

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Influence des Ecrans Isolants
sur la Tension de Décharge
Disruptive à 50 Hz, des Intervalles
d'Air Pointe-Plan.*

Proposé par :
A. BOUBAKEUR

Etudié par :
Md BOUTLENDJ

Dirigé par :
A. BOUBAKEUR



PROMOTION : Juin 1984

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

Qu'il me soit permis de remercier mon promoteur :

- //)onsieur A. BOUBAKEUR, pour avoir dirigé ce mémoire, et pour tous les précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer durant tout le semestre d'études.

Je remercie également Mme FERRAS pour son aide au Laboratoire de Haute-Tension.

Mes remerciements vont également à :

-Monsieur EL-OUALI du département de Génie Mécanique.

-Monsieur BELKAID du département d'hydraulique

pour m'avoir facilité certaines tâches.

Je tiens aussi à remercier Mme BENAMEUR et Ahcène SAADI pour m'avoir aidé dans l'élaboration de ce mémoire.

Que tous les professeurs ayant contribué à ma formation trouvent ici ma profonde reconnaissance.



II O M M A I R E

INTRODUCTION

Chapitre 1 : MECANISMES DE L'CHARGE DANS L'AIR

- 1-1-Généralités
- 1-2-Mécanismes élémentaires dans les gaz
- 1-3-Amorçage dans l'air aux faibles (P.a)
- 1-4-Amorçage dans l'air aux grands (P.a)
- 1-5-Amorçage dans l'air en champ non uniforme
 - Système pointe-plan.
- 1-6-Influence des paramètres physiques de l'air.

Chapitre 2 : INFLUENCE DES BARRIERES ISOLANTES SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR.

- 2-1-Généralités
- 2-2-Influence des paramètres définissant la barrière
- 2-3-Influence des décharges superficielles et des décharges partielles sur les diélectriques solides.
- 2-4-Rupture des diélectriques solides
- 2-5-Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'air (système pointe-plan).

chapitre 3 : ESSAIS AU LABORATOIRE DE HAUTE TENSION DE L'E.N.P. (50 Hz)

- 3-1-Equipement de la station d'essais à fréquence industrielle
- 3-2-Essais réalisés et interprétation des résultats.
- 3-3-Influence de la position de la barrière
- 3-4-Influence de la largeur de la barrière
- 3-5-Influence de l'épaisseur de la barrière
- 3-6-Influence de la distance pointe-plan
- 3-7-Equivalence de l'arrangement pointe-barrière-plan.

CONCLUSIONS

INTRODUCTION

Le développement industriel exige de plus en plus une grande consommation d'énergie. Pour faire transiter une puissance électrique élevée, il faudrait utiliser des distances d'isolement importantes, ce qui va engendrer des contraintes du point de vue pratique et économique.

Pour cela, l'un des moyens utilisé pour diminuer ces distances d'un côté, et pouvoir augmenter la tension de l'autre, était l'emploi de barrières isolantes entre les parties sous tension et la terre.

Mais l'utilisation de ces écrans isolants doit être judicieuse, et des travaux détaillés dans ce domaine sont nécessaires.

Notre étude consiste à voir l'influence de barrières isolantes à surfaces propres dans un intervalle d'air pointe-plan sous tension alternative (50 Hz).

Nous avons jugé utile de rappeler d'abord, dans un premier chapitre, les différents mécanismes de décharges dans l'air.

Le second chapitre traitera de l'influence des barrières sur la disruption de l'air, et le troisième chapitre concernera les essais expérimentaux réalisés au laboratoire à haute tension de l'E.N.P., ainsi que l'interprétation des résultats obtenus.

- // H A P I T R E 1 -



1 - MECANISMES DE DECHARGE DANS L'AIR

1-1 - GENERALITES :

L'air est en général un bon isolant. Toutefois, même si ses molécules sont neutres, elles peuvent être soumises incessamment à des agents ionisants extérieurs, tels que les radiations cosmiques, les rayons X ou la radioactivité naturelle.

Ainsi, on voit qu'il existe toujours une possibilité donnant naissance à un certain nombre de charges électriques libres dans le gaz. Ce fait explique que les gaz jouant le rôle d'isolants parfaits sont rares.

On peut néanmoins trouver des gaz dont la conductivité électrique est très réduite.

1-2 - MECANISMES ELEMENTAIRES DANS LES GAZ

Une molécule d'un gaz peut être soumise à différents processus qui changent son état initial.

Parmi ces processus, on rencontre :

a) - L'excitation : C'est le déplacement d'un électron d'une orbite vers une autre orbite supérieure en émettant un photon d'énergie $h\nu$.

L'atome est excité selon le processus suivant :



Où h est la constante de PLANCK, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s, et ν , la fréquence de rayonnement émis.

b) - L'ionisation :

On distingue plusieurs formes d'ionisation :

- L'ionisation par choc entre particules.

Les chocs peuvent être élastiques ou non élastiques.

Dans le premiers cas, l'ionisation n'a pas lieu et les électrons conservent presque toute leur énergie.

Dans le second cas, l'ionisation de l'atome se produit et les électrons perdent leur énergie cinétique.

Pour qu'il y ait ionisation, il faut que cette énergie cinétique soit supérieure ou égale à l'énergie d'ionisation de l'atome bombardé, c'est-à-dire :

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 \geq W_i$$

- La photoionisation : C'est quand, lors d'une réaction entre particules, il y a émission de photons $h\nu$, tel que : $h\nu \geq W_i$

- L'ionisation superficielle : Ce processus a lieu, quand des électrons sont extraits de la cathode. Parmi les causes qui provoquent l'ionisation superficielle, on peut citer :

- La thermo-émission (échauffement du métal).

- L'émission froide (champ intense).

- Photo-émission (rayonnement).

- Bombardement par des molécules, des électrons, ou des ions.

Pendant les différentes phases d'ionisation décrites, on peut aussi avoir le processus contraire qui est la recombinaison électronique; par exemple :



Les mécanismes de décharges dans l'air dépendent de plusieurs paramètres, parmi lesquels, les plus importants sont : la forme des électrodes (distribution du champ), le type de tension appliquée, les distances entre électrodes (a) et la pression du gaz (P), à température ambiante constante.

Dans ce qui suivra, nous présenterons les deux principaux mécanismes de décharges, valables, pour le premier, en champ uniforme et aux faibles ($P.a$) et le second en champ uniforme et aux grands $P.a$ ainsi qu'en champ non uniforme. Nous traiterons par la suite du cas particulier du système pointe-plan.

1-3 - AMORÇAGE DANS L'AIR AUX FAIBLES (P.a).

En champ uniforme, pour le produit (P.a) $\ll 133 \text{ k.Pa.cm}$, il se produit un phénomène de multiplication électronique appelé avalanche.

Ce mécanisme a été expliqué par la théorie de TOWNSEND.

TOWNSEND expliqua le phénomène par le fait qu'un électron libre dans le gaz (ou partant de la cathode), rentre en collision avec une molécule neutre; si l'énergie cinétique de cet électron est au moins égale à l'énergie d'ionisation de la molécule, il se forme alors un ion positif et un électron nouveau. Cet électron créé va à son tour bombarder une molécule neutre, de même, pour l'électron initial, sous l'effet du champ, il réacquiert de nouveau son énergie et va alors rentrer en collision avec d'autres molécules; et ainsi de suite.

Cette première phase d'ionisation, d'après TOWNSEND est appelée processus (α), où α représente le nombre de chocs non élastiques sur un parcours de 1 cm. α est appelé facteur d'ionisation du gaz. Le développement de l'avalanche s'arrête quand le champ n'est pas suffisant pour assurer la multiplication électronique.

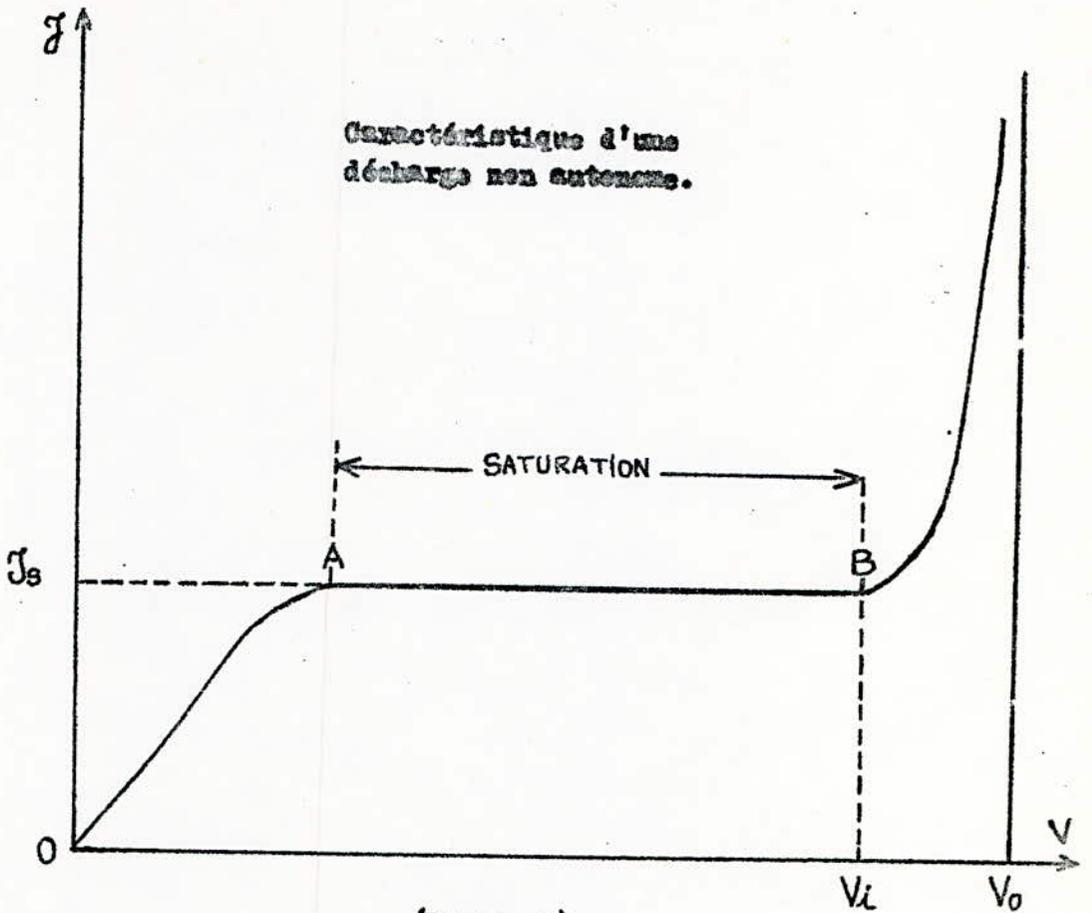
On dit alors que la décharge est non autonome.

Pour que l'avalanche se poursuive, TOWNSEND a défini un deuxième coefficient noté γ . Il représente la probabilité qu'à un ion positif d'extraire un électron de la cathode, alors la décharge autonome apparaît d'après TOWNSEND quand le critère suivant est rempli :

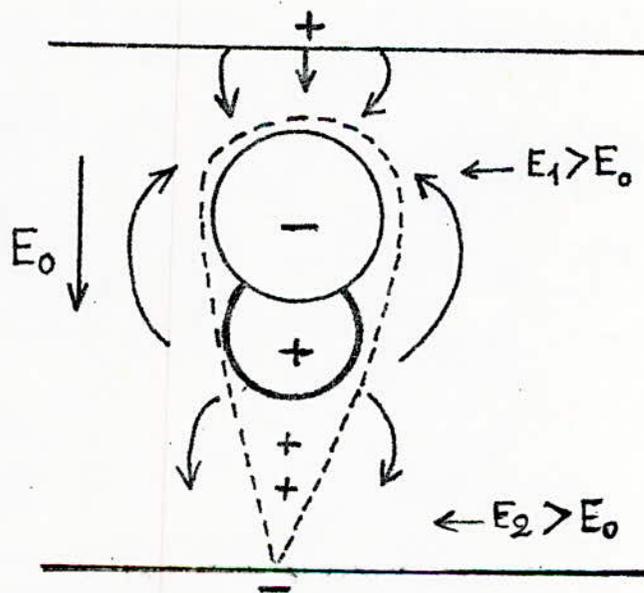
$$\gamma (e^{\alpha d} - 1) \gg 1, \text{ où } d \text{ est la distance entre les électrodes.}$$

Le mécanisme de TOWNSEND est relaté par la figure (1) qui représente la caractéristique courant/tension (9).

La première partie montante (OA) de la courbe correspond au domaine où la loi d'Ohm est valable (donc le nombre d'ions positifs et négatifs est considéré comme constant).



(Figure 1)



(Figure 2)

Influence de la charge d'espace sur l'intensité de champ créé entre deux électrodes planes.

La densité de courant est proportionnelle à la tension. Elle augmente et tend vers une valeur constante J_s qui représente le courant de saturation le long de la partie (AB). La densité de courant, dans l'air, est pratiquement négligeable; elle est de l'ordre de 10^{-6} A/cm².

Quand la tension continue de croître et dépasse la valeur V_i (tension d'ionisation par choc; $V_i = \frac{30 \text{ kV}}{\text{cm}}$ max dans l'air), les électrons se trouvent alors animés d'une vitesse plus grande, le processus γ pouvant avoir lieu, le courant augmente alors très vite à partir du point B, pour tendre vers des valeurs élevées.

La figure 2 représente la distribution spatiale des électrons et des ions dans une avalanche électronique (1); E_0 représente le champ sans charge d'espace. Au niveau de l'anode, on voit que E_0 se superpose à un champ local de même sens créé entre l'anode et la charge négative. On est alors en présence d'un champ résultant E_1 supérieur à E_0 .

Entre les charges positives et négatives, le champ local créé s'oppose à E_0 d'où un champ résultant inférieur à E_0 .

Au niveau de la cathode, le champ local créé se superpose à E_0 et le champ résultant E_2 est supérieur à E_0 . La figure 3 représente le mécanisme de TOWNSEND qui a été favorisé par une série d'avalanches. Le processus décrit en (1-3) se répète plusieurs fois.

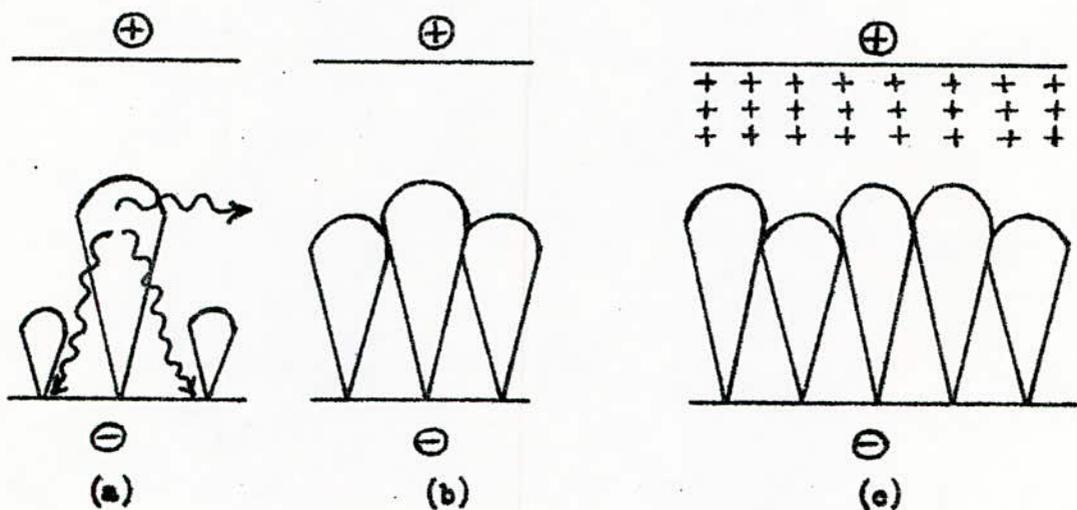
La figure (3a) décrit une avalanche principale suivie de deux petites avalanches secondaires qui prennent naissance au niveau de la cathode; et, en se rejoignant (3b), forment un groupe d'avalanches.

La figure (3c) représente une série d'avalanches groupées, se dirigeant vers l'anode.

1-4 - AMORÇAGE DANS L'AIR AUX GRANDS (P.a)

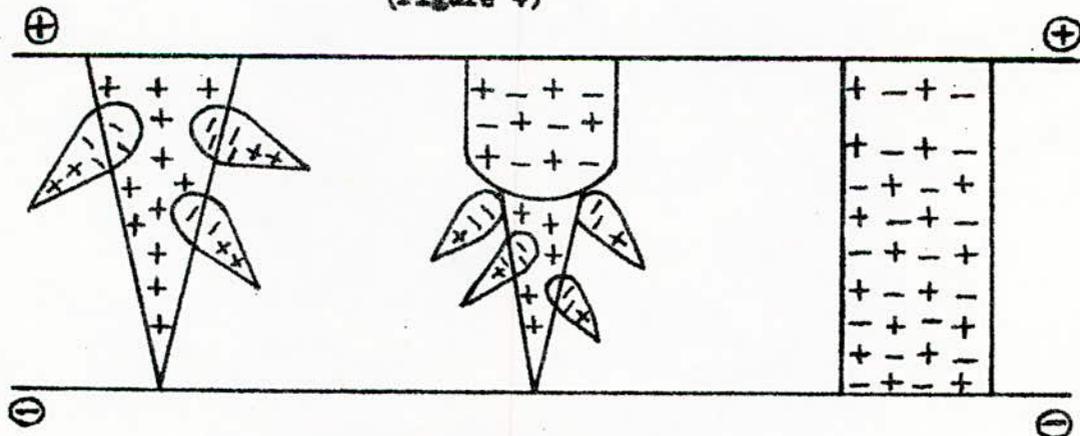
Quand le produit (P.a) est élevé, (P.a > 133 kPa.cm), le processus de décharge est expliqué par la théorie des canaux (streamers) selon REATHER - MEEK et CRAGGS (1). La décharge, que ce soit en champ uniforme ou pas, se produit par l'intermédiaire d'un canal de plasma.

(Figure 3)



MECANISME DE TOWNSEND (1)
Amerçage par une série d'avalanches.

(Figure 4)



MECANISME DES STREAMERS
SELON MEER ET CRAGGS

Le plasma est un gaz extrêmement ionisé, porté à des températures très élevées (quelques milliers de degrés Celcius).

La figure 4 explique les différentes phases de la formation du canal.

En premier lieu, on observe une avalanche principale appelée "avalanche mère" entre les deux électrodes. A cette avalanche ayant pris naissance à la cathode, il se produit des ramifications secondaires de petites avalanches à ses flancs. Celles-ci sont dues aux électrons libres, lesquels, au lieu de se diriger vers l'anode, se voient attirés par la charge d'espace positive qui leur est proche. Ils se trouvent alors animés d'une vitesse très grande (car $\vec{v} = b \cdot \vec{E}$; or le champ est très élevé dans le domaine où les électrons sont attirés). On observe alors la formation d'un canal de plasma dans le domaine où les avalanches sont groupées et où le champ électrique est intense. Ce canal se développe en progressant vers la cathode, jusqu'à ce qu'il relie les deux électrodes sous forme d'étincelle finale. Le temps de formation de l'étincelle est de l'ordre de $0,1 \mu S$ (15).

1 - 5 AMORÇAGE DANS L'AIR EN CHAMP NON UNIFORME (SYSTEME POINTE-PLAN)

1-5-1 - GENERALITES :

Le mécanisme de décharge dans l'air en champ non uniforme est le même que celui décrit en (1-4). Dans ce chapitre, nous nous pencherons particulièrement sur le cas du système pointe-plan. En effet, c'est dans ce système que la tension disruptive de l'air est la plus faible et que l'influence de la polarité de l'électrode pointue peut être observée. Pour divers auteurs, les phénomènes conduisant à l'amorçage dans un tel système, sont dus à une charge spatiale de signe positif qui se forme au niveau de l'électrode pointue indépendamment de la polarité de l'électrode et cela, au moment où l'intensité de champ provoquant l'ionisation est atteinte. La présence de cette charge déforme d'une manière plus ou moins importante, la répartition du champ résultant.

1-5-2 - CAS OÙ LA POINTE EST POSITIVE :

Il faut qu'une tension suffisante soit maintenue entre les électrodes pour qu'un premier électron se dirigeant vers la pointe, entre en collision non élastique avec des molécules neutres et par conséquent, active le processus α . Une fois ces conditions remplies, on peut observer au voisinage de la pointe un effet de couronne, ensuite des aigrettes et finalement, la décharge principale partant vers la cathode (figure 7).

La figure 5 représente la variation de l'intensité de champ dans l'intervalle entre les électrodes avec et sans charge d'espace.

Avec charge d'espace, au niveau de la pointe, le champ se trouve diminué et, au niveau du plan, au contraire, le champ est augmenté.

1-5-3 - CAS OÙ LA POINTE EST NEGATIVE :

Dans ce cas, sous l'impact d'ions positifs, l'émission d'électrons se fait à partir de la pointe et se trouve même favorisée. L'effet couronne apparaît pour une tension plus faible sous l'influence de la charge d'espace positive que quand la pointe est positive (figure 8). Par contre, le champ est augmenté au niveau de la pointe et diminué au niveau du plan (figure 6), toujours sous l'influence de la charge d'espace positive.

La tension d'amorçage avec une pointe négative est deux à trois fois plus élevée qu'avec une pointe positive (figure 8).

On peut alors tirer les deux résultats suivants :

- 1°) - La tension d'apparition de l'effet couronne (U_0), pour une pointe positive est supérieure à celle de la pointe négative et cela, pour un même intervalle d'air pointe-plan. C'est-à-dire :

$$U_0^+ > U_0^-$$

- 2°) - La tension disruptive (U_d), pour une pointe positive, cette fois est inférieure à celle de la pointe négative (toujours pour un même intervalle d'air pointe-plan) :

$$U_d^+ < U_d^-$$

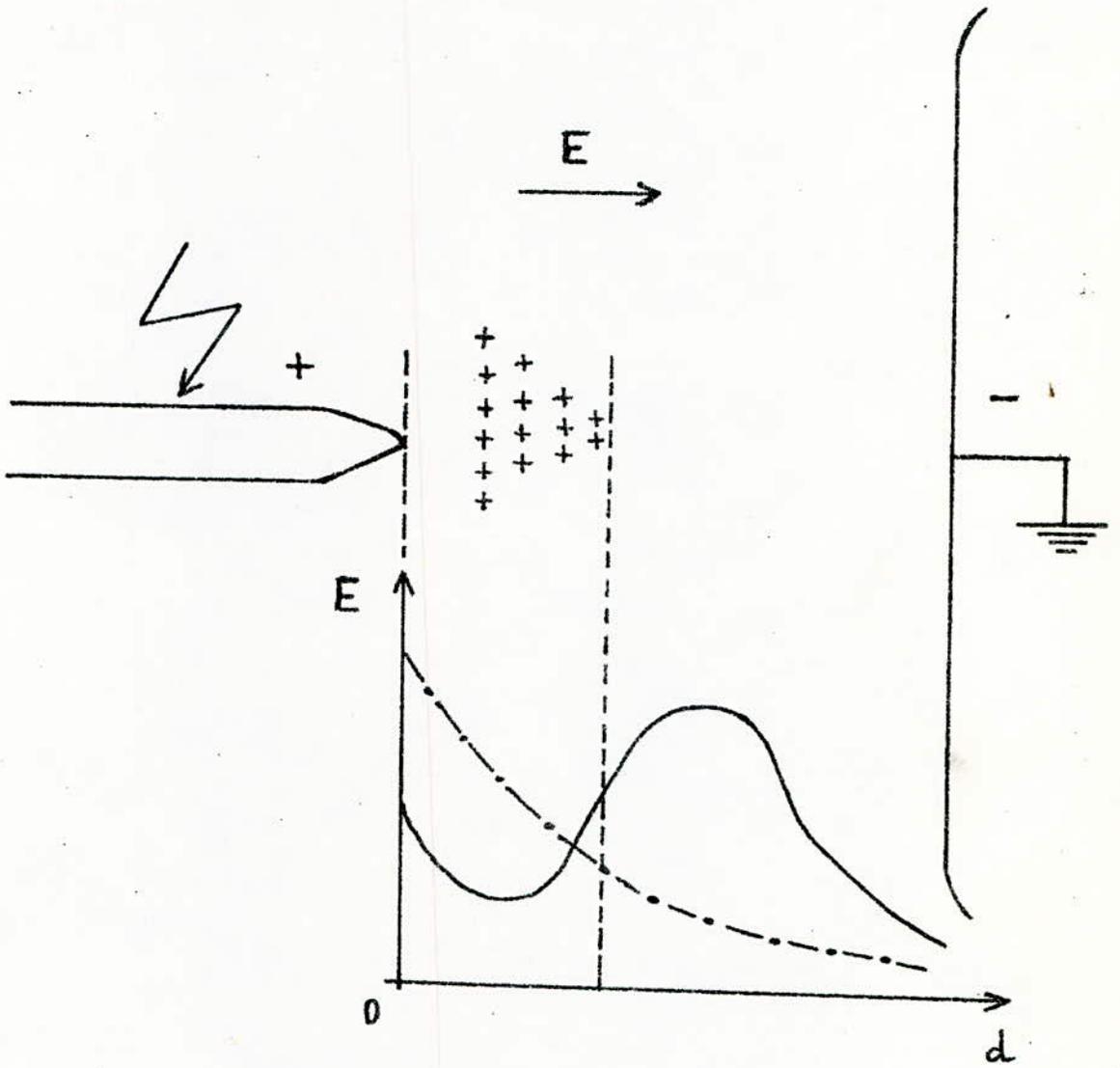
1-5-4 - CAS OÙ LA POINTE EST SOUS TENSION ALTERNATIVE.

L'étincelle a lieu dans ce cas, quand la tension passe par son maximum positif et l'arc est toujours coupé quand cette tension s'annule. Selon ROTH, pour $30 \text{ cm} \leq d \leq 250 \text{ cm}$, à fréquence industrielle (60 Hz):

$$U_d = 4,75.d \text{ (kV) max.}$$

(d est la distance entre la pointe et le plan).

(Figure 5)

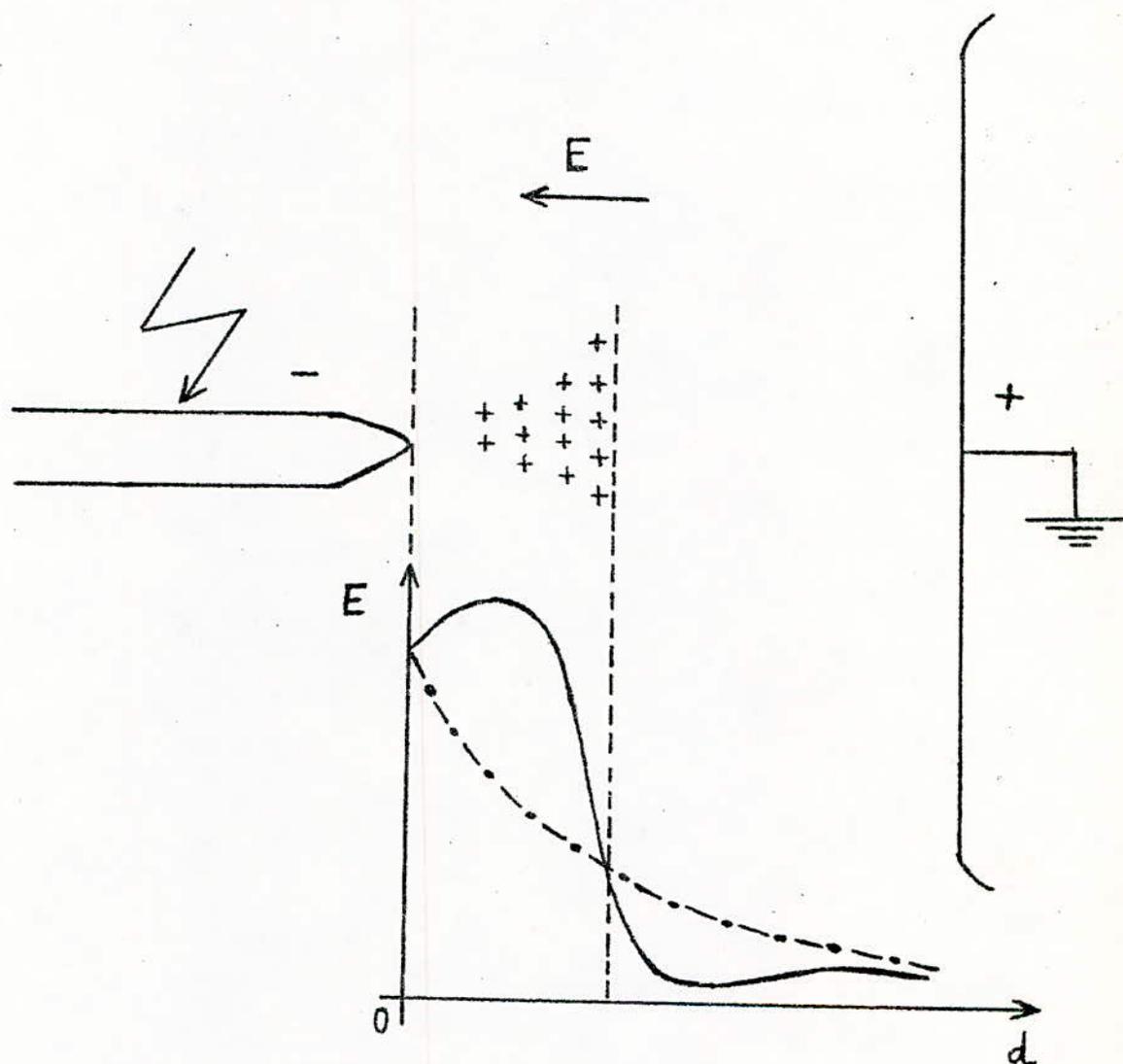


---•--- Champ sans charge d'espace.

————— Champ avec charge d'espace.

Variation du champ électrique (E) avec et sans charge d'espace dans un intervalle d'air pointe positive-plan.

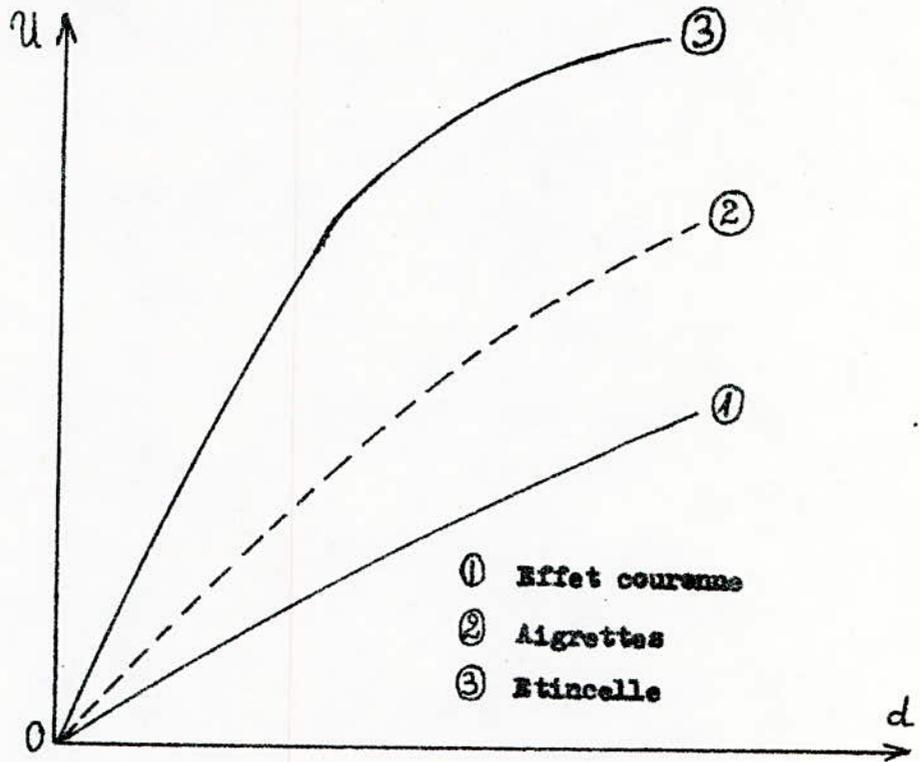
(Figure 6)



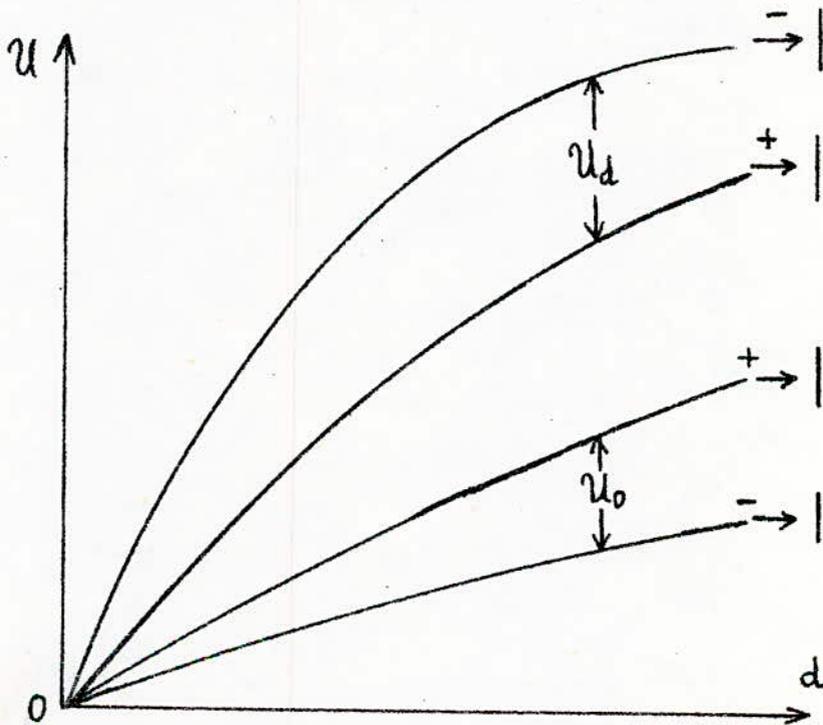
----- Champ sans charge d'espace.

————— Champ avec charge d'espace.

Variation du champ électrique (E) avec et sans charge d'espace dans un intervalle d'air pointe négative-plan.



(Figure 7)



(Figure 8)

Influence de la polarité des électrodes.

1-6 - INFLUENCE DES PARAMETRES PHYSIQUES DE L'AIR.

Parmi les propriétés physiques de l'air conditionnant le mécanisme d'évolution des décharges, et ayant une grande influence sur sa rigidité diélectrique, on trouve la densité relative et l'humidité.

L'influence de la densité entraîne implicitement celles de la température et de la pression, vu leur dépendance mutuelle :

$$\delta = f (P, t).$$

L'augmentation de δ a tendance à faire croître la rigidité diélectrique de l'air.

Pour l'humidité, dans les champs uniformes, son influence est pratiquement négligeable (12). Cette influence peut être prise en considération quantitativement en utilisant les équations approchées ou les courbes expérimentales.

Les molécules d'eau se trouvant dans le gaz, captent les électrons et forment ainsi des ions négatifs lourds. Ainsi donc, l'humidité de l'air freine le mécanisme d'ionisation par collision, et par conséquent, fait augmenter la rigidité diélectrique de l'air.

- // H A P I T R E 2 -



2-INFLUENCE DES BARRIERES ISOLANTES SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR.

2-1- Généralités

Etant donné qu'on a un système stratifié, composé de deux diélectriques en série, nous avons préféré relater d'abord en chapitre 1, les différents processus de décharge dans le premier diélectrique (air).

Dans le second chapitre, nous aborderons l'autre diélectrique en série avec le premier (barrière isolante). Nous traiterons d'abord de certains paramètres pouvant avoir une influence importante sur la rupture diélectrique des isolants solides. Ensuite, nous expliquerons les principaux mécanismes de rupture de ces derniers ; et finalement, nous aborderons l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'air dans le système pointe-plan.

2-2-Influence des paramètres définissant la nature de la barrière

Les écrans isolants de natures différentes, n'ont pas tous les mêmes performances du point de vue de l'augmentation de la tension disruptive d'un système d'isolation. Cela est dû au fait que les paramètres définissant les propriétés isolantes d'un matériau varient d'un diélectrique à un autre.

Parmi ces paramètres en trouve :

2-2-1-La résistivité transversale ρ_r :

La résistivité transversale d'un matériau isolant est la résistance d'un élément de ce matériau, de 1cm^2 de section et de 1 cm de long (10).

Elle s'exprime généralement en $\frac{[\Omega \cdot \text{cm}^2]}{[\text{cm}]}$ soit $[\Omega \cdot \text{cm}]$

Cette résistivité détermine le courant de fuite à travers l'isolant. Elle est de l'ordre de 10^{10} à $10^{18} \Omega \cdot \text{m}$.

.../...

Elle varie suivant le degré d'humidité de l'isolant et diminue fortement avec une élévation de température. Une résistivité transversale faible, permet le passage d'un courant de fuite dangereux à travers l'isolation d'un conducteur, ou une pièce d'un appareil sous tension (16).

2-2-2 La résistivité superficielle .

Elle est définie comme étant la résistance de la surface de l'isolant. Elle peut s'exprimer en Ohm par unité de surface, mais est variable et difficile à préciser. Elle dépend du degré d'humidité du milieu ambiant, et de l'état de surfaces de l'isolant (Forme des surfaces et pollution).

La résistivité superficielle détermine les courants de fuite à la surface de l'isolant. L'humidité de la surface due à la condensation de la vapeur d'eau, et les dépôts de pollution, diminuent considérablement la résistivité superficielle.

2-2-3 Constante diélectrique ou permittivité relative (ϵ_r).

Elle est définie généralement comme étant le rapport de la capacité d'un condensateur ayant pour diélectrique, le matériau isolant, à la capacité du même condensateur ayant le vide comme diélectrique.

$$\epsilon_r = C / C_v$$

Elle décroît avec la fréquence, mais n'est influencée par aucune paramètre physique ou chimique.

2-3 INFLUENCE DES DECHARGES SUPERFICIELLES ET DES DECHARGES PARTIELLES SUR LES DIELECTRIQUES SOLIDES.

Les décharges superficielles se produisent à la surface du diélectrique solide. Du point de vue technique, elles sont très nuisibles au matériau car la résistivité superficielle diminue. Pour un certain niveau de tension, les canaux de décharge se produisent selon le mécanisme de ~~REATHER-MEEK~~ et glissent sur la surface de l'isolant pour aller vers l'électrode mise à la terre. Ces différents canaux glissants sur la surface du diélectrique solide sont appelés : décharges glissantes.

En ce qui concerne les décharges internes (décharges partielles), elles apparaissent quant il ya des impuretés ou des vaucoles gazeuses dans le diélectrique solide. Cela entraine la dégradation progressive du diélectrique. ces décharges internes à l'isolant sont appelées : décharges partielles.

2-4-RUPTURE DES DIELECTRIQUES SOLIDES

On appelle rupture, la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ. Parmi les mécanismes fondamentaux relatifs au claquage, on peut définir, le claquage électrique et le claquage thermique. Le premier est de nature électronique. Il est dû à la présence d'électrons capables de se déplacer dans le réseau cristallin du diélectrique.

Le second, résulte de la conductivité du diélectrique. Il survient quand la puissance fournie par le courant au diélectrique est supérieure à la puissance qui peut être dissipée ; c'est à dire, quand l'état de l'isolant devient instable.

La rupture du diélectrique peut être aussi provoquée par les décharges partielles directement liées à la présence de cavités dans le diélectrique. Les décharges partielles peuvent être éliminées en améliorant la technologie relative à l'étude des diélectriques solides, ou en choisissant un matériau réputé résistant aux décharges.

2-4-1-Mécanisme de rupture thermique

La rupture thermique est le résultat d'un déséquilibre thermique. Il est lié aux pertes d'énergie à la suite de mouvements de systèmes polaires et à la quantité limitée de charges (15).

Les pertes impliquent des dégagements de chaleur. Et l'existence de porteurs de charges dans un diélectrique entraîne celle d'un courant de conduction qui produit l'échauffement du matériau quand un champ est appliqué.

Le principe de la rupture thermique est dû au fait que la chaleur produite dans le diélectrique est supérieure à la chaleur évacuée.

L'état de ce dernier est alors instable et quand la température augmente, la structure du diélectrique change du fait de la destruction de son réseau cristallin initial.

D'après WHITEHEAD (15), l'expression de la tension maximale de rupture thermique est donné par :

$$V_m^2 = \int_{\theta_a}^{\theta_c} \frac{(3.k)}{\gamma} d\theta$$

où : θ_a , est la température ambiante initiale du diélectrique

θ_c : est la température de fusion du diélectrique

k : est la conductivité thermique du diélectrique

γ : est sa conductivité électrique

En supposant que la conductivité thermique k , ne dépend que de la température on obtient :

$$V_m^2 = q \frac{k \cdot \theta_o}{\gamma_a}$$

où : γ_a est la conductivité à la température ambiante

θ_o est l'augmentation maximale de température

q est un nombre sans dimension

Selon WAGNER (16), le mécanisme de claquage thermique est dû à la formation, d'un canal conducteur dans lequel γ est très élevée.

Cette conductivité est une fonction de la température. Elle s'exprime par :

$$\gamma(t) = \gamma_o \exp(\alpha(\theta_1 - \theta_o))$$

où $\gamma(t)$ est la conductivité du diélectrique à $t = \theta_1$,

γ_o : est la conductivité en dehors du canal à θ_o

α : est le coefficient thermique d'élévation de la conductivité,

θ_o : est la température du diélectrique en dehors du canal.

Dans les systèmes d'isolation pratiques, cette condition est souvent remplie pour une tension continue pour laquelle la conductivité ionique du courant est importante.

Pour des tensions alternatives, la conductivité s'exprime par :

$$\gamma(t) = 1,8 \cdot 10^{-12} \cdot \epsilon_r \cdot f \cdot \text{tg} \delta_0 \exp [\alpha(\theta_1 - \theta_0)]$$

avec $\text{tg} \delta_0$: facteur de pertes du diélectrique à $t = \theta_0$

ϵ_r : permittivité relative du diélectrique

f : la fréquence

D'après WAGNER, la détermination de la tension de claquage thermique est basée sur l'établissement de l'équilibre entre la chaleur produite Q_1 dans le diélectrique et la chaleur dégagée Q_2 ; où $Q_1 = 0,24 U^2 \frac{\gamma S}{a}$ et $Q_2 = \lambda_{\text{iso}} (\theta - \theta_0) \cdot a$.

avec S : La section transversale du canal conducteur

a : l'épaisseur du diélectrique

γ : La conductivité moyenne du canal

U : La tension appliquée

λ_{iso} : Le facteur de conduction thermique de l'isolation.

En égalisant les deux équations et en remplaçant $\gamma = \gamma_0 e^{\alpha(\theta_1 - \theta_0)}$

On obtient à la limite : $(U_{\text{cth}})_{\text{mini}} = a \sqrt{\frac{\lambda_{\text{iso}}}{0,24 \cdot \gamma_0 \cdot a \cdot S}} \exp \left[\frac{\alpha}{2} (\theta - \theta_0) \right]$

Cette tension de rupture est minimale quand $Q_1 = Q_2$

Il est à remarquer qu'il est pratiquement difficile de déterminer l'apparition du claquage thermique. Ceci est principalement dû au fait que c'est un phénomène très lent.

2-4-2 Mécanisme de rupture électrique

La rupture électrique est provoquée par l'ionisation par collision.

Cependant, la connaissance du mécanisme de rupture électrique n'est pas encore épuisée. Par ce fait, plusieurs théories ont été énoncées sur ce mode de claquage. Celle de ROGOWSKI (1926), fut la première concernant le claquage des diélectriques solides. Selon cet auteur, la rupture d'un diélectrique de structure cristalline donnée, consiste à la destruction mécanique de son réseau électrostatique, par des forces induites dues

.../...

au champ électrique extérieur.

Pour d'autres chercheurs, il existe deux formes de rupture électrique :

-Claquage électrique intrinsèque

-Claquage électrique par avalanche

Le premier est dû à l'intensité de champ pour laquelle apparaît une certaine instabilité du courant électronique dans le diélectrique.

Ce courant résulte de l'ionsation par choc d'électrons.

Le second admet comme principe, le fait que le processus de multiplication électronique a atteint des proportions inadmissibles. Par conséquent, le matériau cesse d'être un diélectrique et par contre, devient conducteur.

2-5 - INFLUENCE DES BARRIERES ISOLANTES SUR LA RIGIDITE
DIELECTRIQUE DES INTERVALLES D'AIR POINTE-PLAN.

L'amélioration de la rigidité diélectrique d'un intervalle d'air pointe-plan en y plaçant correctement une barrière isolante est un fait important. En effet, la présence d'un écran isolant entre les deux électrodes, transforme l'intervalle d'air initial, en un système stratifié (air-barrière). Les ions positifs créant la charge spatiale sont alors freinés par la barrière et se répartissent sur sa surface figure 9. Le champ électrique subit alors une déformation en engendrant une augmentation importante de la tension disruptive du système.

L'influence des écrans pour les faibles intervalles d'air a été remarquée par C.P. STEINMETZ (2), vers 1920. Les principales recherches furent ensuite entreprises par H. ROSE (5) et E. MARX (6).

Pour des intervalles d'air atteignant 124cm, des travaux ont été réalisés par O. SALKA et H. NORINDER. Mais plusieurs autres chercheurs se sont intéressés par la suite à l'influence des barrières.

2-5-1 - INFLUENCE D'APRES E. MARX

Pour E. MARX, un point important est caractérisé par l'apparition de décharges glissantes sur la surface du diélectrique solide.

D'après les photographies présentées par l'auteur, (6) la plupart des décharges avant l'amorçage, sont localisées entre la pointe et la barrière.

Pour la rupture diélectrique aux chocs ($0,5/100\mu S$), d'un intervalle d'air pointe-plan de 50cm, MARX a obtenu une augmentation relativement importante de la tension disruptive quand l'écran est placé près de la pointe positive. Lorsque la pointe est négative, les décharges apparaissent des deux côtés de la barrière isolante. L'étincelle a lieu quand les deux décharges de part et d'autre de l'écran, se rencontrent.

Mais l'effet de barrière est négligeable.

2-5-2 - INFLUENCE D'APRES H. ROSER

Selon H. ROSER (5), le champ est uniforme entre l'écran et l'électrode plane. La figure 9 montre la répartition des lignes de champ entre une pointe positive et un écran et entre l'écran et le plan. L'augmentation de la tension disruptive est obtenue seulement lorsque la charge superficielle sur la barrière a la même polarité que la pointe. Ceci est toujours vérifié pour le cas de la pointe positive, et ne l'est pour la pointe négative que lorsque la barrière est loin du plan. On voit alors, que d'après ROSER, quand la charge superficielle est la pointe ont différentes polarités, l'effet d'écran est faible.

2-5-3 - INFLUENCE D'APRES J. PILLING

PILLING a étudié l'influence des écrans isolants sur la tenue diélectrique à 50Hz des intervalles d'air pointe-plan (et pointe-pointe), allant jusqu'à 20cm. Il a été vérifié que la tension disruptive de l'intervalle est équivalente à la somme des tensions de rupture partielles des intervalles d'air des deux côtés de la barrière et de la chute de tension sur la barrière.

PILLING a aussi constaté que la constante diélectrique et l'épaisseur de la barrière ont une influence sur la distribution des porteurs de charge positifs et sur la chute de tension sur la surface de la barrière. D'après cet auteur, quand la constante diélectrique et l'épaisseur augmentent, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme.

2 - 6 - FORMES DES DECHARGES OBSERVEES DANS LE SYSTEME
POINTE-PLAN AVEC BARRIERE ISOLANTE.

L'évolution et la forme des décharges peuvent être classées en deux types différents :

- Décharge directe.
- Décharge par étapes.

Cette différence est liée aux paramètres définissant la barrière, notamment sa largeur, son épaisseur, sa nature, la résistivité superficielle de ses deux surfaces, sa position dans l'intervalle et la distance pointe-plan.

2-6-1 - Décharge directe :

L'amorçage se fait en une seule étape : de la pointe vers le plan et on distingue deux cas :

a) Cas où la décharge perce la barrière :

Ce cas est rencontré surtout quand la barrière est très large, assez mince et située à une distance proche de la pointe (électrode près de laquelle le champ est très intense).

Quand la barrière est perforée, la décharge se prolonge comme dans le système sans barrière. Ce cas dont l'étude ne nous intéresse pas est présenté en figure 9-a.

b) Cas où la décharge contourne la barrière :

Pour un système pointe positive-plan avec barrière, les streamers partant de la pointe suivent le trajet : "pointe-bord de la barrière-plan". Ceci est constaté quand l'écran n'est pas suffisamment large ou quand une importante concentration de charges électriques de signes positifs se trouve répartie sur la surface de la barrière (2).

Dans ce dernier cas, la décharge se voit déviée vers le bord de l'écran à cause de l'existence de forces électriques répulsives. figure 9-b.

La mise en évidence de cette forme de décharge a été observée (2), grâce à l'utilisation de trous au milieu de la barrière.

Jusqu'à certains diamètres, le trou n'a aucune influence sur le trajet de la décharge qui reste toujours le même : "pointe-bord de la barrière-plan". Ainsi, on voit bien que l'existence d'une décharge directe pour les barrières relativement larges est liée surtout à la polarité de la pointe (positive) ainsi qu'à la présence de forces électrostatiques à la surface de séparation des deux diélectriques (air-barrière).

2-6-2-Décharge par étapes

Cette forme de décharge se rencontre quand la barrière est très large et n'est pas trouée. L'amorçage s'effectue en trois étapes quand la pointe est positive.

En premier lieu, on distingue l'effet couronne suivi de la décharge pointe-barrière qui constitue la première étape de l'amorçage.

Ensuite, pour un niveau de tension supérieur, on arrive à la seconde étape qui est le contournement de la barrière par les décharges glissantes. Et finalement, la troisième et dernière étape est atteinte quand la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan.

Pour une pointe négative on a quatre étapes : - une décharge s'effectue de la pointe vers la barrière.

-Pour un niveau de tension supérieur, on a le contournement de la barrière par les décharges glissantes. D'autre part, à partir de l'électrode plane apparaît une décharge vers l'autre surface de la barrière et finalement l'amorçage s'effectue après la rencontre des deux décharges venant de part et d'autre de la barrière.

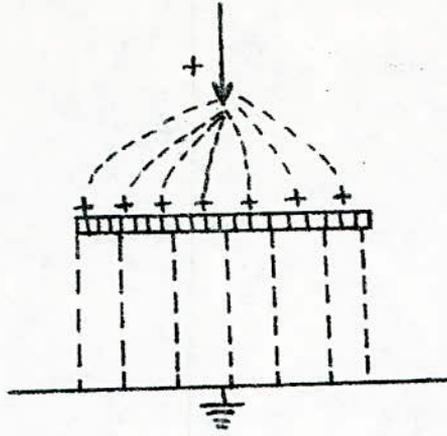


Figure 9. Influence des écrans d'après ROSER (5)

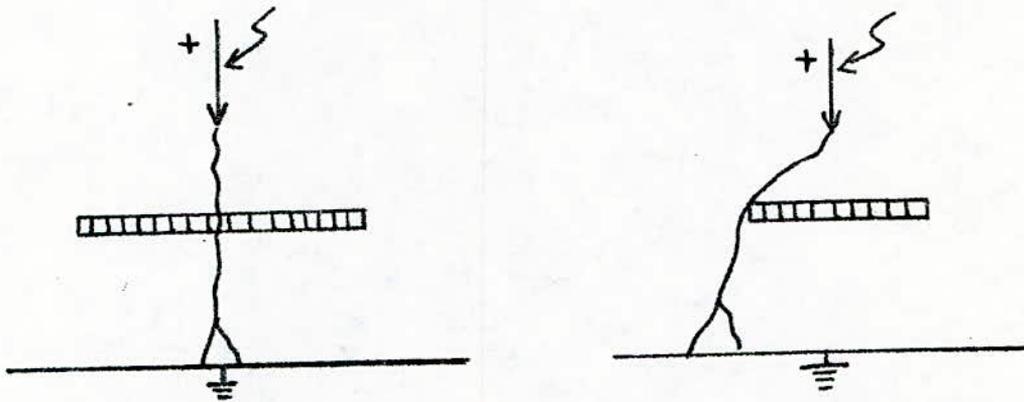


Figure 9-a. Décharges directes Figure 9-b

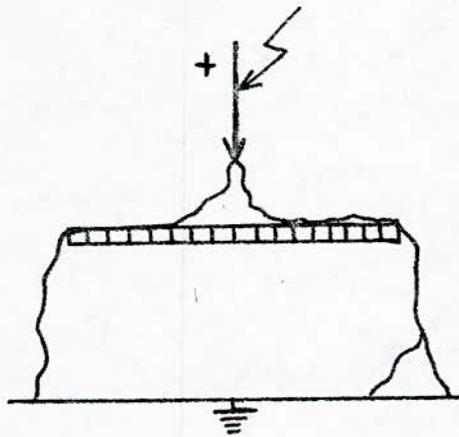


Figure 9-c Décharge par étapes

// H A P I T R E 3



ESSAIS AU LABORATOIRE DE HAUTE TENSION DE L'E.N.P.

3-1 - EQUIPEMENT DE LA STATION D'ESSAI DE L'E.N.P.

L'équipement de la station d'essai à fréquence industrielle, (50 Hz) du laboratoire de l'E.N.P. est de marque HAEFELY.

Cette station d'essai comprend les organes suivants :

- Un transformateur d'essais.
- Un transformateur de réglage.
- Un diviseur capacitif de tension.
- Un pupitre de commande.
- Des appareils annexes de mesures et de protection.

La station d'essais a pour rôle principal de réaliser des essais di-
-électriques à fréquence industrielle sur le matériel à haute tension.

3-1-1 TRANSFORMATEUR D'ESSAIS (50 Hz).

Il délivre la tension à appliquer à l'objet d'essai; il est du type monophasé et à pour caractéristiques :

- Rapport de transformation : 500/300.000 V.
- Puissance apparente nominale : 50 kVA.
- Puissance absorbée à vide : 10 kVA.
- Résistance de l'enroulement B.T : 0,0365 Ω
- Résistance de l'enroulement H.T : 4893 Ω

Vu l'importance des pertes à vide du transformateur d'essai, le constructeur recommande de ne pas le laisser fonctionner pendant plus de 12 heures par jour, même à vide.

3-1-2 TRANSFORMATEUR DE REGLAGE :

Il permet le réglage de la haute tension de sortie du transformateur d'essais de zéro à la pleine tension, de façon continue et indépendem-
ment de la charge.

Le réglage peut se faire, soit manuellement (à l'aide d'un volant), soit à l'aide d'un moteur dont le fonctionnement est commandé à partir du pupitre. Ses caractéristiques sont :

- Tension primaire nominale : 220 V (50 Hz).
- Puissance apparente à tension maximale : 50 kVA.
- Tension secondaire réglable de 0 à 500 V.
- Temps de parcours du curseur tout le long de l'enroulement secondaire : 103 secondes.

3-1-3 DIVISEUR CAPACITIF (VOLTMÈTRE DE CRÊTE).

Il est alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essais et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés dans le pupitre de commande.

Le diviseur capacitif est constitué d'une capacité H.T. et de 4 capacités B.T. dont la combinaison de branchement permet d'obtenir les calibres de mesures : 75 kV, 150 kV et 300 kV.

La tension délivrée par le diviseur capacitif est mesurée par deux voltmètres, l'un statique l'autre de crête.

Le voltmètre statique mesure la valeur efficace de la tension d'essai, tandis que le voltmètre de crête, mesure, la valeur de la crête (\hat{U}) divisée par $\sqrt{2}$, de la tension d'essai.

3-1-4 PUPITRE DE COMMANDE :

Il est alimenté en 220 V, indépendamment du régulateur de tension et du transformateur d'essai.

On y trouve les appareils de mesure permettant la lecture des tensions et courant au secondaire du transformateur de réglage ainsi que les tensions de crête et efficace du transformateur d'essai.

3-1-5 ALIMENTATION GENERALE ET DISPOSITIF DE PROTECTION.

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plateforme d'essais.

Le tableau, quand à lui, est alimenté par un transformateur ayant pour caractéristiques :

- Puissance nominale : 400 kV.A.
- Rapport de transformation : 10.000/400 V.
- Fréquence : 50 Hz.

Le transformateur d'essais et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique (250 A). Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

3-2 - ESSAIS REALISES.

3-2-1 - CIRCUIT D'ESSAI :

Le schéma du circuit d'essai est donné par la figure 15

3-2-2 - DESCRIPTION DU SYSTEME :

Les essais ont été effectués à l'aide d'un système pointe-plan donné par la figure 16

3-2-3 - CHOIX DE L'ELECTRODE-POINTUE :

L'électrode pointue est constituée par un cylindre creux, en cuivre, de longueur : 1.200 mm et de diamètre 45 mm.

Ce cylindre est terminé par une pointe à bout conique faisant un angle de 30°.

L'électrode pointue est de longueur suffisante pour éviter l'influence des capacités parasites entre la borne H.T. (reliant le secondaire du transformateur d'essais à l'électrode pointe) et la terre.

3-2-4 - CHOIX DE L'ELECTRODE PLANE :

Le plan est une plaque en cuivre carrée, de 1,5 mm d'épaisseur et de 2 m de côté.

Etant donné qu'on utilise des barrières dont la largeur atteint 50 cm, il est important de choisir une électrode plane suffisamment large pour éviter l'effet de bords. En effet, les bords du plan peuvent jouer le rôle de pointes où le champ est très intense. Ainsi, notre système ne serait plus un système pointe-plan, mais un arrangement pointe-pointe. On précisera à titre d'indication, qu'on peut aussi éviter l'effet de bords, en utilisant des électrodes à bords arrondis selon ROGOWSKI; mais vu les difficultés techniques rencontrées, on s'est limité à un plan assez large, jugé suffisant, pour éviter le problème d'effet de bords.

3-2-5 - CHOIX DES BARRIERES :

Nos barrières sont des plaques carrées en plexiglass d'épaisseurs 8 mm, 5 mm et 2 mm et de largeurs 50 cm, 40 cm, 30 cm, 20 cm et 10 cm. Avant chaque essai, on nettoie nos écrans avec de l'alcool isopropylique.

Chaque essai est réalisé avec deux applications de tension.

3-2-6 - FACTEURS DE CORRECTION ATMOSPHERIQUE :

En considérant les facteurs de correction, une tension disruptive mesurée, peut être ramenée à la valeur qui aurait été obtenue sous les conditions normales atmosphériques.

Lors des expériences réalisées au laboratoire, toutes les valeurs des tensions seront corrigées suivant les prescriptions des normes de la C.E.I.-60-1 (12).

Il existe deux facteurs de correction :

- Le facteur de correction de la densité de l'air : K_d .
- Le facteur de correction de l'humidité : K_h .

Les tensions disruptives U_d mesurées seront ramenées aux conditions atmosphériques normales, en les divisant par le rapport K_d/K_h (12).

- Facteur de correction K_d :

Si la pression atmosphérique P est exprimée en mbar et la température t en ($^{\circ}C$), le facteur de correction K_d est donné par :

$$K_d = \frac{P}{P_0} \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

- Facteur de correction K_h :

Il est déterminé à partir de la figure 17 en fonction de l'humidité absolue qui, elle, est obtenue à partir de la figure 18.

$$U_c \text{ (normale)} = U_c \text{ (mesurée)} \cdot \frac{K_h}{K_d}$$

3-3 - INFLUENCE DE LA POSITION DE LA BARRIÈRE :

La barrière isolante de largeur L et d'épaisseur e est suspendue par 4 fils en nylon, en restant parallèle au plan.

Dans un premier temps, on vérifiera l'influence de la position de la barrière pour un intervalle d'air de 30 cm pour chaque largeur et chaque épaisseur. Dans un second temps, on considérera un intervalle de 15 cm, puis un autre de 9,5 cm, mais seulement pour l'épaisseur de 5 mm et les largeurs 50 cm et 40 cm. Les positions de la barrière sont définies par la distance (a_1) entre la pointe et la barrière. Cette distance prend différentes valeurs entre zéro et d . (d , étant la longueur axiale de l'intervalle (figure 16).

Les distances a_1 choisies sont :

$$a_1 = 0 \text{ d}$$

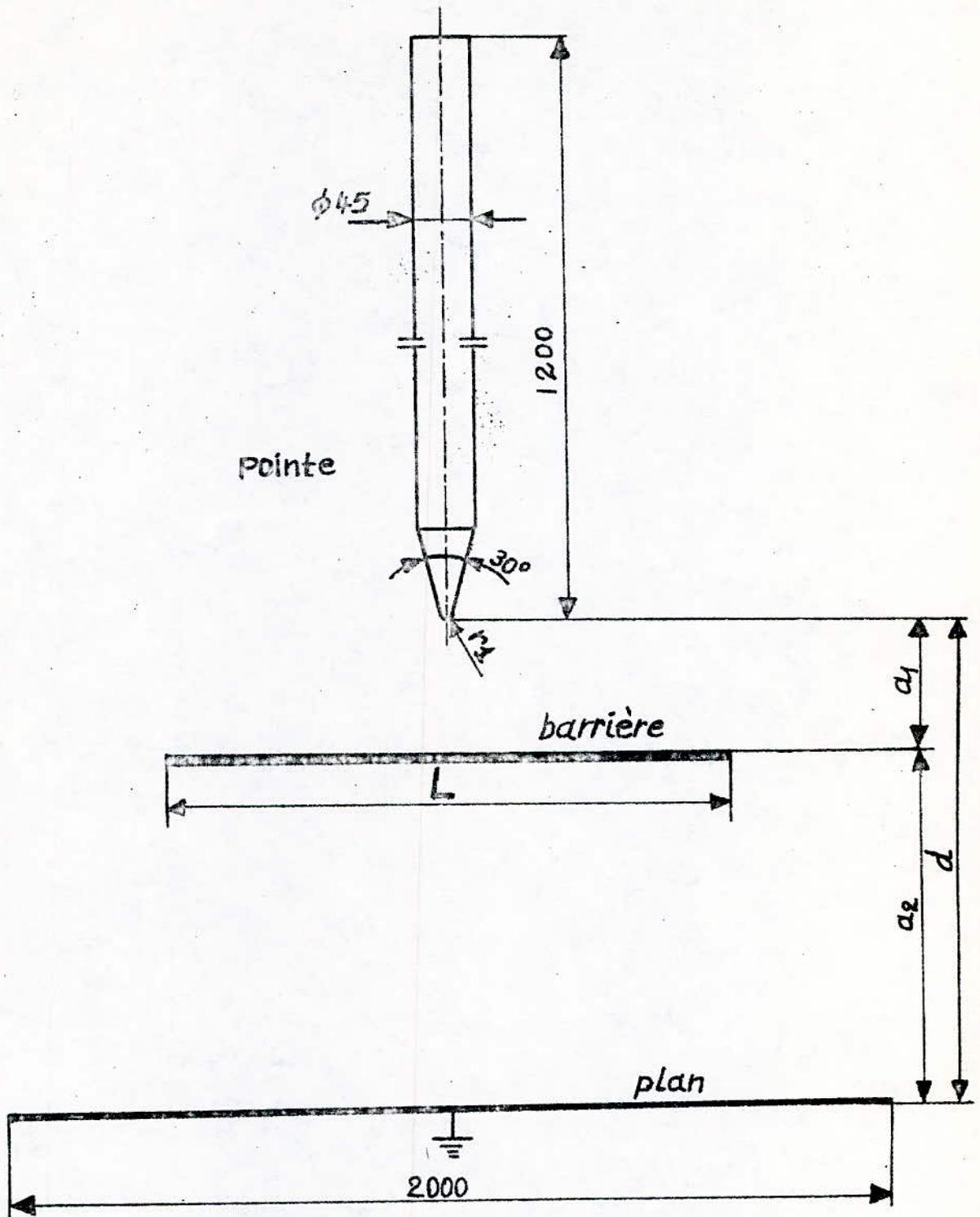
$$a_1 = 0,2 \text{ d}$$

$$a_1 = 0,4 \text{ d}$$

$$a_1 = 0,6 \text{ d}$$

$$a_1 = 0,8 \text{ d}$$

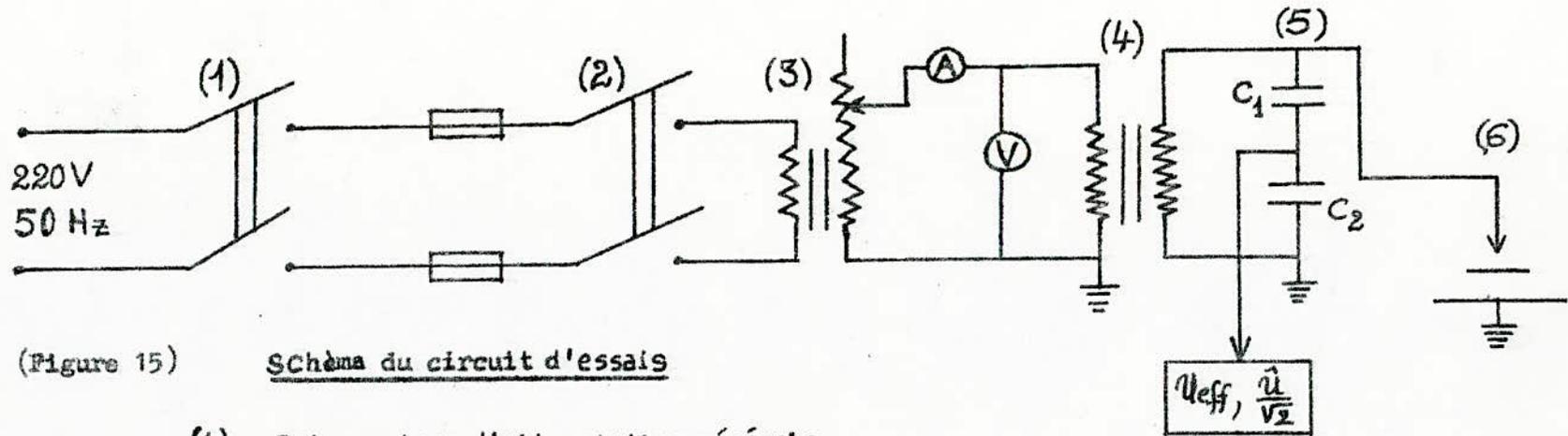
et $a_1 = d$, en négligeant l'épaisseur de la barrière devant la distance pointe-plan.



(Figure 16)

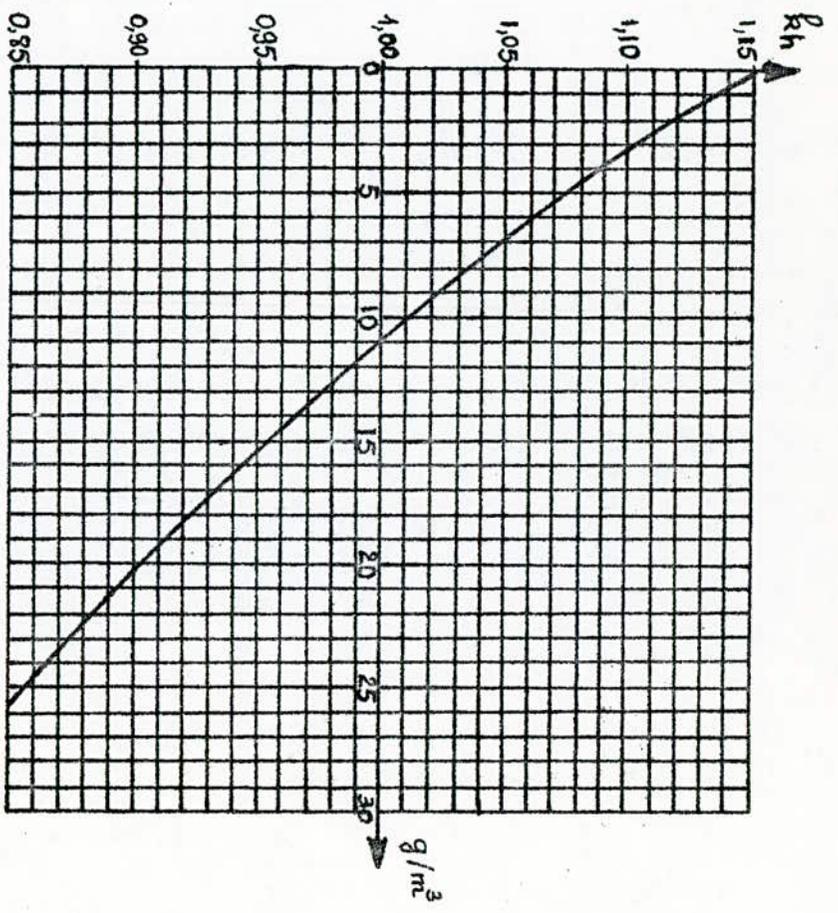
Arrangement pointe-barrière-plan

(Figure 15)

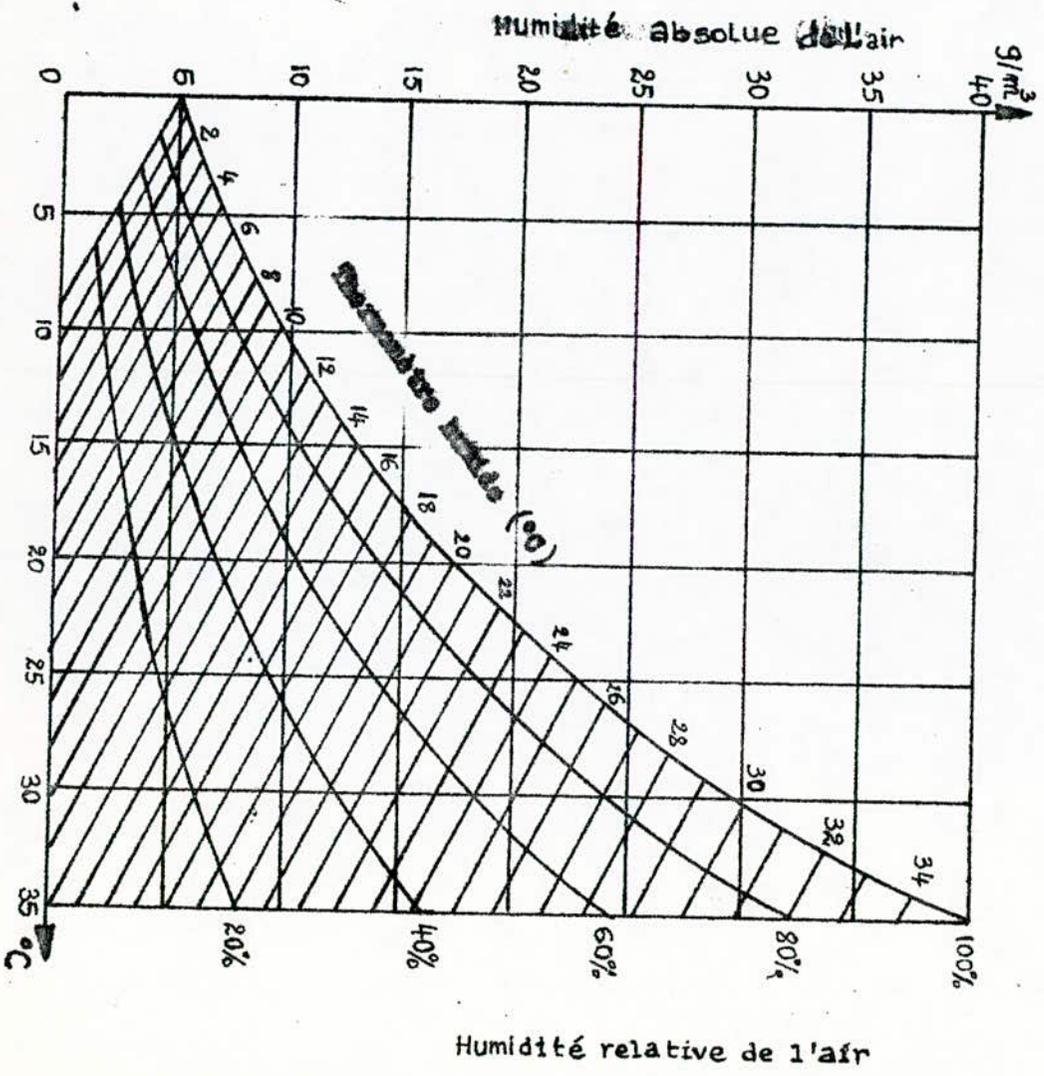


(Figure 15) Schéma du circuit d'essai

- (1) - Interrupteur d'alimentation générale.
- (2) - Disjoncteur avec protection thermique.
- (3) - Transformateur de réglage.
- (4) - Transformateur d'essai.
- (5) - Diviseur capacitif.
- (6) - Système pointe-barrière-plan en essai (Figure 16).



(Figure 17)



(Figure 16) Thermomètre sec ($^{\circ}C$)

Sur les figures (19), (20) et (21) sont représentées les variations de la tension disruptive U_d en fonction des différentes positions (a_1/d) des barrières. Des variations tiennent compte de l'épaisseur et de la largeur de la barrière expérimentée. On obtient ainsi, trois groupes de caractéristiques qui se rapprochent les unes des autres par leur allure.

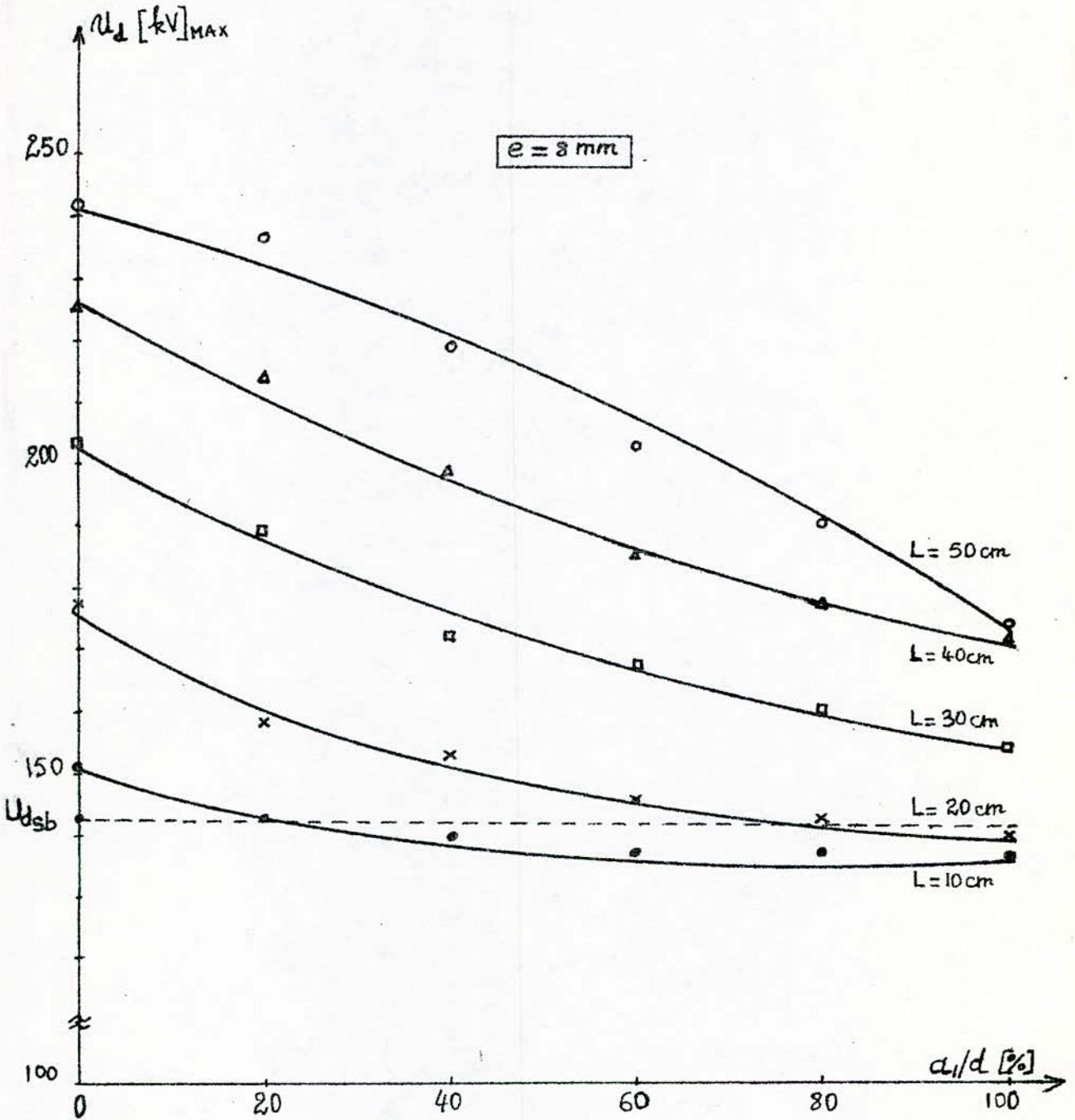
La première remarque à faire est que la tension disruptive augmente quand la barrière s'approche de l'électrode haute tension. L'augmentation maximale est obtenue quand l'écran touche la pointe ($a_1/d = 0\%$). Cette constatation est valable pour toutes les largeurs et épaisseurs utilisées dans l'intervalle d'air de 30 cm. De même, des résultats similaires sont obtenus dans l'intervalle de 15 cm, pour l'épaisseur 5 mm et la largeur 50 cm.

Par contre, pour $d = 9,5$ cm, le maximum de tension n'est plus obtenu en 0% , mais en position 20% . Ceci est montré en figure 28; et nous traiterons de cette particularité dans l'influence de la distance pointe-plan.

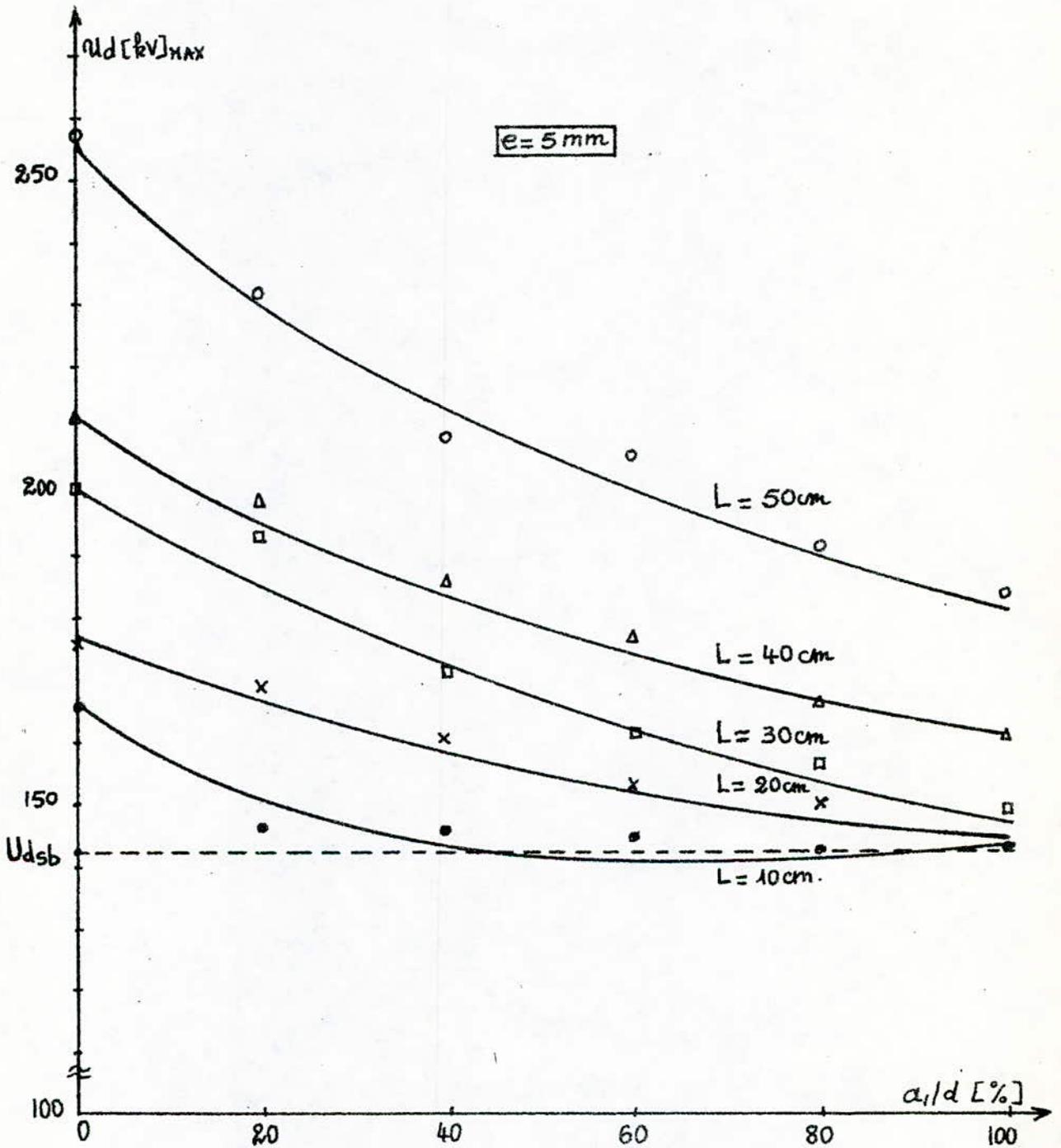
En revenant à l'influence de la position, on voit que, quand la barrière s'éloigne de la pointe, la tension disruptive décroît. Quand l'écran touche l'électrode plane ($a_1/d = 100\%$), son influence est faible, et la tension disruptive correspond approximativement à celle obtenue dans le système pointe-plan sans barrière ($U_{d\text{sb}}$). Ceci est observé particulièrement pour les barrières de largeurs 20 cm et 10 cm et d'épaisseurs 2 mm, 5 mm et 8 mm.

Le tableau (T₁₉) représente les distances géométriques (d'_{geom}) calculées selon la figure 27 pour les différentes largeurs d'une barrière de 5 mm d'épaisseur. (d'_{geom}) représente l'éloignement du point d'impact de la décharge par rapport à l'axe vertical de la pointe. On voit alors que la longueur du canal de décharge est liée à la position de la barrière. En position 0% , la longueur maximale du canal est de 55 cm; et c'est en position $a_1/d = 100\%$ que la longueur du canal est minimale (39 cm).

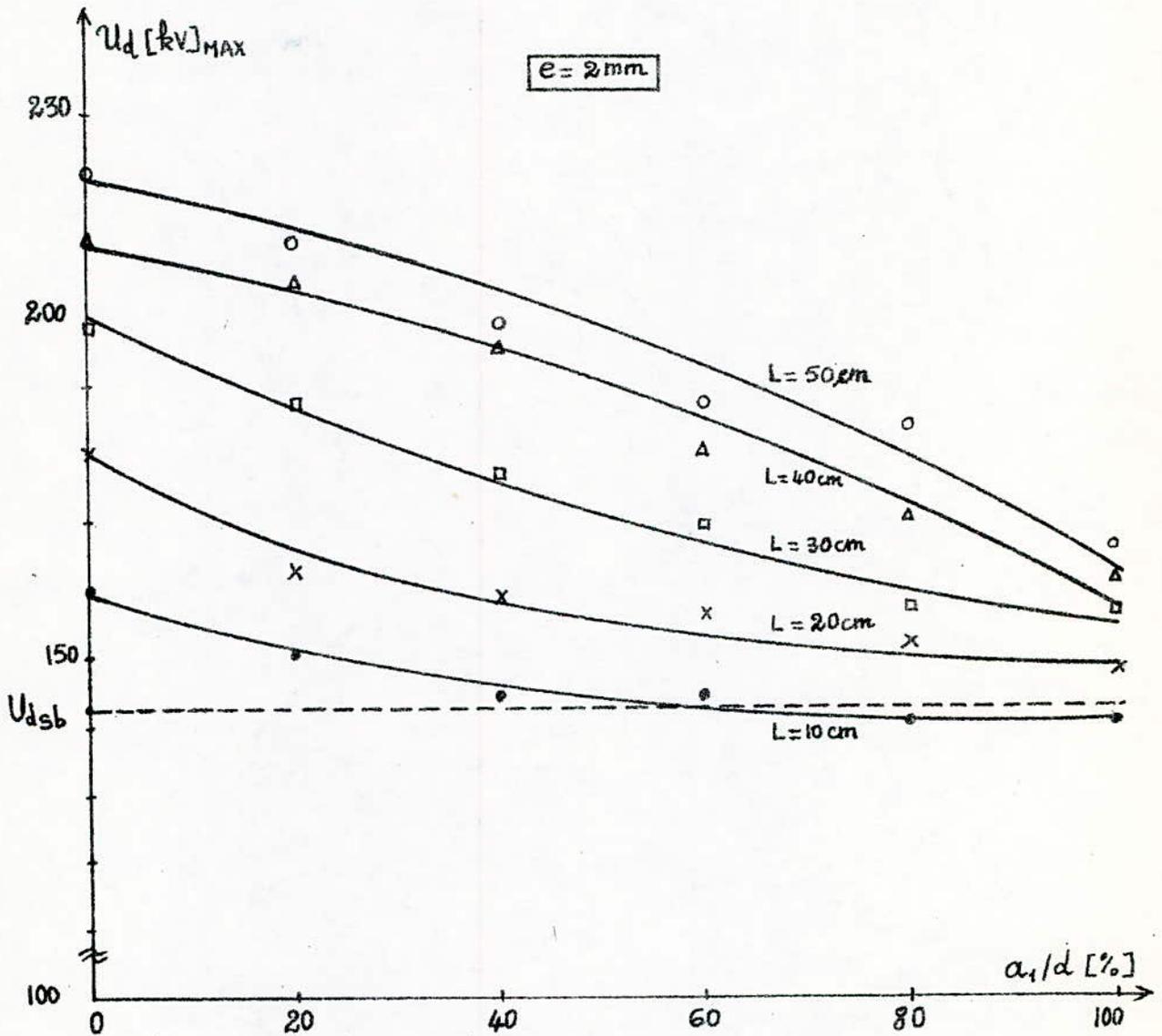
On peut alors affirmer pour les barrières de plexiglass, que c'est en position 0% que la tension disruptive est la plus élevée pour des distances pointe-plan appartenant à l'intervalle : $15 \text{ cm} \leq d \leq 30 \text{ cm}$; et ceci constitue le premier résultat de notre étude.



(Figure 19) Influence de la position d'une barrière de 8 mm d'épaisseur sur la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe-plan de 30 cm.



(Figure 20) Influence de la position d'une barrière de 5 mm d'épaisseur sur la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe-plan de 30 cm.



(Figure 21) Influence de la position d'une barrière de 2 mm d'épaisseur sur la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe-plan de 30 cm.

2-4 - INFLUENCE DE LA LARGEUR DE LA BARRIÈRE.

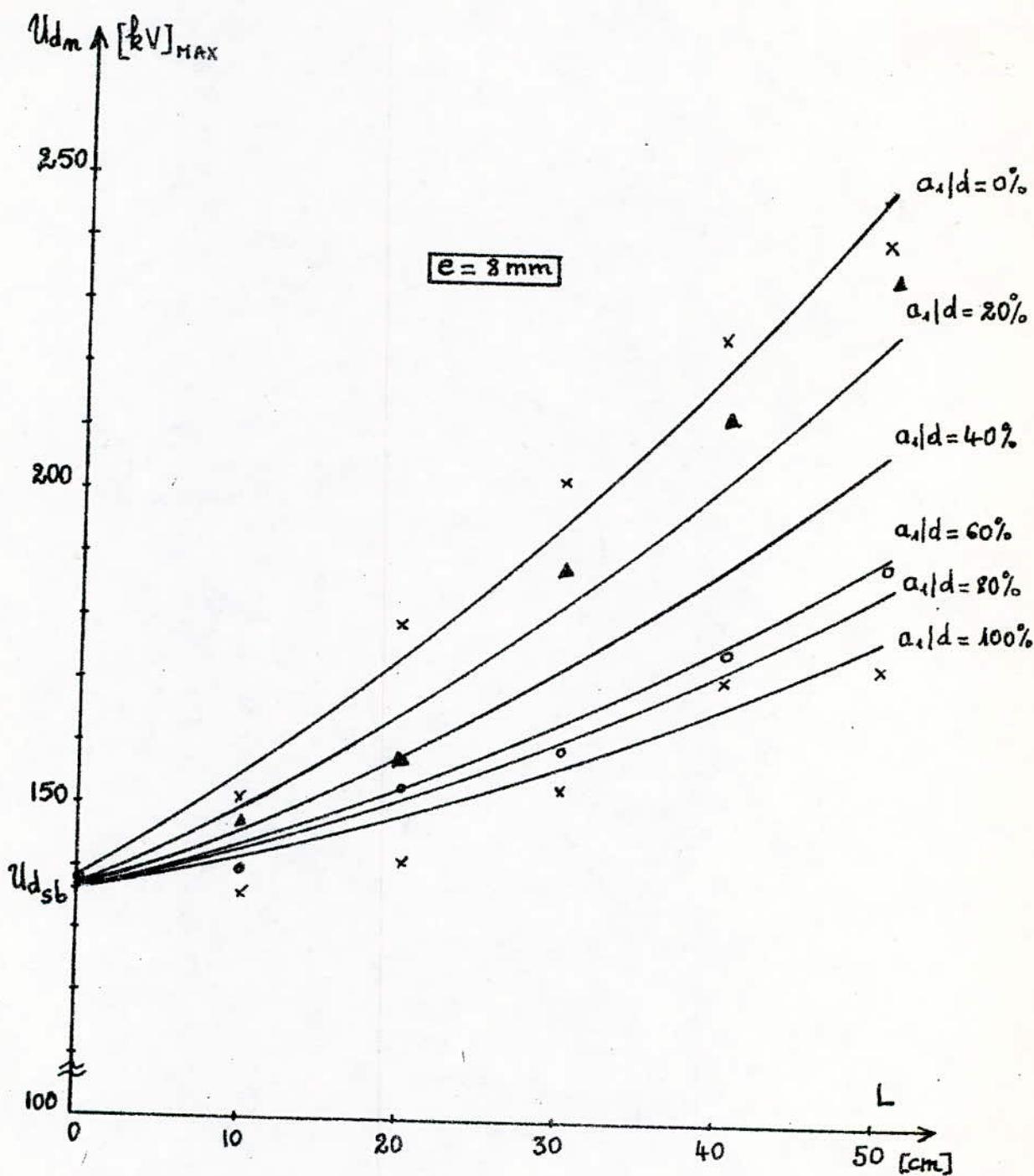
Les figures (22), (23) et (24) représentent les variations de la tension disruptive en fonction de la largeur de la barrière.

La figure (25) désigne les variations du rapport optimal U_d/U_{dsb} en fonction de la largeur de la barrière pour la position 0% seulement, et toutes les épaisseurs utilisées.

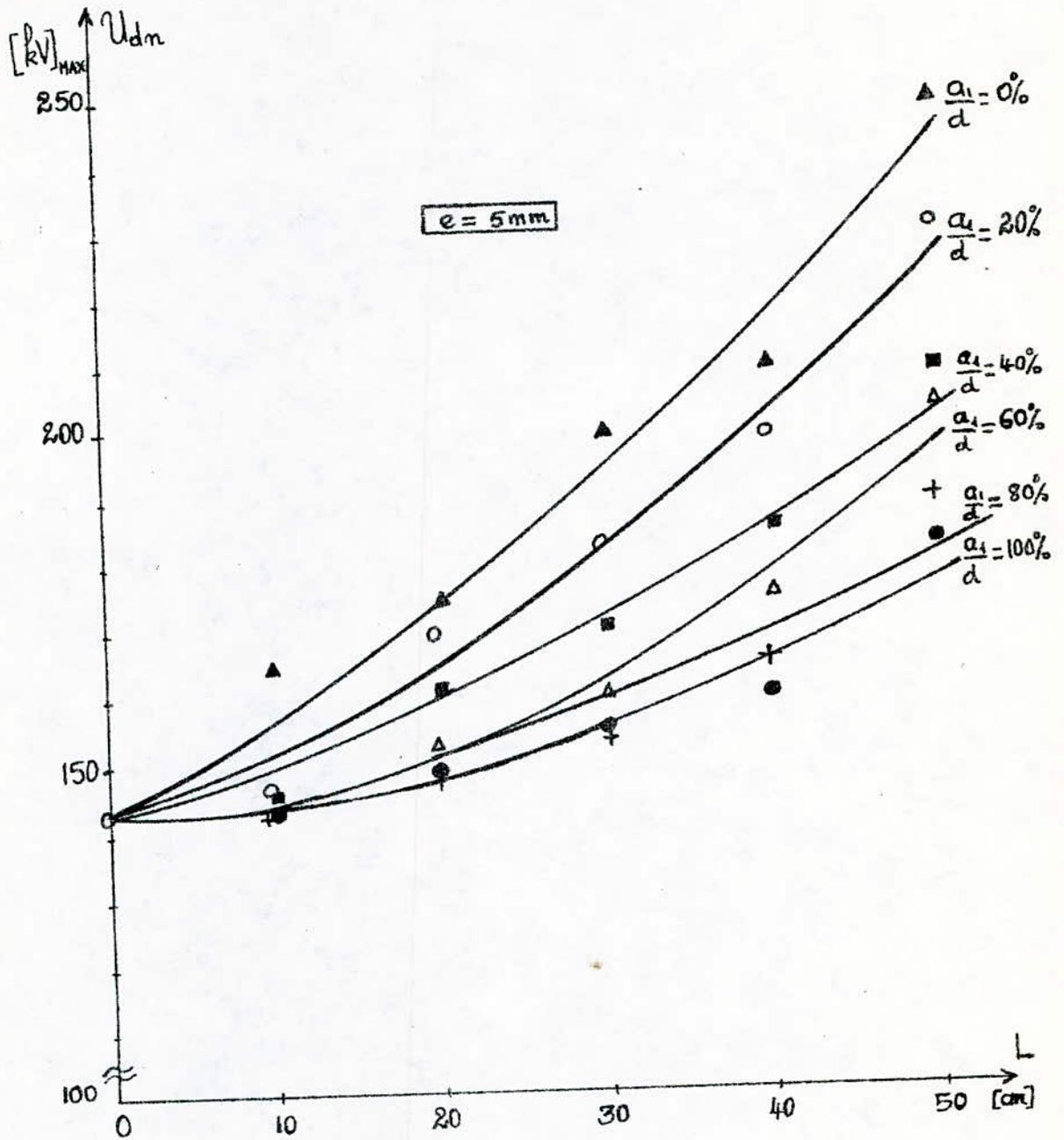
On voit aisément d'après les quatre figures que la tension disruptive augmente avec la largeur de la barrière. Ce point est expliqué par le fait que, plus la largeur de la barrière augmente, plus le nombre d'ions se trouvent freinés, augmente. En effet, ces ions, dans leur mouvement vers la cathode (le plan) se répartissent sur la surface de la barrière (figure 9); et quand la largeur de la barrière augmente, le processus de développement du canal de plasma est retardé, ce qui engendre alors, une augmentation de la tension disruptive du système.

Seulement, il faut remarquer que, pour une même largeur et une même position de la barrière, on n'obtient pas la tension maximale pour les intervalles d'air de 30cm et 9,5cm. On voit alors, que la distance pointe-plan rentre de nouveau en considération; et que, même si la tension disruptive augmente avec la largeur de la barrière, il faut tenir compte aussi de la distance pointe-plan et de la position de l'écran pour que l'effet positif de la largeur soit maximal.

On voit donc, que les paramètres définissant la position, la largeur et la distance sont très liés les uns aux autres. Par exemple, pour la barrière de largeur 50cm et d'épaisseur 5mm, la position pour laquelle la tension est maximale est $a_1/d = 0\%$, et cela pour les distances pointe-plan de 30cm et 15cm. Par contre, pour la distance pointe-plan de 9,5cm, le maximum de tension pour une même barrière n'est plus en position 0%, mais en 20%. En fin de compte, d'après les résultats obtenus, on peut affirmer que l'influence de la largeur n'est intéressante que dans l'intervalle de positions : $0\% \leq a_1/d \leq 20\%$ pour les distances pointe-plan de $9,5\text{cm} \leq d \leq 30\text{cm}$. Ceci constitue un second résultat de notre étude.



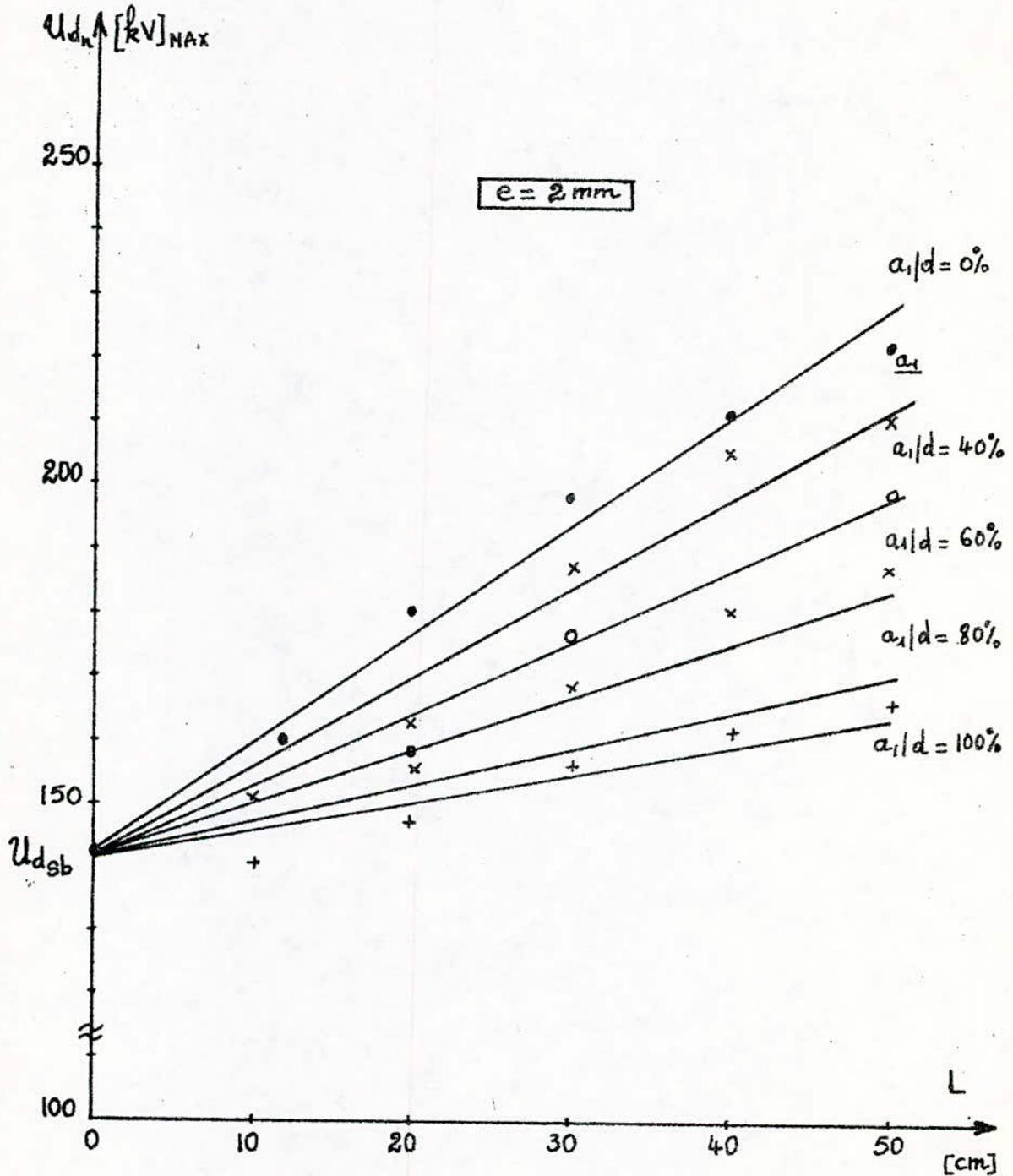
(Figure 22) Influence de la largeur d'une barrière de 8 mm d'épaisseur sur la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe-plan de 30 cm.



(Figure 23)

Influence de la largeur d'une barrière de 5 mm d'épaisseur sur la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe-plan de 30 cm.

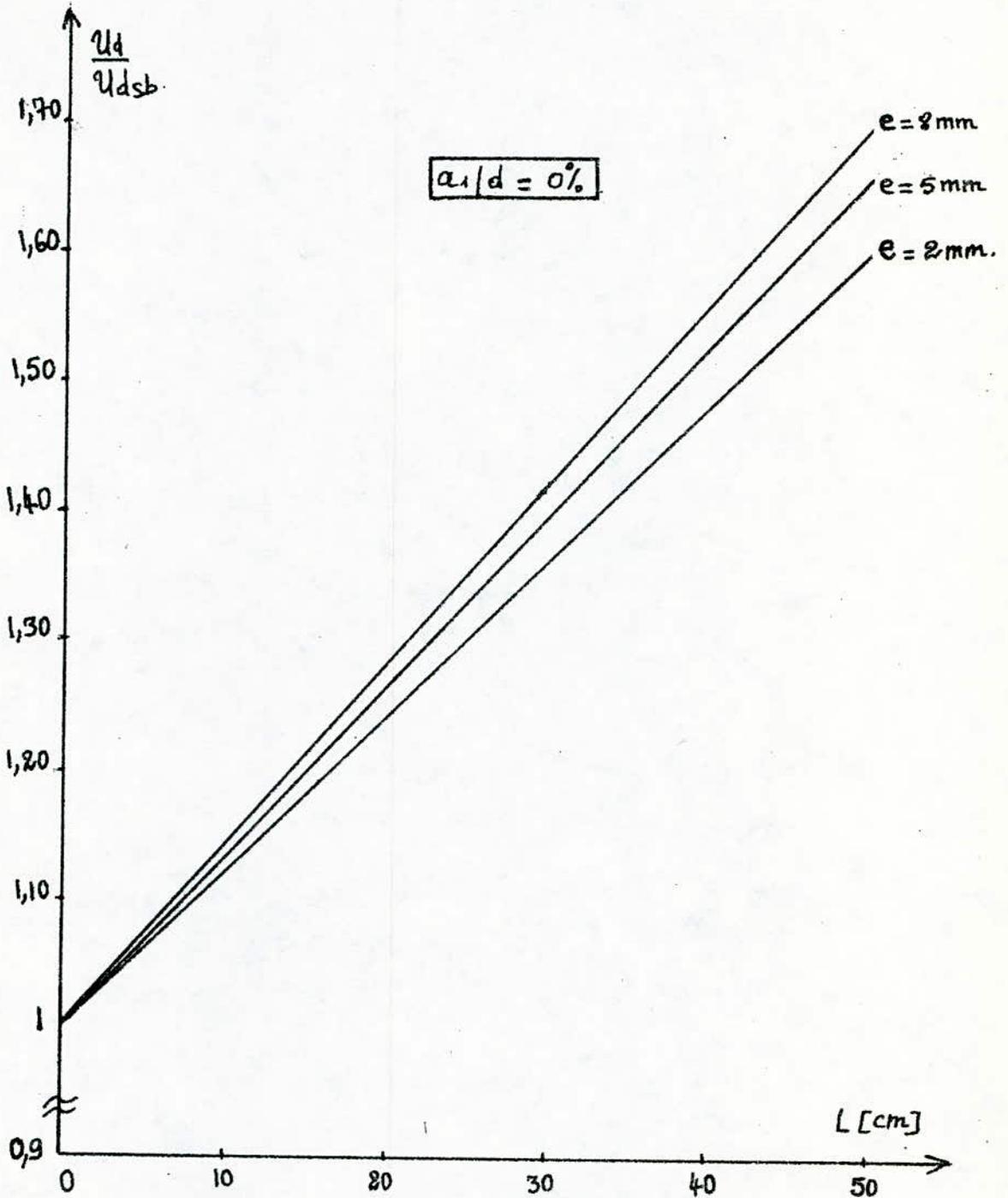
(Figure 24)



(Figure 24)

Influence de la largeur d'une barrière de 2 mm d'épaisseur sur la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe-plan de 30 cm.

(Figure 25) Influence de l'épaisseur et de la largeur sur le rapport optimal U_d/U_{dsb} pour la position 0%.



(Figure 25)

3-5 - INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA BARRIÈRE.

Bien que nous n'ayons utilisé que ~~trois épaisseurs~~ trois épaisseurs différentes, il apparaît que l'influence de l'épaisseur joue aussi un rôle figure 25.

Mais nous ne pourrions tirer une conclusion globale.

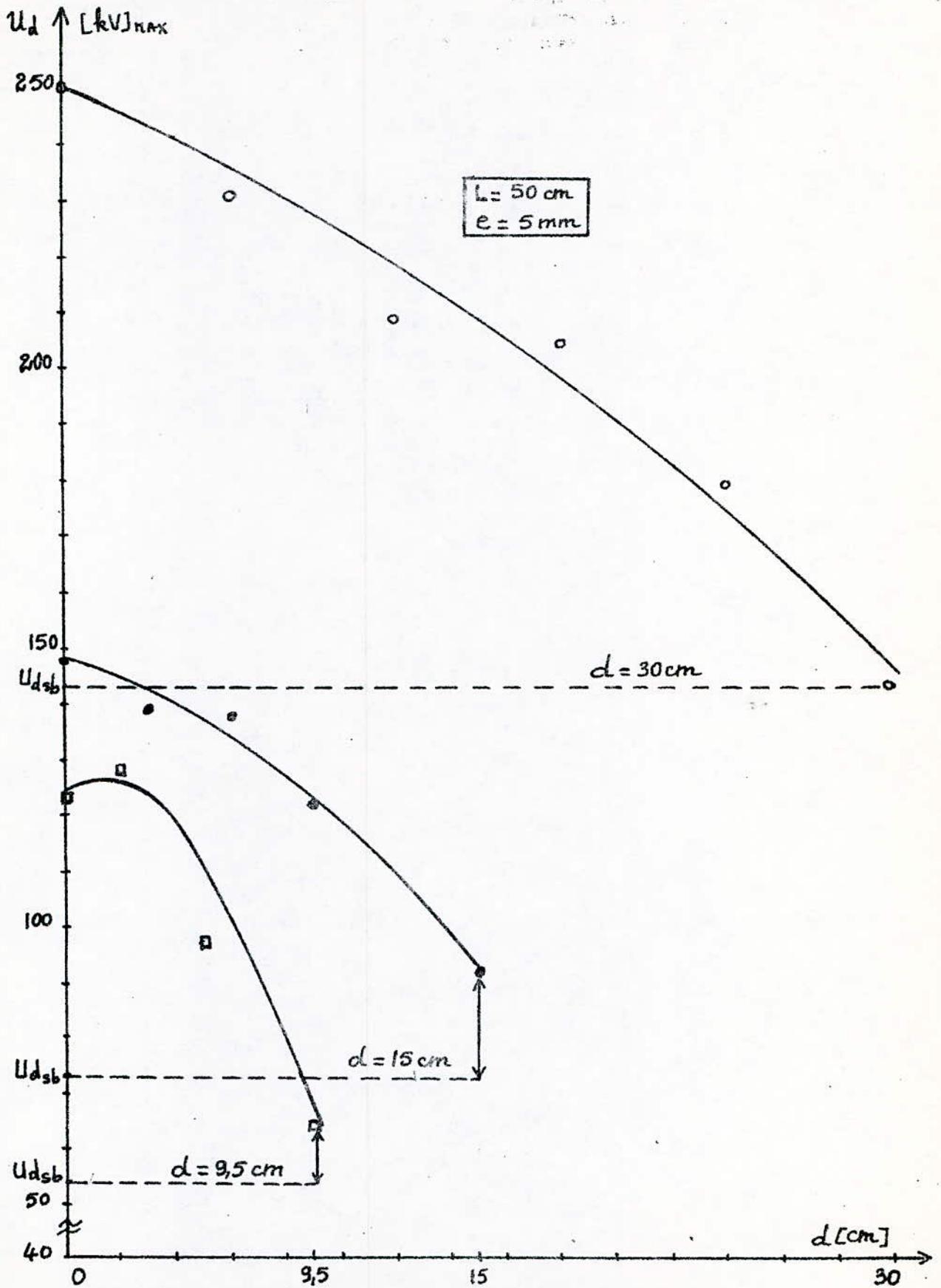
Le rapport $U_d/U_{d\text{sb}}$ en fonction de la largeur montre que c'est l'épaisseur de 8mm qui donne de bons résultats et cela pour les largeurs de 50cm, 40cm, 30cm et 20cm. Par contre pour la largeur de 10cm, le rapport $U_d/U_{d\text{sb}}$ est approximativement identique pour les trois épaisseurs utilisées. Ceci est dû au fait qu'on a obtenu pour les trois épaisseurs une décharge directe (le système pointe-plan avec une barrière de 10cm de largeur tend vers un système pointe-plan sans barrière; l'épaisseur, alors joue un rôle presque négligeable).

Pour pouvoir vérifier l'effet de l'influence de l'épaisseur des barrières, il faudrait disposer de plusieurs écrans de largeurs et d'épaisseurs variées; ce qui n'est pas le cas lors de notre étude. Les résultats obtenus pour les trois épaisseurs voisines (8mm, 5mm et 2mm), ~~ne~~ constituent pas une remarque valable sur l'influence de l'épaisseur en général. Mais nous nous limiterons à affirmer que pour des barrières de plexiglass n'excédant pas 50cm de largeur, et 8mm d'épaisseur, c'est l'épaisseur de 8mm qui donne de bons résultats.

3-6 - INFLUENCE DE LA DISTANCE POINTE-PLAN.

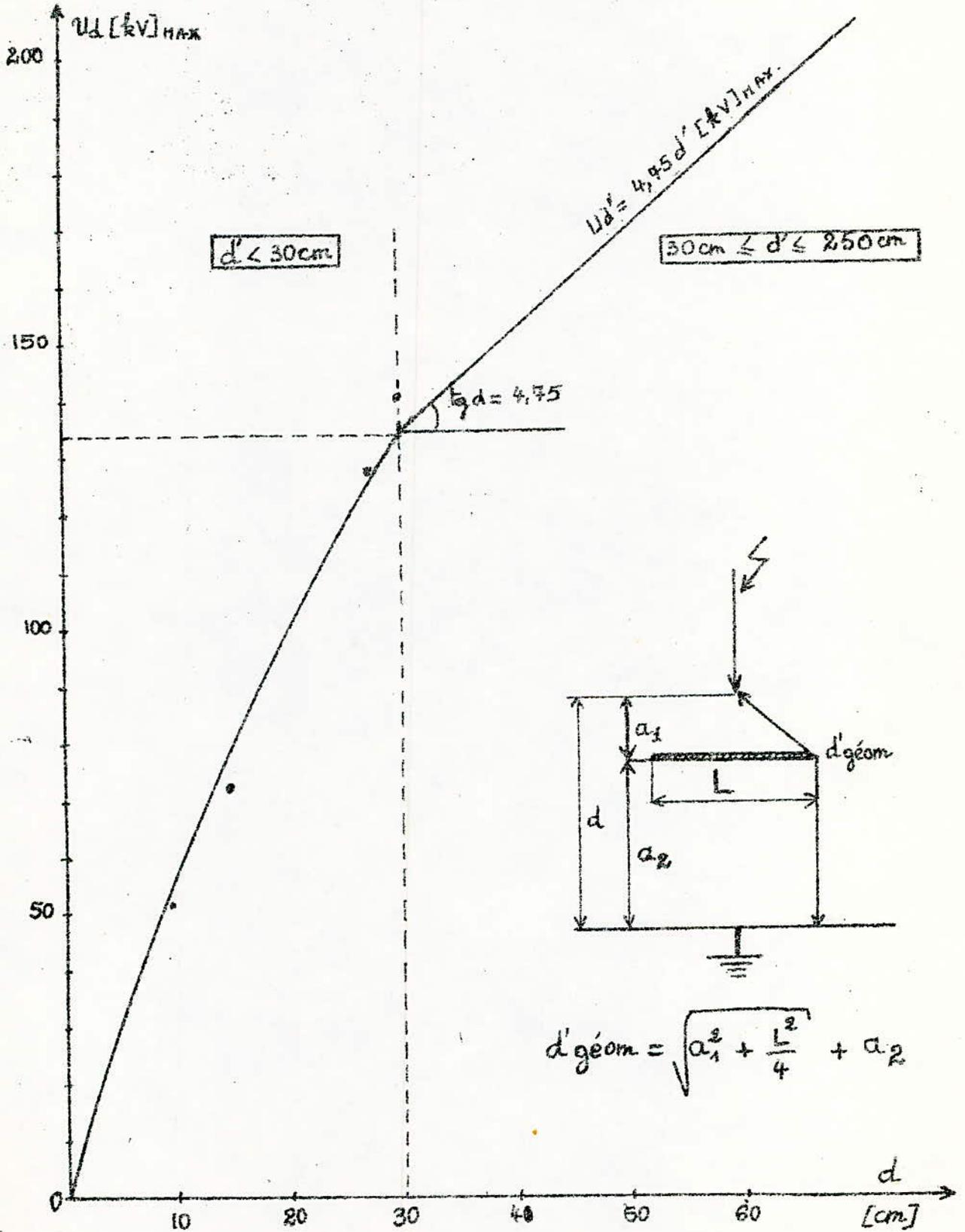
La figure 28 représente les variations de la tension disruptive en fonction de la position de la barrière pour trois distances pointe-plan différentes. Le groupement des trois caractéristiques nous donne une idée sur la dépendance: tension disruptive/distance pointe-plan.

On peut voir comment varie la tension disruptive dans les intervalles d'air de 30cm, 15cm et 9,5cm pour les différentes positions de la barrière. On remarque que pour $d = 30\text{cm}$ et $d = 15\text{cm}$, les courbes ont la même allure: c'est à dire que la tension est maximale quand $a_1/d = 0\%$, et minimale quand $a_1/d = 100\%$. Mais pour les mêmes positions, c'est la distance $d = 30\text{cm}$ qui donne la tension la plus élevée.



(Figure 26) Influence de la distance pointe-plan sur la position maximale d'une barrière de 50 cm de largeur et 5mm d'épaisseur.

Détermination de d'_{geom} et de U_d quand :
 $d' < 30\text{cm}$ et $30\text{cm} \leq d' \leq 250\text{cm}$



(Figure 27)

Une première remarque à faire est que la tension disruptive augmente quand la distance pointe-plan croît. Ceci est observé pour nos trois distances (30cm, 15cm, 9,5cm). Ce point est vérifié par le fait que le canal de décharge s'allonge quand la distance pointe-plan augmente.

Le calcul de d' géom. pour une barrière de 50cm de largeur et 5mm d'épaisseur, pour la position $a_1/d = 0\%$ montre que d' géom. décroît avec la distance pointe-plan; et on trouve pour $d = 30\text{cm}$, $d = 15\text{cm}$ et $d = 9,5\text{cm}$ respectivement : d' géom. = 55cm, d' géom. = 40cm et d' géom. = 24,5cm.

Mais le point le plus important se situe dans l'intervalle :

$0\% \leq a_1/d \leq 20\%$. Dans cet intervalle, la variation de la tension disruptive en fonction de la position de la barrière change d'allure quand la distance pointe-plan atteint une certaine valeur en diminuant (figure 28). En effet, quand la distance pointe-plan atteint une certaine valeur inférieure à 15cm, le maximum de tension n'est plus obtenu pour la position 0%, mais pour 20%. Par conséquent, la tension disruptive ne dépend pas seulement de la largeur et de la position de la barrière, mais aussi de la distance pointe-plan.

En faisant varier la distance pointe-plan, il apparaît que nos caractéristiques changent d'allure. Le rapport L/d nous renseigne sur l'effet de la variation de la distance sur la tension disruptive pour une barrière de largeur L constante égale à 50cm.

On trouve pour les distances 30cm 15cm et 9,5cm, respectivement :

$$L/d = 1,6, \quad L/d = 3,3 \quad \text{et} \quad L/d = 5,3.$$

On voit que quand L/d augmente, les caractéristiques changent d'allure et le maximum n'est plus en position 0% mais tend à se déplacer vers la position $a_1/d = 20\%$.

3-7 - EQUIVALENCE DE L'ARRANGEMENT POINTE-BARRIERE-PLAN.

Le tableau (T19) représente les valeurs de d' géométrique trouvées selon la figure 27. (d' géom. = $\sqrt{a_1^2 + L^2/4} + a_2$).

Pour d' géom. ≥ 30 cm, on utilise la formule de ROTH pour déduire la tension disruptive correspondante. Pour d' géom. < 30 cm, on utilise la caractéristique selon la figure 27.

Pour chaque position de la barrière d'épaisseur $e = 5$ mm, on note la tension disruptive U_{dB} correspondante et $U_{d'}$ selon la formule de ROTH.

Pour pouvoir évaluer l'erreur commise en faisant l'équivalence :

$$U_{dB} = U_{d'}, \text{ on a calculé le rapport : } \xi = \frac{|U_{dB} - U_{d'}|}{U_{dB}} = (\%).$$

On voit alors que pour $d' \geq 30$ cm, les tensions disruptives U_d et $U_{d'}$ sont voisines; et l'erreur commise sur l'ensemble des positions utilisées est très petite. Ceci est vrai pour $d = 30$ cm et $L = 50$ cm, 40cm, 30cm et 20cm. Ainsi, l'équivalence entre U_d et $U_{d'}$ est vérifiée et on peut alors affirmer qu'un arrangement pointe-plan de 30cm, avec une barrière isolante est équivalent à un intervalle pointe-plan sans barrière. Par contre, l'équivalence n'est plus possible quand la distance pointe-plan est inférieure à 30cm car l'erreur devient importante. Pour les distances de 15cm et de 9,5cm, il y a des positions où l'erreur est très importante; et l'équivalence n'est plus vraie.

Les tableaux (T20) et (T21) montrent les calculs faits à cet effet pour les différentes positions de la même barrière utilisée en (T19).

On voit que l'erreur devient de plus en plus grande quand la barrière se rapproche du plan. Par exemple pour $d = 15$ cm, l'erreur commise en position 100% = a_1/d est de 34% et pour $d = 9,5$ cm, avec une même barrière, l'erreur commise pour la même position est de 83% ce qui est considérable.

On voit ainsi que l'équivalence devient impossible quand la distance pointe-plan diminue et l'équivalence de l'arrangement pointe-barrière-plan ne peut se faire, que quand la distance est supérieure ou égale à 30cm.

Ce troisième résultat peut nous renseigner sur les intervalles d'isolation qu'on peut obtenir pour une position de la barrière donnée dans un intervalle -le pointe-plan supérieur ou égal à 30cm.

CONCLUSIONS:

Notre étude nous a permis de vérifier l'influence de barrières isolantes dans trois intervalles d'air pointe-plan différents. Ce travail peut constituer un complément de références sur l'étude de l'influence des barrières dans des intervalles inférieurs ou égaux à 30cm.

Certains travaux (2), ont montré que pour des distances comprises dans l'intervalle $40\text{cm} \leq d \leq 120\text{cm}$, le maximum de tension est obtenu en position $a_1/d = 20\%$ pour les tensions: alternative (50Hz), de choc de foudre ($+1,2/50 \mu\text{S}$) et de choc de manoeuvre ($+170/2500 \mu\text{S}$).

Dans notre étude, le premier résultat important est de trouver que le maximum de tension a changé de position pour les distances de 30cm et de 15cm; c'est à dire : $a_1/d = 0\%$.

Une conclusion peut être alors tirée sur l'intervalle $15\text{cm} \leq d \leq 30\text{cm}$, pour dire que le maximum de tension est obtenu en position 0% pour les barrières en plexiglass dont les largeurs n'excèdent pas 50cm. Par contre, pour la distance de 9,5cm, on retrouve une similitude entre les résultats donnés pour les distances appartenant à l'intervalle $40\text{cm} \leq d \leq 120\text{cm}$ (2) et ce qui a été trouvé dans notre étude. Ainsi, quand la distance pointe-plan diminue, et que la largeur de la barrière reste constante, il existe une distance pointe-plan à partir de laquelle, les caractéristiques $U_d = f(a_1/d)$ changent d'allure. Et par conséquent, le maximum de tension initialement trouvé en position 0% , se trouve déplacé vers la position 20% .

L'ensemble de ces constatations nous a renseigné sur les différentes phases d'études à entreprendre avant d'utiliser une barrière dans la technique d'isolation.

Il se dégage alors trois paramètres importants parmi tant d'autres (que notre étude n'a pas touché par manque de temps).

En se basant sur la nature de nos barrières, il est important de définir et de connaître :

- 1°) - La distance pointe-plan (d) avant tout, pour savoir dans quel intervalle de positions se situe notre maximum de tension.
- 2°) - La largeur (et éventuellement l'épaisseur) de la barrière pour connaître la longueur du canal de décharge maximal, (une fois la distance pointe-plan connue).
- 3°) - La position de la barrière à l'intérieur de l'intervalle d'air (une fois la distance et la largeur connues).

En plus de ces trois constatations on a pu aussi vérifier que la formule de ROTH demeure toujours valable pour la distance pointe-plan de 30cm.

Selon la position choisie, on peut connaître à l'avance de combien peut-on retrécir notre intervalle d'isolation, en utilisant une barrière dont les paramètres sont bien définis. On peut par exemple, grâce à l'utilisation des barrières, diminuer la hauteur de bâtiments abritant des appareils de haute-tension; et l'application de barrières isolantes peut se faire dans tous les appareillages électriques de haute-puissance ainsi que dans les sectionneurs et disjoncteurs.

Cette application, peut, du point de vue économique, être bénéfique pour les sociétés de construction de matériel de haute tension. D'autre part, il serait intéressant de poursuivre cette étude de l'influence des barrières pour les distances inférieures ou égales à 30cm en tenant compte de nouveaux paramètres définissant la barrière, tels que la résistivité superficielle, la permittivité relative, ou l'influence de la disposition de la barrière (horizontale ou verticale).

Il serait aussi souhaitable que l'école se dote d'un transformateur d'essais dont la tension soit supérieure à 300kV afin de pouvoir réaliser des essais sur les moyennes distances.

NOTATIONS UTILISEES :

U_{dm} : Tension disruptive mesurée (avec barrière)

U_{dn} : Tension disruptive normalisée (avec barrière)

a_1 : Distance pointe-barrière

d : Distance pointe-plan

U_{dsb} : Tension disruptive pointe-plan sans barrière

U_{dglm} : Tension d'apparition des décharges glissantes mesurée

U_{dgln} : Tension d'apparition des décharges glissantes normalisée

$$\varepsilon = \frac{|U_{db} - U_{d}|}{U_{db}} \cdot 100\%$$

d= 30 cm
 e= 8 mm
 L= 50 cm

(T1)

a1/d (%)	U _{dn} (KV)MAX	U _{dn} (KV)MAX	($\frac{U_d}{U_{dsb}}$) _n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	234,7	241,7	1,69	P= 762 mm Hg ts= 18°C th= 12°C kd= 1,006 kh=1,036
20	229,8	236,7	1,66	
40	212,2	218,5	1,53	
60	197,9	203,8	1,43	
80	185,3	190,8	1,33	
100	169,7	174,7	1,22	

d= 30 cm
 e= 8 mm
 L= 40 cm

(T2)

a1/d (%)	U _{dn} (KV)MAX	U _{dn} (KV)MAX	U _d /U _{dsb}	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	217,8	225,6	1,58	P= 762 mm Hg ts= 17,5 °C th= 11,5 °C Kd= 1,0086 Kh= 1,0450
20	206,5	213,9	1,50	
40	192,3	199,2	1,40	
60	178,9	185,3	1,30	
80	171,2	177,4	1,24	
100	166,2	172,2	1,20	

d= 30 cm

e= 8 mm

L= 30 cm

(T3)

a1/d(%)	U _{dm} (KV)MAX	U _{dn} (KV)MAX	(U _d /U _{dsb}) _n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	200,8	203,3	1,42	P = 764 mm Hg ts= 17°C th= 12°C Kd= 1,0125 Kh= 1,0250
20	187,4	189,7	1,33	
40	170,4	172,7	1,20	
60	165,5	167,5	1,17	
80	158,4	160,4	1,12	
100	152,7	154,6	1,08	

d= 30 cm

e= 8 mm

L= 20 cm

(T4)

a1/d(%)	U _{dm} (KV)MAX	U _{dn} (KV)MAX	U _d /U _{dsb}	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	175,4	180	1,26	P = 764 mm Hg ts = 17°C th = 11,5°C Kd = 1,0125 Kh = 1,0400
20	156,3	158,3	1,11	
40	151,3	153,2	1,07	
60	144,2	146	1,02	
80	141,4	143,2	1,00	
100	138,6	140,3	0,98	

d = 30 cm
 e = 8 mm
 L = 10 cm

(T5)

a1/d (%)	Udm(kV)MAX	Udn(kV)MAX	(Ud/Ud sb)n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	149,9	151,8	1,06	P= 764 mmhg
20	142,1	143,9	1,00	ts= 17°C
40	138,6	140,4	0,98	th= 11,5°C
60	135,7	137,4	0,96	kd= 1,0125
80	135,7	137,4	0,96	kh= 1,0400
100	135,7	137,4	0,96	

d = 30 cm
 c = 5 mm
 L = 50 cm

(T6)

a1/d (%)	Udn(kV)MAX	Udn(Kv)MAX	(Ud/udsb)n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	241,8	250,7	1,75	P = 764 mm Hg ts= 18°C th= 11,5 °C Kd=1,0089 Kh=1,0460
20	223,4	231,6	1,62	
40	202,2	209,6	1,47	
60	189,5	205,8	1,44	
80	183,8	190,5	1,33	
100	176,8	183,3	1,28	

d = 30 cm
 e = 5 mm
 L = 40 cm

(T7)

a1/d (%)	Udm(KV)MAX	Udn(KV)MAX	Ud /Udsb	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	214,9	210,2	1,47	P= 761 mm Hg ts= 16°C th= 14,5°C kd= 1,0122 kh= 0,9900
20	203,6	199,2	1,40	
40	189,5	185,3	1,30	
60	180,3	176,3	1,23	
80	169,7	166	1,16	
100	164	160,4	1,12	

d= 30 cm
e= 5 mm
L= 30 cm

(T8)

a1/d(%)	Udm(kV)MAX	Udn(kV)MAX	(Ud/Udsb)m	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	198	200,3	1,40	P= 761mmhg
20	181	183	1,28	ts=17°C
40	168,3	170,2	1,20	th=13°C
60	159,8	161,6	1,13	kd=1,0035
80	154	155,7	1,09	Kh=1,0200
100	154	155,7	1,09	

d= 30 cm
e= 5 mm
L= 20 cm

(T9)

a1/d(%)	Udm(kV)MAX	Udn(KV)MAX	Ud/ Udsb	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	171	175,4	1,22	P= 761 mm hg
20	165,5	169,7	1,18	ts= 18°C
40	157	161	1,12	th= 14°C
60	150	153,8	1,07	Kd= 0,9946
80	147	150,7	1,05	kh= 1,0200
100	145,6	149,3	1,04	

d = 30 cm
e = 5 mm
L = 10 cm

(T10)

a1/d (%)	Udn(kV)MAX	Udn(kV)Max	(Ud/Ud sb)n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	161,2	165,5	1,16	P = 761 mm hg
20	142,8	146,7	1,03	Ts= 18,5°C
40	141,4	145,3	1,01	th= 14,5°C
60	140,7	144,5	1,01	kd= 0,9928
80	140	143,8	1,00	kh= 1,0200
100	139,3	143	1,00	

d = 30 cm

e = 2 mm

L = 50 cm

(T11)

a1/d (%)	U _{dn} (kV)MAX	U _{dn} (kV)MAX	(U _d /U _{dsb}) _n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	223,5	222,4	1,56	P = 761 mm hg ts= 21°C th= 17°C kd= 0,9947 kh= 0,9900
20	212,3	211,2	1,43	
40	200,3	199,3	1,40	
60	188	187,2	1,31	
80	185,3	184,4	1,30	
100	166,3	166	1,16	

d = 30 cm

e = 2 mm

L = 40 cm

(T12)

a1/d (%)	U _{dn} (kV)MAX	U _{dn} (kV) MAX	U _d /u _{dsb}	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	212,3	211,3	1,43	P = 761 mm hg ts= 21°C th= 17,5°C kd= 0,9839 kh= 0,9800
20	206,5	205,6	1,44	
40	196,6	195,3	1,37	
60	181	180,3	1,26	
80	171	170,4	1,20	
100	162,6	162	1,13	

d= 30 cm

e= 2 mm

L= 30 cm

(T 13)

a1/d (%)	U _{dm} (KV)MAX	U _{dn} (KV)MAX	(U _d /u _{dsb}) _n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	199,4	198,6	1,39	P= 761 mm Hg ts=21°C th=17,5°C Kd=0,9839 Kh=0,9800
20	188	187,3	1,31	
40	178,2	177,5	1,24	
60	169,7	169	1,18	
80	158,4	157,7	1,10	
100	157	156,3	1,09	

d= 30 cm

e= 2 mm

L= 20 cm

(T14)

a1/d (%)	U _{dm} (KV)MAX	U _{dn} (KV) MAX	U _d /U _{dsb}	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	181	180,3	1,26	P= 761 mm Hg ts= 21°C th= 17,5°C Kd= 0,9839 Kh= 0,9800
20	164	163,4	1,14	
40	159,8	159,2	1,11	
60	157	156,3	1,09	
80	152,7	152	1,06	
100	148,5	148	1,03	

d = 30 cm

e = 2 mm

L = 10 cm

(T 15)

a1/d (%)	U _{dm} (kV)MAX	U _{dn} (kV)MAX	(U _d /U _{d sb}) _n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	162,6	160	1,12	P = 759 mmHg ts= 20°C th= 16,5°C kd= 0,9950 kh= 0,9800
20	152,7	150,4	1,05	
40	147	144,7	1,01	
60	146,4	144,2	1,01	
80	142,8	140,6	0,98	
100	142,2	140	0,98	

d= 15 cm
e= 5 mm
L= 50 cm

(T 16)

a_1/d (%)	U _{dm} (Kv)MAX	U _{dn} (Kv)MAX	(U _d / √uds _b)n	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES
0	150	149,9	2,05	P= 756 mm hg t _s =20,2 °C t _h =16,8 °C k _d =0,9904 k _h =0,9900
20	140	139,9	1,92	
40	138,5	138,4	1,89	
60	133	132,9	1,82	
80	118,8	118,7	1,62	
100	93,4	93,3	1,28	

d= 9,5 cm
e= 5 mm
L= 50cm

(T 17)

a1/d (%)	U _{dm} (kV)MAX	U _{dn} (kV)MAX	(U _{dn} /U _{dsb})n	Corrections Atmosphériques
0	121,6	124,8	2,32	P=756mm hg
20	124,4	127,7	2,37	t _s =21°C t _h =17°C
60	94,7	97,3	1,81	kh=1,0140
100	65	66,7	1,24	kd=0,9876

d= 9,5 cm
e= 5 mm
L= 40 cm

(T 18)

a1/d (%)	U _{dm} (kV)MAX	U _{dn} (kV)MAX	(U _{dn} /U _{dsb})n	Corresctions Atmosphériques
0	113	116	2,16	P=756mm hg
20	106	108,8	2,02	t _s =21°C t _h =17°C
60	96	98,6	1,84	kh=1,0140
100	59,4	61	1,13	kd=0,9876

d=30cm e= 5cm	L (cm)	a/d (%)	d' géom (Cm)	Ud' (KV)MAX	Udb (KV)MAX	ε (%)
	50	0	55	261,2	250,7	4,1
		20	49,7	236	231,6	1,8
		40	45,7	217	209,6	3,5
		60	42,8	203,3	205,8	1,2
		80	40,6	192,8	190,8	1
		100	39,05	185,5	183,3	1,2
	40	0	50	237,5	210,2	13
		20	44,8	213	199,2	6,9
		40	41,3	198,5	185,3	7,1
		60	38,9	184,7	176,3	4,7
		80	37,24	176,8	166	6,5
		100	36	171	160,4	6,6
	30	0	45	213,7	200,3	6,6
		20	40,1	190,5	183	4
		40	37,2	176,7	170,2	3,8
		60	35,4	168	161,6	3,9
		80	34,3	163	155,7	4,6
		100	33,5	159	155,7	2
	20	0	40	190	175,4	8,3
		20	35,6	169	169,7	0,4
		40	33,6	159,6	161	0,8
		60	32,6	154,8	153,8	0,6
		80	32	152	150,7	0,8
		100	31,6	150	149,3	0,4

d= 15 cm

e= 5 mm

(T 20)

L (cm)	a/d (%)	a' (cm)	Ud' (KV) MAX	UdB (KV)MAX	ϵ (%)
50	0	40	190	149,9	27
	20	37	175,7	139,9	25,5
	40	34,7	164,8	138,4	19
	60	32,5	154,3	132,9	16
	80	30,7	145,8	118,7	22,8
	100	29	134	93,4	34

d= 30 cm

e= 5 mm

(T 21)

L (cm)	a /d (%)	a' (cm)	Ud' (KV) MAX	UdB (KV)MAX	ϵ (%)
50	0	34,5	163,8	124,8	31,2
	20	32,6	155,2	127,7	21,5
	60	29,4	134	97,3	37,7
	100	26,4	122	66,7	83,4
40	0	29,5	134	116	15,5
	20	27,6	126	108,8	15,8
	60	24,6	117	98,6	18,6
	100	22,1	108	61	77

e = 8 mm

(T22)

L (cm)	50	40	30	20	CORRECTION
Udglm(kV)MAX	65	55	45	43,8	Kh=1,0140
Udgln(kV)MAX	66,7	56,5	46,2	45	kd=0,9876

e = 5 mm

(T23)

L (cm)	50	40	30	20	CORRECTION
Udglm(kV)MAX	53,7	51	45	39,5	kh=1,0140
Udgln(kV)MAX	55	52,3	46,2	40,5	kd=0,9876

e = 2 mm

(T24)

L (cm)	50	40	30	20	CORRECTION
Udglm(kV)MAX	53	48	37,5	32	Kh=1,0140
Udgln(kV)MAX	54,4	49,4	38,5	32,8	kd=0,9876

Tensions d'apparition des décharges glissantes pour les différentes épaisseurs et largeurs.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) - L.L. ALSTON - D.J. TEDFORD : High voltage technology
oxford university press 1968
- (2) - A. BOUBAKEUR : Influence des barrières sur la tension de décharge
disruptive des moyens intervalles d'air-pointe-plan
thèse de doctorat - VARSOVIE 1979 -
- (3) - M. AGUET : Traité d'électricité. Volume 22 - Haute tension -
Éditions GEORGI - 1981.
- (4) - K. KÜPFMÜLLER : Électricité théorique et appliquée -
DUNOD - PARIS 1959.
- (5) - H. ROSER : Schirme zur erhöhung der durchschlagspannung in luft.
E.T.Z - 1932 - H.17 p 411.
- (6) - E. MARX : Der durchschlag der luft im unhomogenen elektrischen
felde bei verschiedenen spannungsarten.
E.T.Z - 1930 - H.33 - p 1161.
- (7) - PHILLIPE ROBERT : Traité d'électricité - matériaux de l'électro-
technique - volume-2 - éditions GEORGI 1979.
- (8) - A. BOUBAKEUR : Discharge phenomena in long air gaps with
insulating screens.
4^e symposium international de haute tension
ATHENS 1983.
- (9) - E. BADAREU - J. POESCU : Gaz ionisés - décharges électriques
dans les gaz dunod PARIS et MERIDIANE
BUCAREST 1965.
- (10) - M.J. SLOSIAR : Matériaux de l'électrotechnique.
E.N.P. d'ALGER 1966.
- (11) - K. FESER : Influence de l'humidité sur la tension disruptive
dans l'air en courant continu et courant alternatif
bulletin de l'A.S.E. N° 6 1972.
- (12) - C.E.I 60-1 : Publication : technique des essais à haute tension -
définitions et prescriptions générales relatives aux
essais 1973.
- (13) - R.G.E : Publication : l'amorçage dans l'air aux grandes distances
1974 t83 n° 11
- (14) - S. KALACHNIKOV : Électricité - édition MIR-MOSCOU-1980
- (15) - S. WHITEHEAD : Diélectric breakdown of solids OXFORD, CLAREDON - PRESS
1951.
- (16) - A. BOUBAKEUR - A. HEROUAL : Cours de haute tension. (

NOM : BOUTLENDJ
PRENOM : MOHAMED
PROMOTEUR : A. BOUBAKEUR

RESUME :

Ce sujet fait partie du domaine de la haute tension. Il traite de l'influence de barrières isolantes sur la tension disruptive, d'un intervalle d'air pointe-plan.

L'étude s'est particulièrement penchée sur l'influence de la largeur et de l'épaisseur de la barrière ainsi que de la distance pointe-plan.

SUMMARY :

This subject belongs to the high voltage technology. It treats on the influence of insulating screens in a point-plane air gap on the breakdown voltage.

The special interest of this study is the breadth and the thickness of the screen, and also the distance of the point to plane.

ملخص :
يدخل هذا الموضوع في ميدان التوتر العالي ويعالج تأثير التفريغ في مجال من الهواء بين الرأس والمستوى وقد تركزت هذه الدراسة بالخصوص على سميات المادة العازلة.



