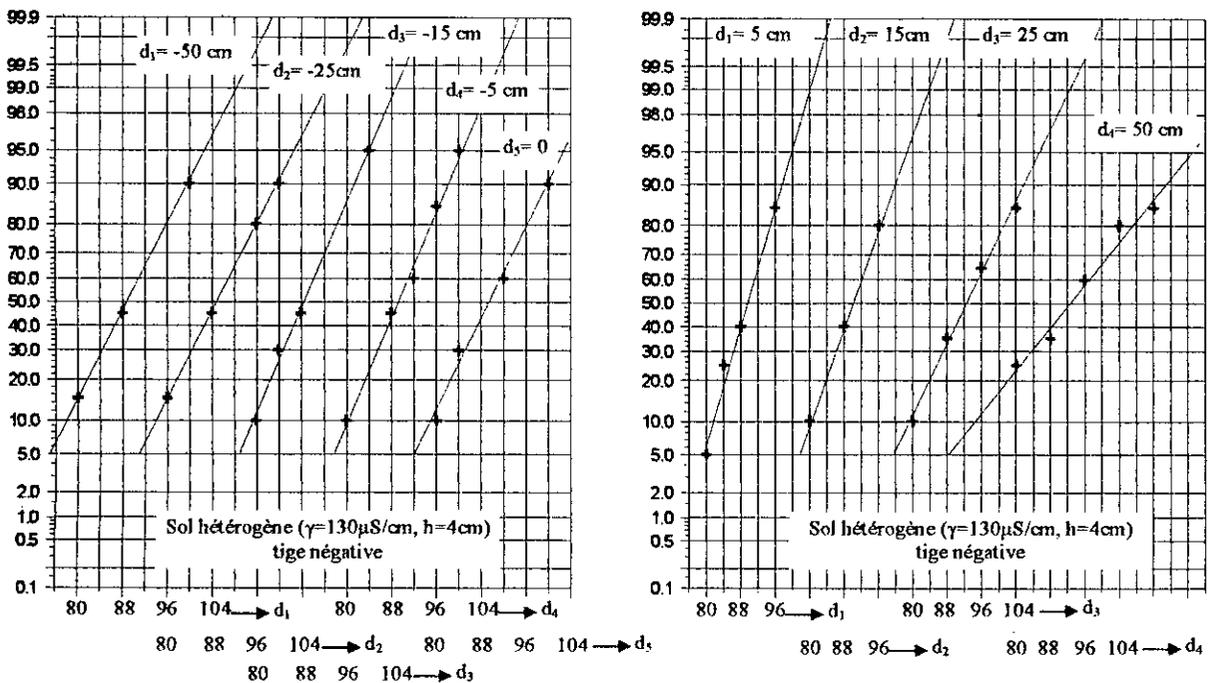
Figure A.23. –  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=65\mu\text{S/cm}$ ,  $h=14\text{cm}$ ).

(a)- tige positive.

(b)- tige négative.



(a)

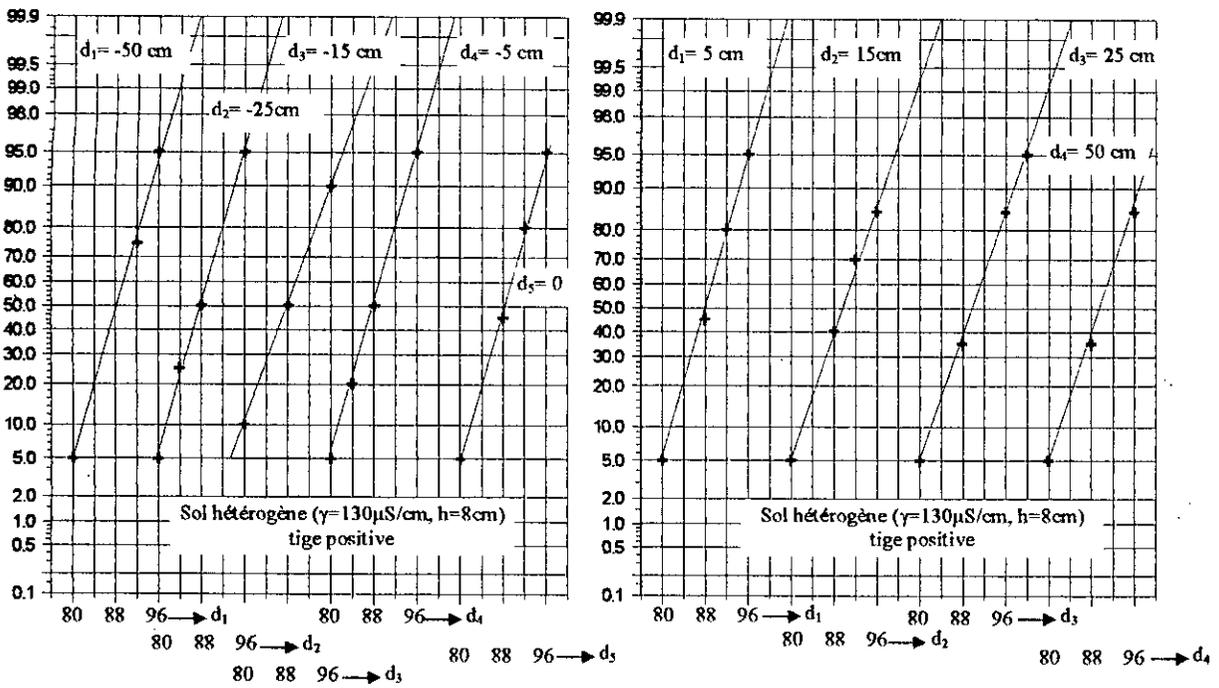


(b)

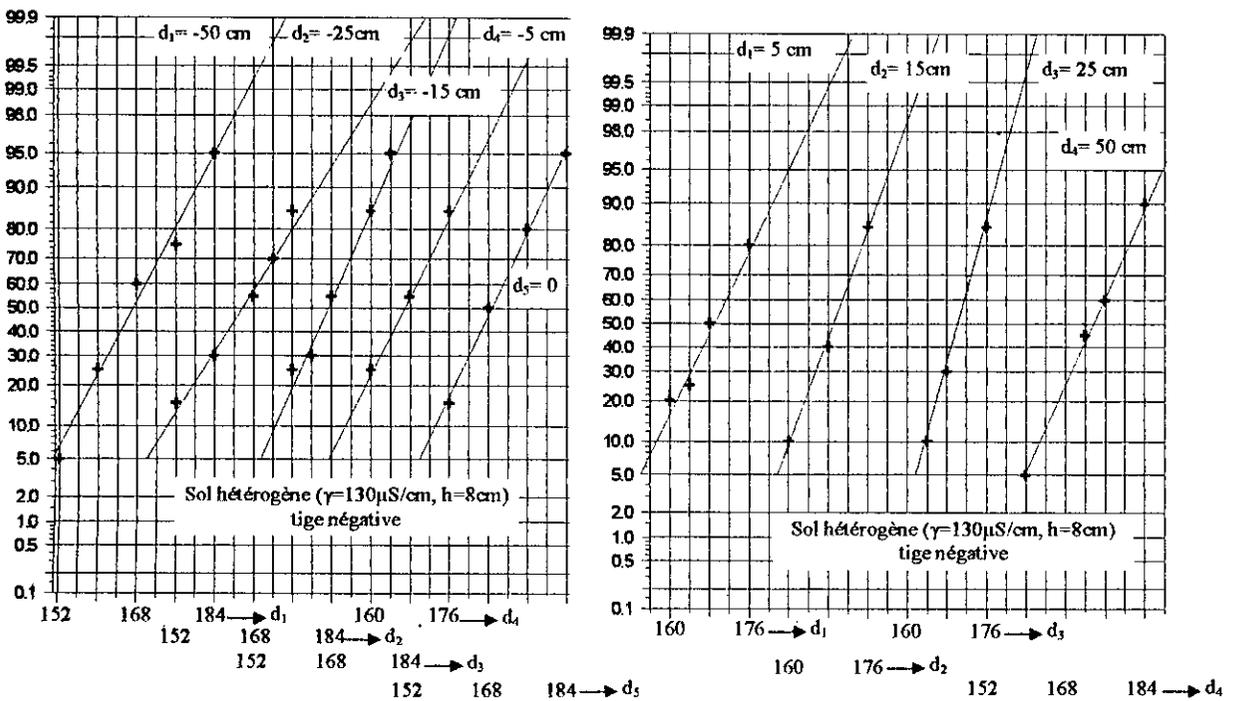
Figure A.24.-  $P_A = f(U_\alpha)$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=130\mu\text{S/cm}$ ,  $h=4\text{cm}$ ).

(a)- tige positive.

(b)- tige négative.



(a)

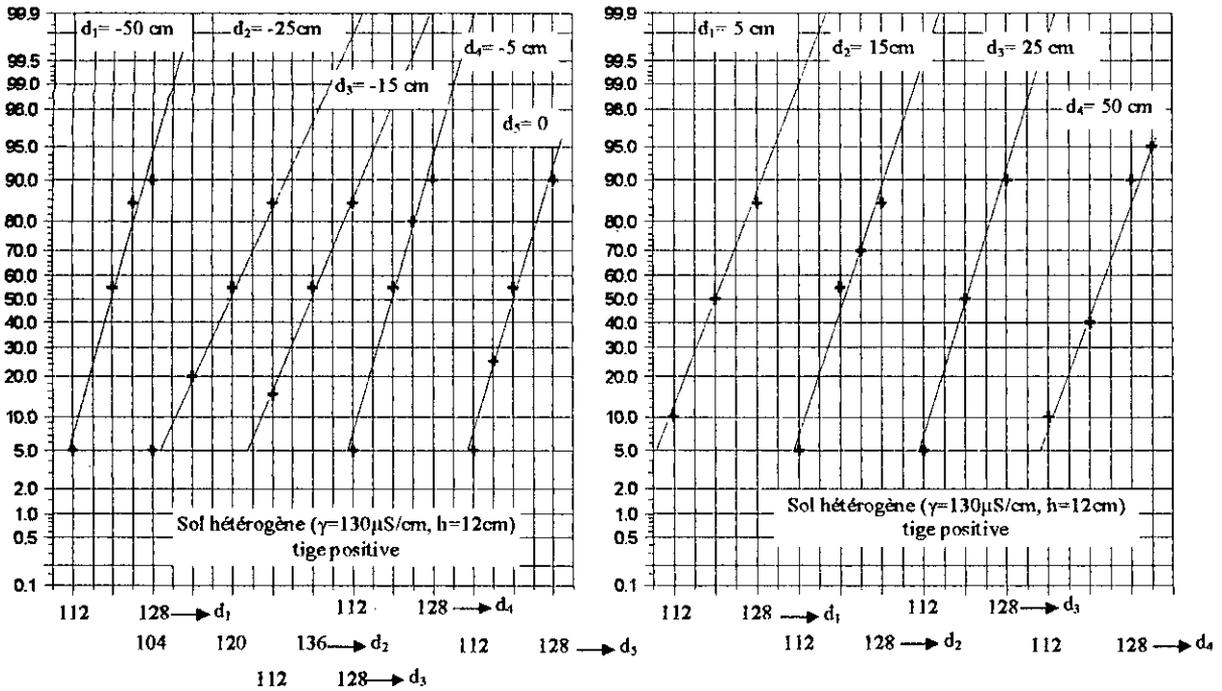


(b)

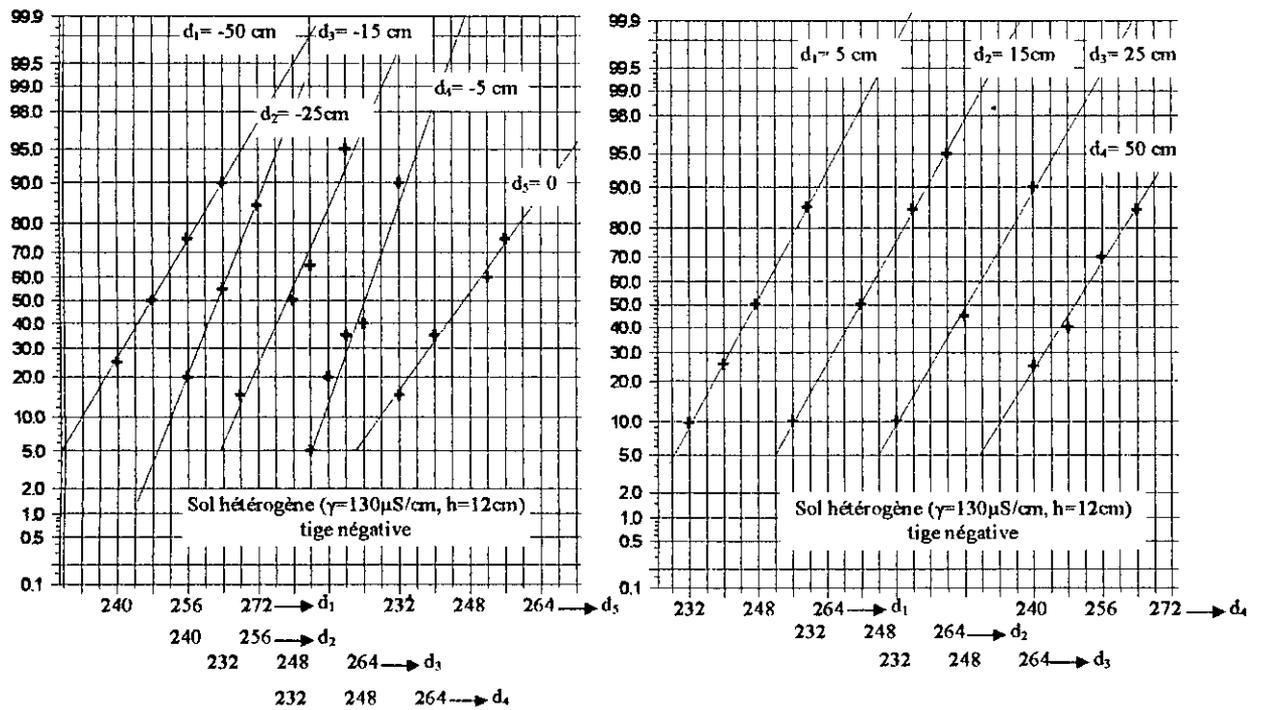
Figure A.25 –  $P_A = f(U_\sigma)$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma = 130 \mu\text{S/cm}$ ,  $h = 8 \text{ cm}$ ).

(a)- tige positive.

(b)- tige négative.



(a)

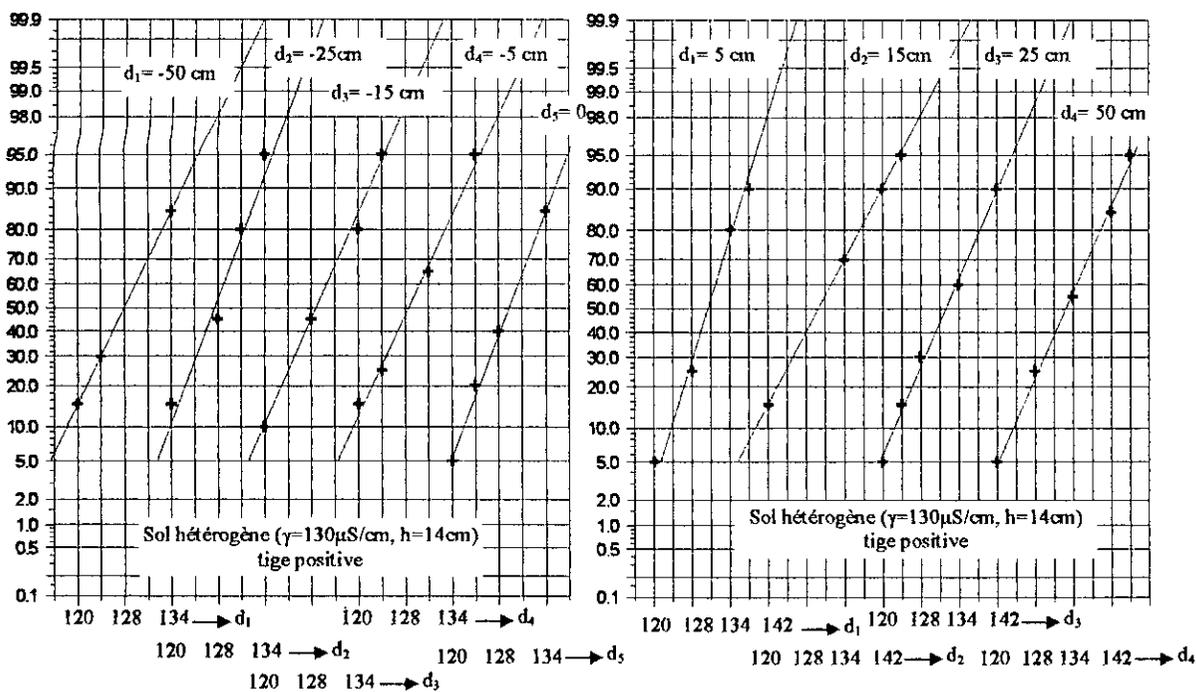


(b)

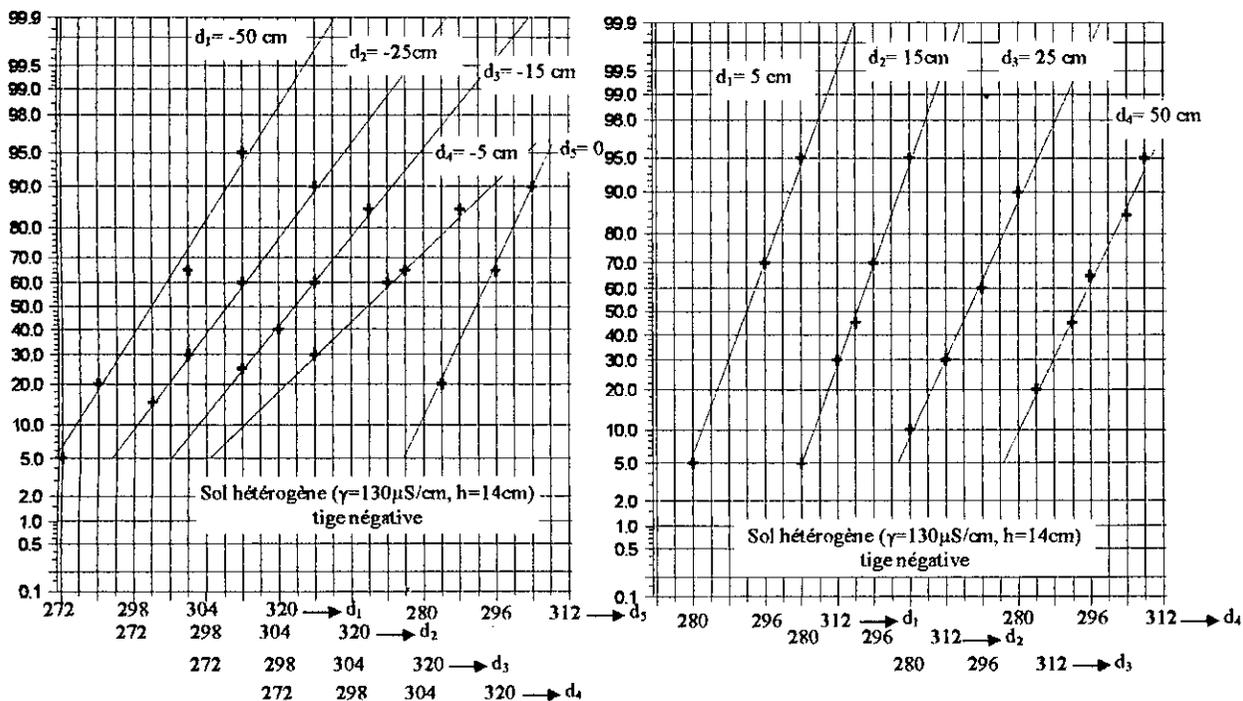
Figure A.26.-  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma = 130 \mu\text{S/cm}$ ,  $h = 12 \text{ cm}$ ).

(a)- tige positive.

(b)- tige négative.



(a)



(b)

Figure A.27. –  $P_A = f(U_{cr})$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=130\mu\text{S/cm}$ ,  $h=14\text{cm}$ ).

(a)- tige positive.

(b)- tige négative.

## A.II L'écart type dans le cas du sol hétérogène

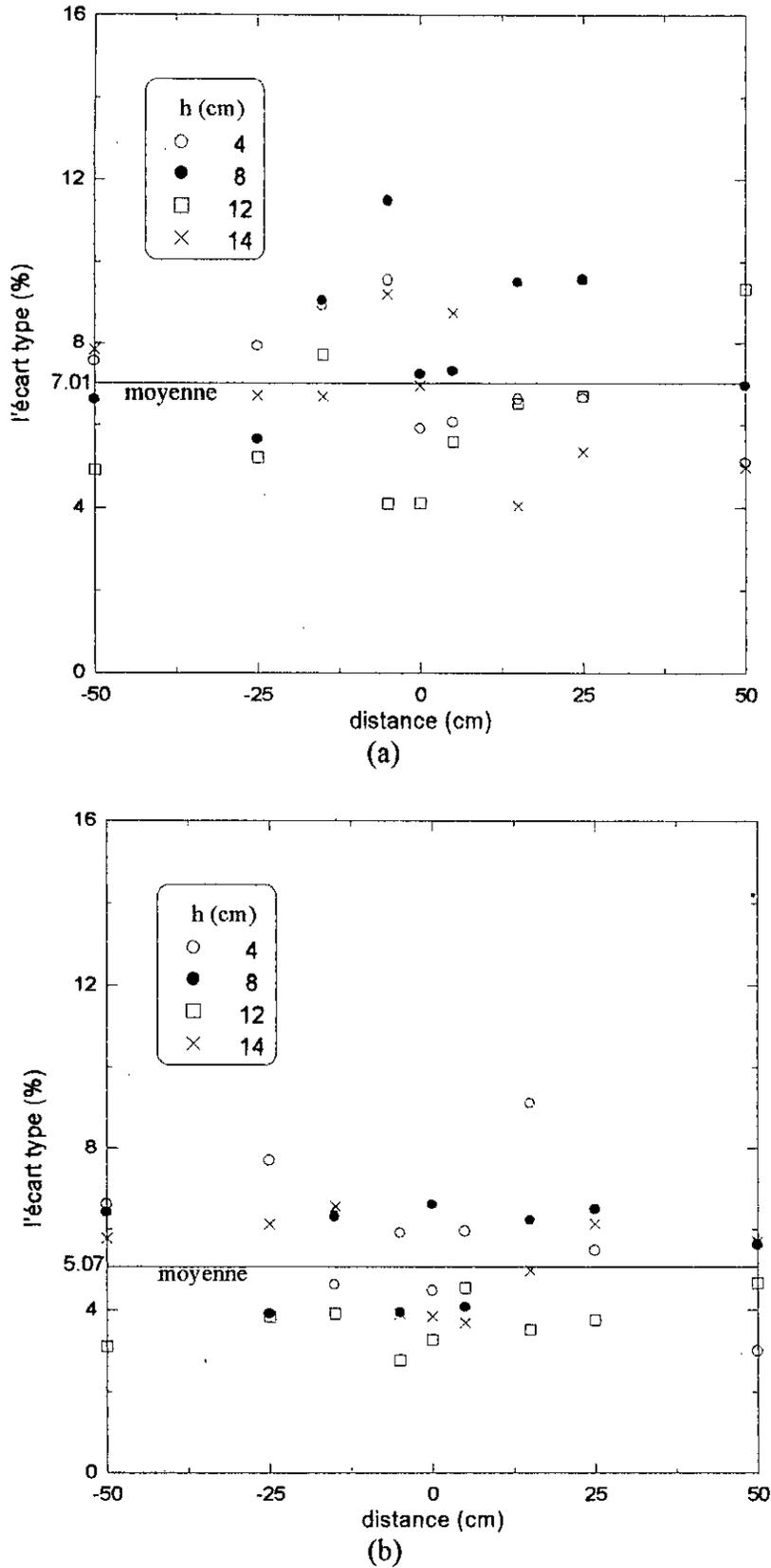


Figure A.28. – L'écart type en fonction de  $d$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma = 8 \mu\text{S/cm}$ )  
 (a)- tige positive.  
 (b)- tige négative.

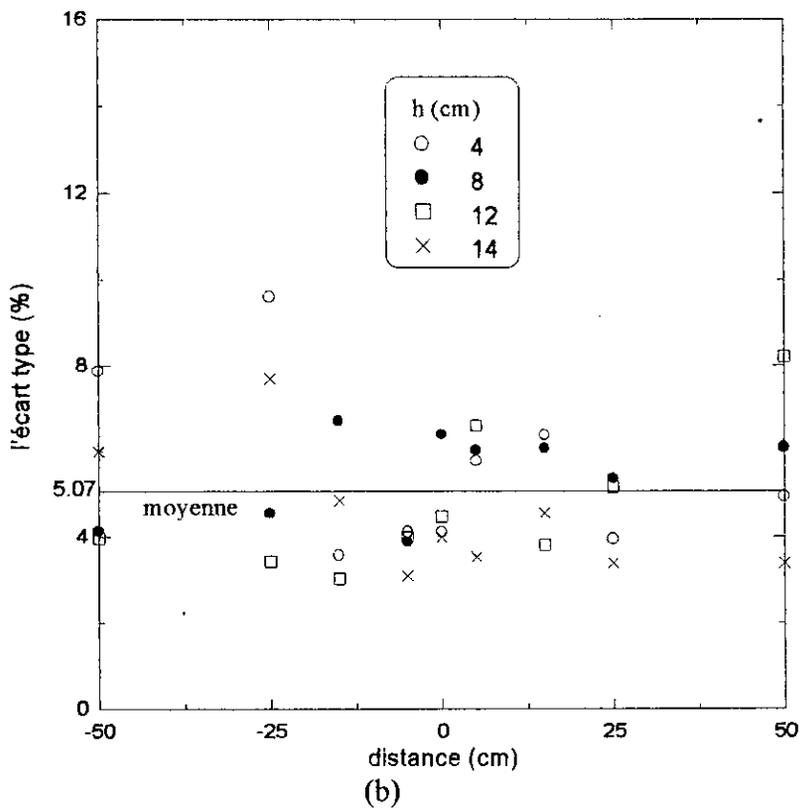
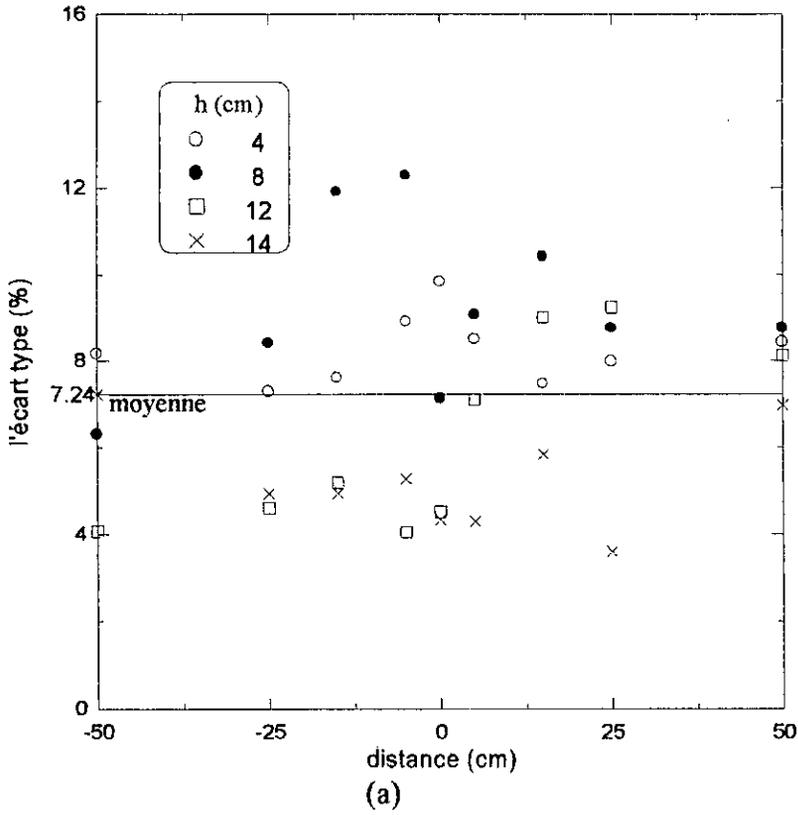


Figure A.29. – L'écart type en fonction de  $d$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=35\mu\text{S}/\text{cm}$ )  
 (a)- tige positive.  
 (b)- tige négative.

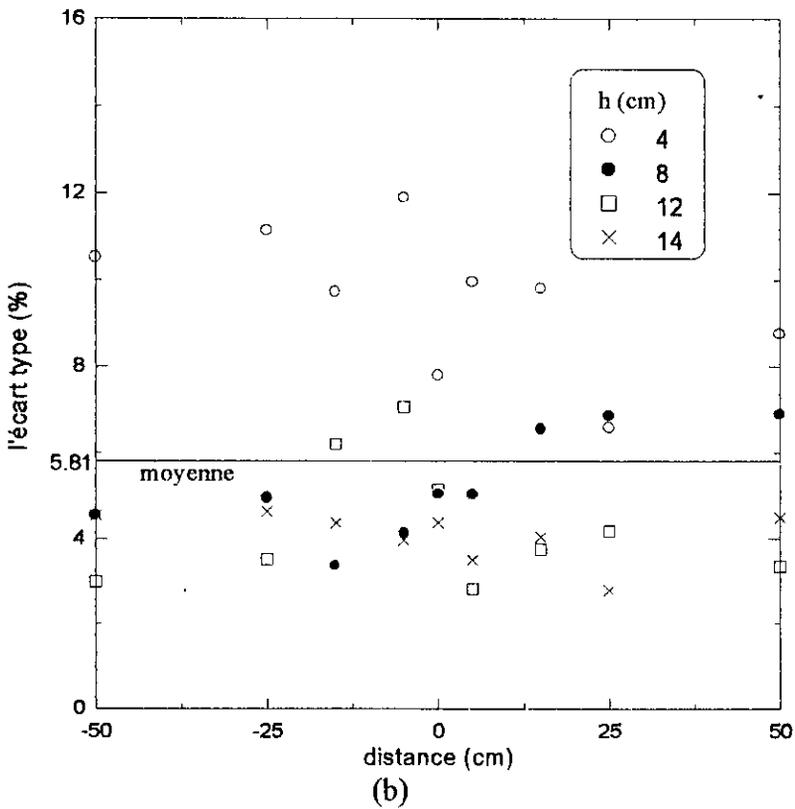
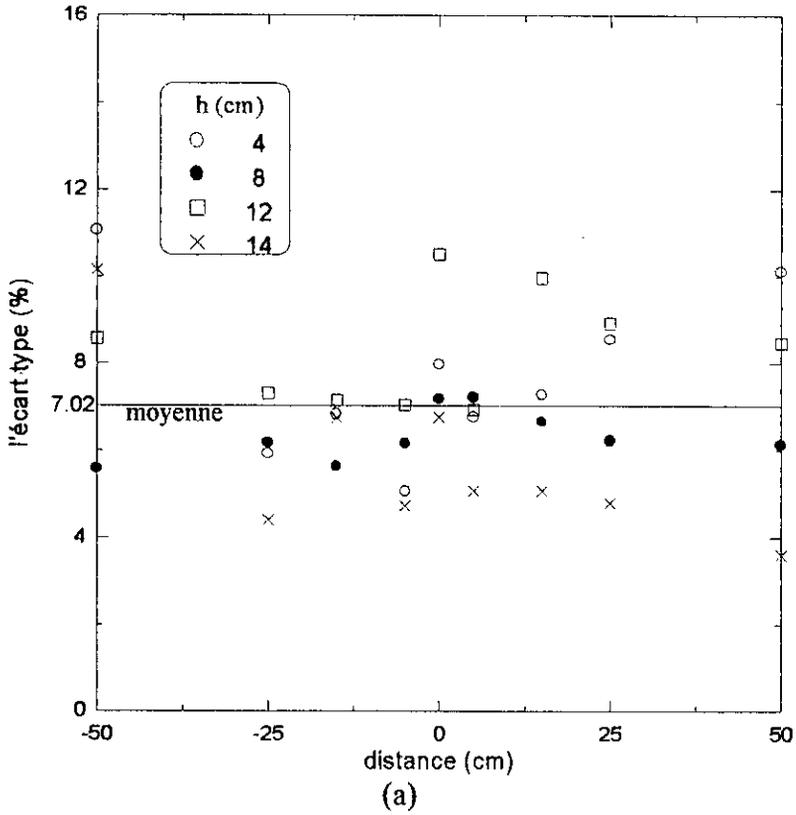


Figure A.30. – L'écart type en fonction de  $d$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=65\mu\text{S/cm}$ )  
 (a)- tige positive.  
 (b)- tige négative.

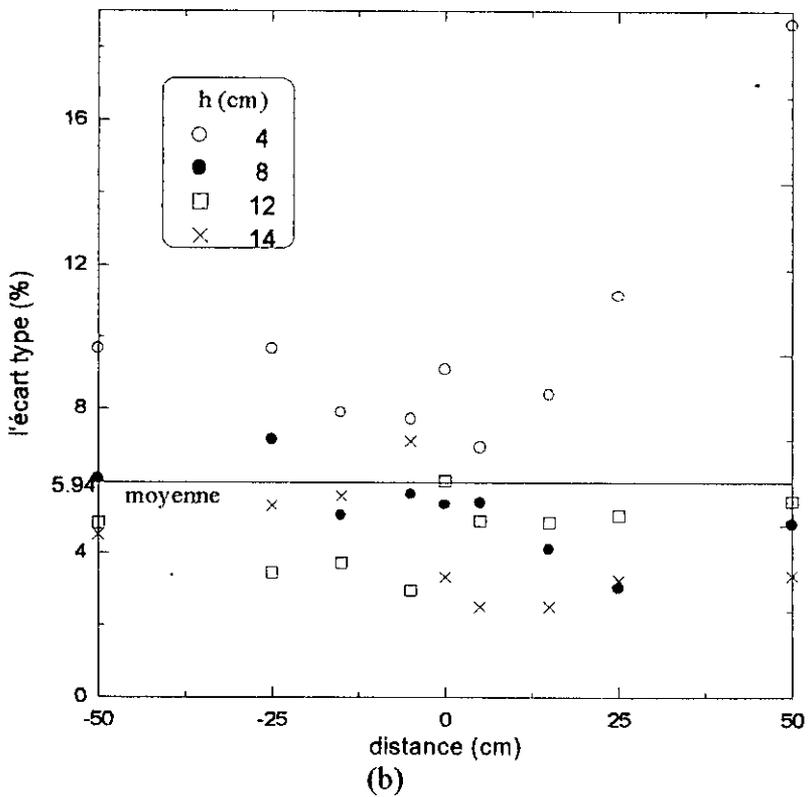
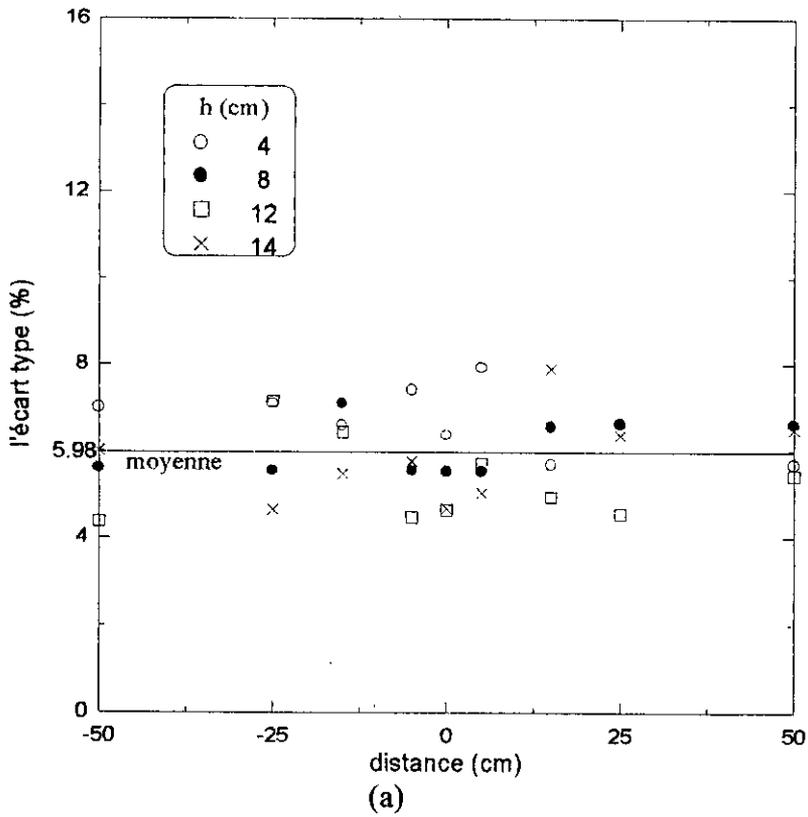


Figure A.31.- L'écart type en fonction de  $d$  dans le cas du sol hétérogène ( $\gamma=130\mu\text{S}/\text{cm}$ )  
 (a)- tige positive.  
 (b)- tige négative.

### **A. III Conditions atmosphériques**

Durant les essais nous avons enregistré les intervalles de fluctuations des conditions atmosphériques suivants :

- Température : de 12°C à 29°C .
- Pression : de 761 mmHg à 773 mmHg .
- Humidité : de 55% à 89% .