

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Electrique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique
Laboratoire de Haute Tension

Mémoire de Magister

Spécialité : **Génie Electrique**
Option : **Réseaux Electriques et Haute Tension**

Présenté par

BOUBEKKI Boubekur

Ingénieur d'Etat en Génie Electrique (Electrotechnique) à l'ENP

Thème

Mesure du champ électrique dans un système pointe plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre

Soutenu publiquement le 01 Juillet 2006 devant le jury composé des membres :

Président :	R. IBTIOUEN	Professeur, ENP
Rapporteurs :	A. BOUBAKEUR	Professeur, ENP
	A. MEKHALDI	Professeur, ENP
Examineurs :	S. BOUAZABIA	Maître de conférences, USTHB
	L. MOKHNACHE	Maître de conférences, U BATNA
	M. TEGUAR	Maître de conférences, ENP
Invité :	M. GHEZAILI	Phd, CREDEG-SONELGAZ

ملخص:

الهدف من عملنا هذا هو القياس بالطرق التجريبية لشدة الحقل الكهربائي لنظام رأس إبرة - مستوى، و إظهار مدى تأثير حاجز عازل على توزيع الحقل. قمنا بدراسة مختلف خصائص الحاجز كموضعه، طوله، و سمكه. و من اجل إظهار تأثير شحنة الفضاء نأخذ بعين الاعتبار حاجز مثقوب في المركز. لقد استخدمنا لهذا الغرض طريقة الملتقط ذو السعة الموزعة لقياس شدة الحقل في عدة نقاط من المستوي لكل الحواجز المستعملة. النتائج المتحصل عليها في بحثنا قد تؤدي في مجملها إلى تحسين تفسير الأعمال السابقة في نفس المجال و التي أجريت من قبل مخبر التوتر العالي للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات في مجال صلادة المجال الهوائي لنظام رأس إبرة - مستوى.

الكلمات المفتاحية: قياس الحقل الكهربائي، صلادة المجال الهوائي، حاجز عازل، شحنة الفضاء.

Résumé :

L'objectif de notre travail est de mesurer expérimentalement l'intensité du champ électrique au sol dans un système pointe-plan, et montrer l'influence d'une barrière isolante sur la distribution du champ. Nous avons étudié l'influence de différents paramètres de l'écran tels que : sa position, sa largeur et son épaisseur. Pour mettre en évidence l'effet de la charge d'espace, nous considérons également une barrière trouée au centre. Ainsi, nous avons utilisé une sonde à capacité répartie pour déterminer l'intensité du champ en différents points du sol pour les différentes barrières utilisées.

Les résultats de nos travaux contribuent à l'amélioration de l'interprétation des résultats d'investigations précédemment faites au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP dans le domaine de la rigidité des intervalles d'air pointe-plan.

Mots clé : mesure de champ électrique, rigidité des intervalles d'air, barrière isolante, charge d'espace.

Abstract:

The aim of our investigations is to measure practically the electric field intensity on the plane surface of a point-plane arrangement, and show the influence of an insulating barrier on the field distribution. We studied the influence of several parameters of the screen such as: its position, its width and its thickness. To show the effect of the space charge, we considered also a barrier perforated in its middle. Thus, we have used a probe with distributed capacity to determine the field intensity in various points of the ground for various used barriers.

Our investigations contribute to improve the interpretation of investigations results previously carried out at the ENP High Voltage Laboratory in the field of rod- plane air gaps.

Key words: Electric field measurement, air gaps strength, insulating barrier, space charge.

Avant-propos

Les travaux présentés ici, ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Je tiens à remercier chaleureusement Messieurs Ahmed Boubakeur et Abdelwahab Mekhaldi, professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur amabilité, leurs conseils, et pour avoir accepté de diriger ces travaux et de corriger ce document.

Ma reconnaissance va particulièrement à Messieurs Rachid Belaïcha et Madjid Tegar pour leurs conseils utiles qu'ils n'ont cessé de me prodiguer. Ainsi que M^{elle} Mokhmache pour ces conseils judicieux et à la documentation qu'elle m'a fournie.

Je remercie vivement Monsieur Rachid Ibtouen, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique de m'avoir honoré en acceptant la présidence du jury.

Pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de mémoire, je remercie Monsieur Slimane Bouazabia, Maître de conférences à l'USTHB, et Monsieur M. Ghezaili, Phd au centre de recherche CREDEG-Sonelgaz.

Mes vifs remerciements accompagnés de toute ma gratitude vont à Monsieur Yahia Terrafi, Directeur des Travaux Lignes et Câbles de l'Entreprise Nationale des Travaux et Montage Electrique KAHRAKIB, à Monsieur Malek Ait Ali, chef de département Etudes Lignes et Câbles pour leurs conseils et l'aide efficace qu'ils m'ont rendu.

Toute ma reconnaissance à l'ensemble des collègues de travail au sein du bureau d'études de KAHRAKIB, mes amis du département Etudes de Gestionnaire du Réseau et du Transport d'Electricité GRTE, ainsi que tous mes amis étudiants de l'ENP, pour leurs services appréciables et le soutien moral qu'ils m'ont toujours manifestés.

Pour leur encouragement, leur soutien moral et la patience qu'ils m'ont manifesté durant mes études, je remercie fortement ma mère, mon père, mes frères, ma sœur ainsi que tous les membres de ma famille.

Un merci tout particulier à ma fiancée Salihia, qui n'a jamais essayé de me distraire ni me détourner de ce travail, et pour son soutien moral et son encouragement inconditionnels qu'elle me témoigne au quotidien et pour avoir toujours su me motiver.

Puisqu'on ne peut pas être universel et savoir tout ce qu'on peut savoir sur tout, il faut savoir un peu de tout car il est bien plus beau de savoir quelque chose de tout que de savoir tout d'une chose ; cette universalité est la plus belle.

Blaise Pascal

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
1^{er} CHAPITRE	
INFLUENCE D'UNE BARRIERE ISOLANTE SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE	
DE L'AIR.....	5
<i>I.1 INTRODUCTION</i>	<i>5</i>
<i>I.2 PARAMETRES DEFINISSANT LA NATURE DE LA BARRIERE</i>	<i>6</i>
<i> I.2.1 LA RESISTIVITE TRANSVERSALE.....</i>	<i>6</i>
<i> I.2.2 LA RESISTIVITE SUPERFICIELLE.....</i>	<i>6</i>
<i> I.2.3 CONSTANTE DIELECTRIQUE OU PERMITTIVITE RELATIVE(ϵ_r).....</i>	<i>6</i>
<i>I.3 INFLUENCE DES PARAMETRES LIES A L'EFFET DE LA BARRIERE</i>	<i>6</i>
<i> I.3.1 INFLUENCE DU TYPE DE TENSION</i>	<i>7</i>
<i> I.3.2 INFLUENCE DE LA POLARITE DE L'ELECTRODE POINTE</i>	<i>7</i>
<i> I.3.3 INFLUENCE DE LA POSITION DE LA BARRIERE.....</i>	<i>8</i>
<i> I.3.4 INFLUENCE DE LA LARGEUR DE LA BARRIERE.....</i>	<i>8</i>
<i> I.3.5 INFLUENCE DE L'EPAISSEUR ET DE LA PERMITTIVITE.....</i>	<i>8</i>
<i> I.3.6 INFLUENCE DE LA BARRIERE TROUEE</i>	<i>9</i>
<i> I.3.7 INFLUENCE DU MATERIAU DE LA BARRIERE</i>	<i>9</i>
<i> I.3.8 INFLUENCE DE L'ACCUMULATION DE LA CHARGE D'ESPACE</i>	<i>9</i>
<i> I.3.9 INFLUENCE DES PREDECHARGES</i>	<i>10</i>
<i> I.3.10 INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE L'INTERVALLE.....</i>	<i>10</i>
<i> I.3.11 INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE L'INTERVALLE.....</i>	<i>10</i>
<i> I.3.12 INFLUENCE DE LA BARRIERE CONDUCTRICE.....</i>	<i>11</i>
<i>I.4 FORMES DES DECHARGES OBSERVEES DANS LE SYSTEME POINTE-PLAN</i>	
<i>AVEC BARRIERE ISOLANTE</i>	<i>11</i>

I.4.1	DECHARGE DIRECTE	11
I.4.1.1	CAS OU LA DECHARGE PERFORE LA BARRIERE.....	11
I.4.1.2	CAS OU LA DECHARGE CONTOURNE LA BARRIERE.....	11
I.4.2	DECHARGE PAR ETAPES	12
I.5	DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE AU PLAN	14
I.5.1	MODELE DE CALCUL SELON L. MOKHNACHE.....	14
I.5.1.1	EQUATIONS REGISSANT LES CHAMPS ACTIFS DANS LE SYSTEME :.	15
➤	Champ dû à la pointe de HT (E_0)	15
➤	Champ de la charge d'espace E_R par la méthode de Gauss :	16
I.5.1.1	CHAMP RESULTANT EN CHAQUE ZONE DU SYSTEME.....	17
➤	Zone Pointe-Barrière (zone 1)	17
➤	Zone de la barrière (zone 2).....	18
➤	Zone Barrière-Plan (zone 3)	19
I.5.1.3	CONDITIONS AUX LIMITES.....	19
➤	Sur la barrière.....	19
➤	Sur la pointe	20
➤	Sur les limites du domaine	20
I.6	MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE AU PLAN	21
I.6.1	DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UN SYSTEME POINTE PLAN SANS BARRIERE	21
I.6.2	DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UN SYSTEME POINTE PLAN AVEC BARRIERE	23
I.7	CONCLUSION.....	25

2^{ème} CHAPITRE

TECHNIQUES EXPERIMENTALES..... 26

II.1	INTRODUCTION	26
II.2	GENERATION DES ONDES DE CHOC	26
II.2.1	GENERATEUR DE CHOCS	26
II.2.2	TENSION DE CHOC DELIVREE.....	27
II.2.3	DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$	28
II.2.4	CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES.....	29
II.2.4.1	FACTEUR DE CORRECTION DE DENSITE RELATIVE DE L'AIR k_d	29

II.2.4.2	FACTEUR DE CORRECTION DE L'HUMIDITE k_h	29
II.3	ARRANGEMENT POINTE – BARRIERE - PLAN	30
II.4	MESURE DU CHAMP PAR LA METHODE DE LA SONDE A CAPACITES REPARTIES (S.C.R).....	33
II.4.1	CIRCUIT DE MESURE	33
II.4.2	EXPRESSION DU CHAMP MESURE.....	34
II.4.3	DETERMINATION DE LA CONSTANTE DE LA SONDE K_S	36
II.4.4	FORME DES SIGNAUX OBTENUS.....	37
3^{eme}	CHAPITRE	
RESULTATS ET INTERPRETATIONS	39	
III.1	INTRODUCTION	39
III.2	SYSTEME POINTE – PLAN SANS BARRIERE	39
III.2.1	DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$	39
III.2.2	DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE AU PLAN EN FONCTION DE LA DISTANCE AXE DE LA POINTE - AXE DE LA SONDE	42
III.3	SYSTEME POINTE – PLAN AVEC BARRIERE	45
III.3.1	INFLUENCE DE LA POSITION DE LA BARRIERE.....	46
III.3.2	INFLUENCE DE LA LARGEUR DE LA BARRIERE.....	63
III.3.3	INFLUENCE DE LA L'EPAISSEUR DE LA BARRIERE	80
III.3.4	INFLUENCE DE LA BARRIERE TROUEE	87
CONCLUSION GENERALE	97	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Pour des raisons économiques, le recours à des tensions de plus en plus élevées pour le transport de l'énergie électrique a nécessité et nécessitera encore des distances d'isolement dans l'air de plus en plus grandes.

Suivant des conditions atmosphériques données, la disruption de l'air dépend largement de la forme des électrodes et du genre de la tension appliquée. Dans la pratique, la majorité des configurations rencontrées peut être caractérisée, à partir d'une certaine distance entre électrodes, par des géométries à champs non uniforme pointe – pointe ou pointe – plan.

Pour les intervalles relativement petits (inférieurs à 30cm), l'insertion d'une barrière augmente la rigidité diélectrique. Cette idée est déjà ancienne, elle fut remarquée vers les années 1920 par C. P. Steinmetz [1]. D'après les études qui ont été faites, cet emploi doit tenir compte de plusieurs paramètres dont les plus importants sont: la polarité et le genre de tension appliquée, la position de l'écran ainsi que ses dimensions, sa constante diélectrique et sa résistivité superficielle. Vers les années 1930 E. Marx [2] montra que la présence d'une barrière isolante modifie la répartition du champ électrique, et provoque une amélioration notable quand l'écran est placé près de la pointe positive. Quand à la pointe négative, la présence de l'écran est pratiquement sans effet.

Ces résultats ont été confirmés par H. Roser [3] qui explique que l'augmentation de la tension disruptive est surtout due à l'uniformisation du champ électrique entre la barrière et le plan. D'après cet auteur, l'amélioration ne sera bonne que lorsque les charges déposées sur la barrière auront la même polarité que la pointe, ceci est toujours vérifié pour la pointe positive. Dans le cas d'une pointe négative, ceci n'est vérifié que lorsque la barrière est proche de la pointe. Cette constatation a été confirmée par N. F. Wolochtchenko [4] et M. P. Verma [5]. Selon J. M. Meek et M. M. C. Collins [6] la barrière entraîne une modification de l'intensité du champ électrique.

Les études qui ont été faites, après celles de Marx et Roser, ont été orientées vers l'influence de la forme des électrodes sur la rigidité diélectrique de l'air, la distribution du

champ électrique dans l'arrangement pointe-barrière-plan, et les types de décharges, ainsi que la géométrie et la nature de la barrière.

N. N. Tikhodeev [7] fut le premier à avoir confirmé que l'amorçage des intervalles d'air pointe-plan avec barrière a eu lieu en différentes étapes; il y a tout d'abord la rupture de l'intervalle pointe-barrière, suivi par celle de l'intervalle barrière-plan qui apparaît en même temps que la rupture totale. Des informations plus précises sur l'existence des différentes phases de l'amorçage ont été données par M. Abou Alia [8] et complétées par H. Remde [9] qui a orienté ces recherches vers l'influence des éléments du circuit d'essais. Remde étudia aussi, de même que J. Pilling [10] et Tikhodeev [7], l'influence des dimensions de la barrière et de sa constante diélectrique. J. Pilling a remarqué l'influence de la constante diélectrique et de l'épaisseur sur la distribution des porteurs de charge positive et la chute de tension sur la surface de l'écran isolant. Quand la constante diélectrique et l'épaisseur augmentent, la ramification des streamers s'élargit de plus en plus et le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme. Selon Tikhodeev, la densité de charge superficielle n'est pas uniforme, et diminue en se dirigeant vers les bords de la barrière.

En 1979 A. Boubakeur [11] a montré que la barrière est à la fois un obstacle électrostatique et géométrique. Concernant l'obstacle électrostatique, l'auteur a utilisé une barrière trouée au centre pour vérifier l'influence de la charge électrique déposée sur la barrière. Aussi, il a étudié l'influence d'une barrière polluée recouverte d'une couche semi conductrice ou d'une couche conductrice, sur la rigidité diélectrique du système. Il a mis en évidence le type de décharge disruptive : par étapes ou directe.

La décharge par étape est composée de trois phases : la décharge pointe barrière, le contournement de la barrière par décharges glissantes, puis la décharge barrière – plan.

La décharge directe se fait en une seule étape entre la pointe, le bord de la barrière et le plan. Dans ce dernier cas de décharge, le système pointe – barrière – plan a pratiquement la même rigidité que le système pointe – plan dont la distance inter-électrodes est égale à la longueur de la décharge directe du système avec barrière.

D'autres recherches ont été effectuées par M. Awad [12] en 1975 en ce qui concerne les barrières polluées.

Ces différents travaux de recherche s'intéressent au cas des barrières placées perpendiculairement à l'axe des électrodes. Pour d'autres configurations d'électrodes, nous pouvons citer les travaux de K. Nowacki [13]. Cet auteur a étudié les variations de la tension

disruptive de l'air entre deux électrodes pointues, pour des intervalles d'air inférieurs ou égaux à 20cm, en présence de deux écrans isolants. Cette étude a été réalisée sous tension de chocs de foudre, 50hz et tension continue. Le changement dans le comportement de l'amorçage de l'air dépend des propriétés diélectriques et de la position des écrans. Quand les écrans sont très proches des électrodes, les décharges superficielles sur leur surface se transforment facilement en étincelle glissante provoquant la rupture totale. De ce fait, la tension disruptive se trouve diminuée.

Ainsi l'augmentation de la tension de décharge disruptive n'a été le plus observée que dans le cas du système pointe – plan, en polarité positive et sous tension alternative. Cette augmentation a été généralement attribuée à l'uniformisation du champ entre la barrière et le plan. Par conséquent la mesure et le calcul de champ revêtent une grande importance dans l'interprétation des phénomènes observés.

La mesure de champ est faite généralement à l'aide d'une sonde capacitive. Plusieurs travaux de recherche [14 à 18] ont porté sur la mesure du champ électrique en utilisant des sondes polarisées ou des sondes à capacités réparties. Les travaux les plus récents sont ceux effectués par S. Mouhoubi [14, 15] et concernent le cas des systèmes pointe – barrière – plan sous tension continue. D'autres travaux [19 à 25] ont porté sur le calcul du champ électrique en utilisant différentes méthodes, telle que la méthode des éléments finis. En effet, un certain nombre de modèles mathématiques décrivant les processus qui se déroulent en chaque phase de la décharge est proposé. Cependant tous ces modèles décrivent des phases séparées et ne peuvent donc pas être combinés dans un modèle général capable de prédire le comportement de l'intervalle d'air sous des tensions définies.

Ces modèles s'appuient soit sur le critère de Townsend, soit sur ceux de Meek et Reather [26, 27].

Nos travaux de recherche ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, dans le cadre des activités de recherche programmées dans le Laboratoire de Recherche en Electrotechnique. Ils constituent un complément aux travaux de S. Mouhoubi et concernent la mesure du champ électrique à la surface de l'électrode plane d'intervalles d'air pointe – plan aux chocs de foudre positif et négatif. Nous nous intéressons à l'influence de différents paramètres, telles que la position de la barrière, sa largeur et son épaisseur, sur la distribution du champ électrique sur le plan.

Dans le but de mettre en évidence l'effet de la charge d'espace et son influence sur la mesure du champ électrique, nous avons également considéré le cas d'une barrière trouée en son milieu.

Cette étude est subdivisée en trois chapitres. Dans un premier chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur l'influence des barrières sur la rigidité diélectrique de l'air ainsi que les principaux résultats d'investigation déjà trouvés sur la distribution du champ électrique sur le plan.

Le deuxième chapitre présente le circuit d'essai, la méthode d'essais ainsi que les caractéristiques des différents équipements utilisés pour la mesure.

Dans le troisième et dernier chapitre de notre travail, nous présentons les résultats d'essais, ainsi que leurs interprétations.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

INFLUENCE DE LA BARRIERE ISOLANTE SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR

INFLUENCE D'UNE BARRIERE ISOLANTE SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DE L'AIR

I.1 INTRODUCTION

L'air en tant que diélectrique, est largement rencontré comme unique isolation entre électrodes dans la technique de haute tension. Ces électrodes peuvent être soit les parties métalliques de différents appareillages sous tension, soit des conducteurs de lignes aériennes ou des bornes à haute tension dans les laboratoires d'essais.

En pratique, la majorité des configurations des électrodes peut être caractérisée par les géométries à champ électrique non uniforme: pointe-pointe ou pointe-plan ou par celle qui possède la rigidité électrique intermédiaire. De toutes ces configurations, seule la géométrie pointe-plan est la plus défavorable en ce qui concerne la rupture diélectrique de l'air qui se manifeste dans ce cas aux plus faibles tensions quand la polarité de la pointe est positive.

La présence d'un écran isolant entre les deux électrodes transforme l'intervalle d'air initial en un système stratifié composé de deux diélectriques (air - barrière) et l'avantage fourni par l'utilisation des barrières est l'augmentation de la rigidité diélectrique du système.

Ce chapitre constitue une synthèse bibliographique succincte sur l'utilisation des barrières.

Nous présentons d'abord l'influence des barrières sur l'amorçage des intervalles d'air, puis certains résultats de mesure de champ et un modèle de calcul numérique de champ.

1.2 PARAMETRES DEFINISSANT LA NATURE DE LA BARRIERE

Les écrans isolants de natures différentes n'ont pas 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.

1.2.1 LA RESISTIVITE TRANSVERSALE

La résistivité transversale d'un matériau isolant est la résistance d'un élément de ce matériau de 1cm² de section et 1cm de long [28]. Elle s'exprime généralement en ($\Omega.cm$)

Cette résistivité détermine le courant de fuite à travers l'isolant. 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.

1.2.2 LA RESISTIVITE SUPERFICIELLE

Elle est définie comme étant la résistance de la surface de l'isolant. Elle s'exprime en Ohm par unité de surface. Elle dépend du degré d'humidité du milieu ambiant et de l'état de surface 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.

1.2.3 CONSTANTE DIELECTRIQUE OU PERMITTIVITE RELATIVE(ϵ_r)

Elle est définie 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 :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_v} \quad (I.1)$$

1.3 INFLUENCE DES PARAMETRES LIES A L'EFFET DE LA BARRIERE

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 I.1**)

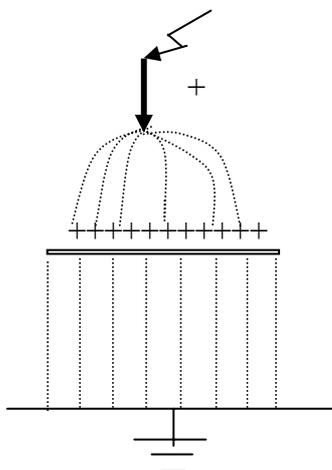


Figure I.1 Déformation du champ électrique en présence de la barrière.

La répartition du champ électrique subit une déformation en provoquant une augmentation importante de la tension disruptive du système et une amélioration notable quand l'écran est placé près de la pointe positive.

1.3.1 INFLUENCE DU TYPE DE TENSION

La rigidité diélectrique dépend de l'amplitude et de la forme de la tension appliquée aux électrodes.

Dans le cas des petits intervalles d'air (inférieurs à 1m), beaucoup de travaux de recherches ont été effectués aussi bien sous tension continue, que sous tension alternative ou de choc de foudre. En ce qui concerne les longs intervalles d'air, les travaux ont été surtout effectués sous la contrainte de tension la plus défavorable, représentée par les chocs positifs de manœuvres à durée de front relativement longue [11].

1.3.2 INFLUENCE DE LA POLARITE DE L'ELECTRODE POINTE

Comme il a été déjà mentionné, l'influence de la barrière était particulièrement remarquée pour une polarité positive ou dans le cas de la pointe sous tension alternative.

Avec la polarité négative, la décharge est en étapes pour toutes les positions de la barrière, et aucune augmentation de la tension disruptive n'est obtenue. Les décharges apparaissent dans ce cas des deux cotés 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 la barrière est négligeable [29].

En définitif, l'amélioration n'a été obtenue que pour une polarité positive de la pointe, ou à 50 Hz.

1.3.3 INFLUENCE DE LA POSITION DE LA BARRIERE

La tension disruptive des petits intervalles d'air allant jusqu'à 40 cm varie essentiellement en fonction de la position de la barrière [16]. Cette tension passe par un maximum quand la barrière est près de la pointe.

Certain travaux [11,21, 30 à 33] ont montré que pour des intervalles d'air 'd' de 15 à 30 cm, le maximum de tension est obtenu en position où la barrière est colée avec la pointe ($a/d=0\%$; a : distance entre la pointe et la barrière, d : longueur de l'intervalle inter électrodes).

Ce résultat est valable dans le cas où la largeur des barrières n'excède pas 50 cm.

Pour les moyens intervalles d'air de 40 cm à 200 cm, l'introduction d'une barrière isolante à surfaces propres conduit à une augmentation considérable de la tension disruptive du système quand elle est située particulièrement à 20% de l'intervalle à partir de la pointe [11].

1.3.4 INFLUENCE DE LA LARGEUR DE LA BARRIERE

Quand la largeur de la barrière n'est pas suffisamment grande par rapport à la distance inter-électrode, la rigidité diélectrique de l'arrangement (pointe-barrière-plan) dépend de la largeur du canal de décharge. Géométriquement, cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière-plan.

L'augmentation maximale de la tension disruptive, dans ce cas, est obtenue quand la barrière est pratiquement en contact avec l'électrode pointue [11].

Les types des décharges dépendent essentiellement de la distance entre électrodes et de la largeur de la barrière.

1.3.5 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR ET DE LA PERMITTIVITÉ

Ces deux paramètres ont une influence sur la distribution des porteurs positifs et sur la chute de tension sur la surface de la barrière. Quand ces deux paramètres auront des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, mais

l'influence de ces paramètres est beaucoup moins importante par comparaison à l'effet de la largeur et de la position de la barrière [11].

1.3.6 INFLUENCE DE LA BARRIERE TROUEE

A. Boubakeur [11] a travaillé sur des barrières trouées en leur centre. Il a remarqué que la barrière a un rôle d'obstacle géométrique au développement direct de la décharge et que la charge d'espace sur la barrière joue le rôle d'obstacle électrostatique en ce qui concerne les trous de barrière. En effet, la décharge ne tend pas à passer par un trou de faible diamètre ($\phi < 20\text{mm}$), probablement à cause de la forte concentration de la charge d'espace au centre de la barrière. Ainsi la décharge contourne la barrière au lieu de suivre le plus court chemin, passant par le trou.

1.3.7 INFLUENCE DU MATERIAU DE LA BARRIERE

M. V. Sokolova [34] a effectué des mesures des courants de décharges pour des intervalles d'air avec différents matériaux de la barrière. L'analyse des oscillogrammes a montré que chaque impulsion de courant a une structure complexe avec un caractère irrégulier. Ceci reflète le processus de décharge, la décharge se fait sous forme de micro impulsions consécutives. Les deux matériaux utilisés ont la même épaisseur et la même permittivité, mais ils produisent des effets différents sur la rigidité diélectrique de l'intervalle. D'autres auteurs [35] ont étudié l'influence de la nature de la barrière (verre et plexiglas) lorsque la barrière est fixée sur l'électrode mise à la terre d'un système plan-plan. La tension de claquage avec barrière en plexiglas est supérieure à celle avec barrière en verre, cette différence serait due au fait que le claquage se produisait par décharge superficielle, celle-ci se développe plus facilement sur l'isolant de plus grande permittivité ($\epsilon_r \text{ verre} > \epsilon_r \text{ plexiglas}$).

1.3.8 INFLUENCE DE L'ACCUMULATION DE LA CHARGE D'ESPACE

L'accumulation de la charge sur un isolant modifie la distribution du champ et les niveaux de tension de décharge [19]. La modification du champ sur la surface peut mener aux décharges glissantes. Il est incontestablement important de comprendre l'influence de cette accumulation sur la distribution du champ dans les systèmes stratifiés (gaz-solide) [20, 21,22], comme étant un paramètre fondamental pour établir une isolation meilleure.

1.3.9 INFLUENCE DES PREDECHARGES

La propagation des streamers ne mène pas nécessairement à la rupture de l'intervalle d'air, mais ceci influe sur sa tenue diélectrique [27]. Les décharges préliminaires accélèrent le vieillissement de la barrière, comme elles augmentent la quantité de la charge superficielle qui facilite l'apparition des décharges superficielles.

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 et MEEK et glissent sur la surface de l'isolant pour aller vers l'électrode mise à la terre (décharges glissantes).

1.3.10 INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE L'INTERVALLE

Pour les petits et moyens intervalles, la rigidité diélectrique de l'air s'améliore surtout pour les positions relativement loin des deux électrodes. Pour les longs intervalles et pour des positions de la barrière équivalentes à celles dans le cas des petits et moyens intervalles, l'effet de la barrière n'est plus le même. Ceci est dû à l'influence du phénomène physique dénommé 'leader'. Il est matérialisé par un canal qui est observé dès que la distance inter électrodes dépasse 40 à 80 cm selon les conditions expérimentales [36].

1.3.11 INFLUENCE DE LA LONGUEUR DE L'INTERVALLE

En pratique, l'emploi des barrières doit tenir compte des pollutions pouvant éventuellement exister. Pour cela plusieurs études [32, 33] ont été effectuées avec des barrières isolantes recouvertes de couches solides semi-conductrices sèches. Les couches semi-conductrices sur la barrière correspondent aux pratiques de l'emploi de la barrière dans l'air pollué. Dès que la conductivité superficielle des couches semi-conductrices dépasse $1.6\mu\text{S}$ [32, 33], la décharge électrique se développe en deux étapes, comme dans le cas d'une barrière métallique [11,29]. Avec une barrière à surface semi-conductrice, la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan varie entre les valeurs obtenues avec la barrière isolante à surfaces propres et celles obtenues avec la barrière métallique de même forme. Les cas extrêmes [19] ont été observés dans le cas des barrières isolantes recouvertes de couches conductrices de diamètres variable.

1.3.12 INFLUENCE DE LA BARRIERE CONDUCTRICE

L'effet des barrières conductrices a été étudié surtout pour les intervalles d'air relativement longs (supérieurs à 1 m). St. Arnaud et Al [19] ont pu observer une légère amélioration de la rigidité des intervalles d'air, après l'introduction d'une barrière conductrice ayant des bords arrondis. A. Boubakeur [20, 29, 37] a utilisé la barrière conductrice comme cas limite de la barrière isolante polluée. Dans ce dernier cas, il n'y a qu'une très légère augmentation lorsque la barrière touche la pointe, mais une très forte dégradation de la rigidité lorsque la barrière s'éloigne de la pointe. Pour les trois tensions utilisées (tension continue, tension de choc et tension alternative) et lorsque la barrière est en contact avec la pointe ou proche du plan, le champ est pratiquement uniforme entre la barrière métallique et le plan.

1.4 FORMES DES DECHARGES OBSERVEES DANS LE SYSTEME POINTE-PLAN AVEC BARRIERE ISOLANTE

L'évolution et la forme des décharges [11, 29, 30] 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 résistance superficielle de ses deux surfaces, sa position dans l'intervalle et la distance pointe-plan.

1.4.1 DECHARGE DIRECTE

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

1.4.1.1 CAS OU LA DECHARGE PERFORE LA BARRIERE

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) [11].

Quand la barrière est perforée, la décharge se prolonge comme dans le système sans barrière.

1.4.1.2 CAS OU LA DECHARGE CONTOURNE LA BARRIERE

Pour un système pointe positive-plan avec barrière, les streamers [39] 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.

Dans ce dernier cas, la décharge se voit déviée vers le bord de l'écran à cause de l'existence de forces électriques répulsives [11]. (Figure I.2-a)

La mise en évidence de cette forme de décharge a été observée 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 des barrières relativement larges est liée surtout à la polarité de la pointe ainsi qu'à la présence de forces électrostatiques à la surface de séparation de deux milieux isolants (air-barrière) [11].

1.4.2 DECHARGE PAR ETAPES

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 [11].

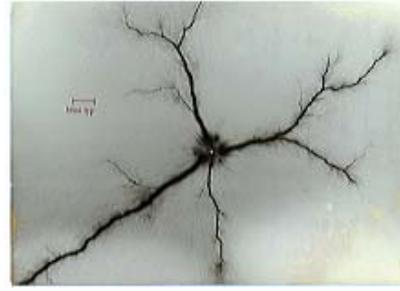
En premier lieu, on distingue l'effet couronne suivi de la décharge pointe-barrière qui constitue la première étape de l'amorçage.

Ensuite, pour un niveau de tension supérieur, on arrive à la seconde étape qui est le contournement de la barrière par les décharges glissantes (Figure I.2-b), et finalement, la troisième et dernière étape est atteinte quand la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan (figure I.2-c).

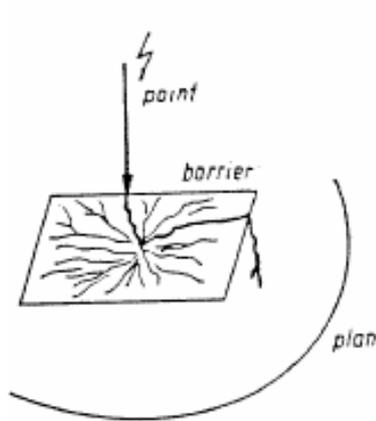
Pour une pointe négative, on a quatre étapes [29], la décharge s'effectue de la pointe vers la barrière. Pour un niveau de tension supérieur, on a le contournement de la barrière par les décharges glissantes. D'autre part, à partir de l'électrode plane apparaît une décharge se dirigeant vers l'autre surface de la barrière et finalement le claquage s'effectue après la rencontre des deux décharges venant de part et d'autre de la barrière (figures I.2-d).



(a) [11]



(b) [11]



(c) [11]



(d) [29]

Figure I.2 : Décharge directe et par étapes (décharge glissante)

(a): décharge directe à 50Hz (intervalle de 1m)

(b): Décharge glissante sous tension de choc de foudre, photographie de contact

(c): Décharge par étapes

(d): Décharge par étapes dans le cas de la pointe sous tension de choc négatif

1.5 DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE AU PLAN

La distribution du champ peut être déterminée à partir du calcul théorique du champ ou par la mesure. Le calcul théorique permet d'obtenir l'intensité du champ dans tout l'espace inter-électrode alors que la mesure le permet à la surface des électrodes.

1.5.1 MODELE DE CALCUL SELON L. MOKHNACHE

La structure générale du système est représentée à la figure (I.3). Le champ électrique en chaque point des différentes zones du domaine est exprimé par les équations suivantes [19, 21, 29, 40 à 46] :

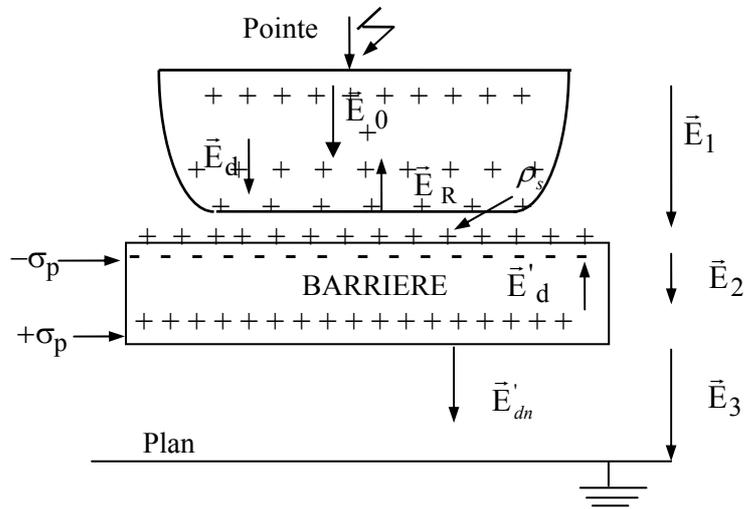


Figure I.3. Les champs actifs dans chaque zone du système

\vec{E}_0 : Champ appliqué.

\vec{E}_R : Champ de réaction de la charge d'espace.

\vec{E}_d : Champ de polarisation de la barrière à l'extérieur du diélectrique.

\vec{E}'_d : Champ de polarisation à l'intérieur de la barrière.

\vec{E}'_{dn} : Composante normale de \vec{E}'_d .

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 + \vec{E}_R + \vec{E}_d \quad (\text{I.2})$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_1 + \vec{E}'_d \quad (\text{I.3})$$

$$\vec{E}_3 = \vec{E}_2 + \vec{E}'_{dn} \quad (\text{I.4})$$

I.5.1.1 EQUATIONS REGISSANT LES CHAMPS ACTIFS DANS LE SYSTEME :

➤ Champ dû à la pointe de HT (E₀)

Sous une tension V, Le champ E₀ est exprimé [19, 25, 26] en coordonnées sphériques allongées (figure I.4) en absence de la barrière par :

$$E_0 = \frac{V}{a \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta} \cdot \sin \theta \cdot \text{Ln}(\text{ctg}(\theta_1/2))} \quad (\text{I.5})$$

Avec

θ_1 : Angle de rayon de courbure de la pointe.

a : Distance inter électrode entre la pointe et le plan.

V : Tension appliquée.

En utilisant les la transformation en coordonnées cartésiennes suivantes :

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \sinh \eta \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi \\ y &= a \cdot \sinh \eta \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi \\ z &= a \cdot \cosh \eta \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (\text{I.6})$$

Dans le cas bidimensionnel : $\Psi=0$ $x = a \cdot \sinh \eta \cdot \sin \theta$

$$z = a \cdot \cosh \eta \cdot \cos \theta \quad (\text{I.7})$$

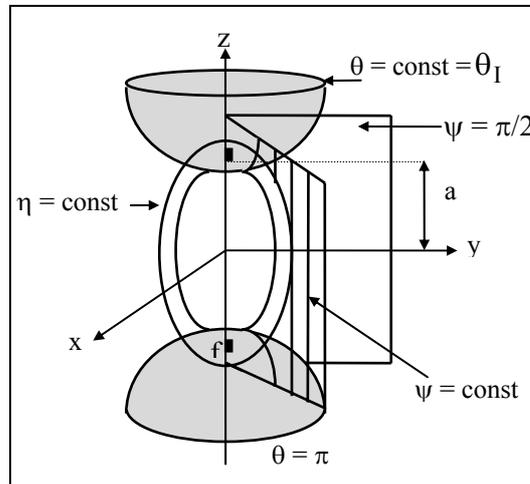


Figure I.4 Système de coordonnées sphériques allongées.

La transformation en coordonnées cartésiennes donne :

$$E_0 = \frac{V}{a \sqrt{(1+c_1) + (1 + \frac{z^2}{a^2 c_1}) \sqrt{1 - \frac{z^2}{a^2 c_1}}} \cdot \text{Incot}(\frac{\theta_1}{2})} \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Avec : } c_1 = \frac{x^2 + z^2 - a^2 + \sqrt{\Delta}}{2a^2} \geq 1$$

$$c_2 = \frac{x^2 + z^2 - a^2 - \sqrt{\Delta}}{2a^2} < 1$$

$$\Delta = (x^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2$$

➤ **Champ de la charge d'espace E_R par la méthode de Gauss :**

La répartition non uniforme de la charge d'espace est due à la dépendance du facteur d'ionisation (α) de la valeur du champ E_0 . Cette répartition impose à approximer le volume occupé par la charge à une géométrie équivalente [25,41].

Dans son étude L. Mokhnache a choisi des demi sphères concentriques dont le centre est la pointe de haute tension (figure I.5).

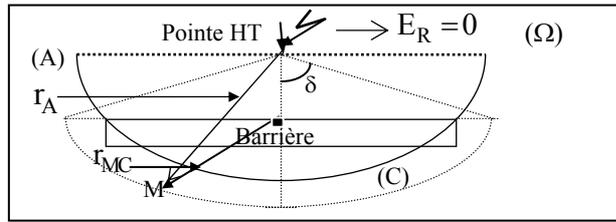


Figure I.5 Calcul de E_R par la méthode de Gauss.

Le rayon de chaque demi sphère décrit un volume dans lequel le facteur d'ionisation α est constant. L'expression générale du champ E_R est donné par :

$$E_R = \frac{\Phi_A}{2\pi \cdot r_A^2} - \frac{\Phi_C}{4\pi \cdot r_{MC}^2 \cdot \alpha} \quad (\text{I.9})$$

$$\Phi_A = \sum_{i=0}^n \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_{r_{i-1}}^{r_i} k_{ch} \cdot \exp(\alpha_i r_i) r_i^2 \sin\theta \cdot dr_i d\theta d\phi \quad (\text{I.10})$$

n : Nombre de rayons des demi sphères concentriques.

k_{ch} : Constante et r_A , r_{MC} sont données sur la figure

r_i : Rayon de la i ème demi sphère concentrique.

α_i : Facteur d'ionisation correspondant à chaque rayon r_i .

$$\Phi_C = \sum_{i=0}^m \frac{q_0 (\exp(\alpha_i r_i) - 1)}{\varepsilon_0} \cdot v_{ci}$$

m : Nombre de rayons des demis sphères qui dépassent la face supérieure de la barrière et v_{ci} c'est le volume limité par la face supérieure de la barrière et r_i .

La forme équivalente de la charge répartie dans une demi sphère concentrique qui coïncide avec les lignes équipotentielles est donnée à la figure (I.6)

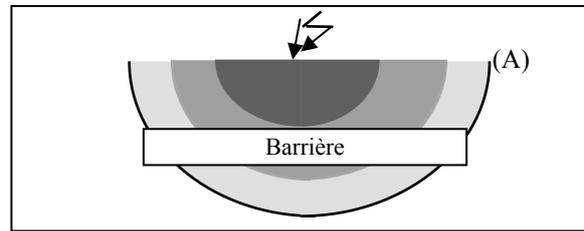


Figure I.6 Répartition continue de la charge d'espace en demi sphères concentriques.

Calcul de la charge d'espace :

Le calcul de la charge d'espace est effectué quand le phénomène d'ionisation a lieu ($\alpha > 0$). Elle est calculée à partir de l'intégrale :

$$Q = \bar{e} \cdot n_0 \left(\exp\left(\int_0^{x_c} \alpha \cdot dx\right) - 1 \right) \quad (\text{I.11})$$

\bar{e} : Charge élémentaire d'un électron

n_0 : Nombre d'électrons à l'instant de l'application de la tension.

x_c : Longueur de l'avalanche calculée à partir de la pointe où le processus d'ionisation a eu lieu par collision d'électrons sous l'action du champ E_0 .

I.5.1.1 CHAMP RESULTANT EN CHAQUE ZONE DU SYSTEME

➤ Zone Pointe-Barrière (zone 1)

Les différents champs actifs dans la zone 1 sont représentés à la figure I.7

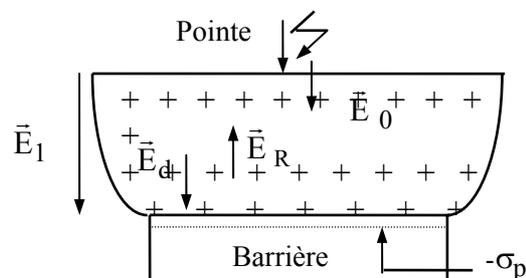


Figure I.7 Champ résultant dans la zone 1

En associant l'équation (I.2) avec celle de Maxwell donnée par :

$$\varepsilon_0 \cdot \text{div} \vec{E}_1 = \rho \quad (\text{I.12})$$

On trouve :

$$\varepsilon_0 \cdot \text{div} \vec{E}_0 + \varepsilon_0 \cdot \text{div} \vec{E}_R - \varepsilon_0 \cdot \Delta \Psi = \rho \quad (\text{I.13})$$

Ψ : potentiel de polarisation.

ρ : densité charge d'espace.

➤ Zone de la barrière (zone 2)

Les différents champs actifs dans la zone 2 sont représentés à la figure I.8

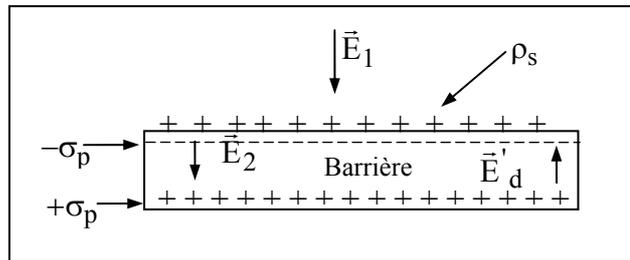


Figure 1.8 Champ résultant dans la zone 2

Dans la barrière on a :

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_1 + \vec{E}'_d \quad (\text{I.3})$$

\vec{E}'_d : Champ dipolaire dans le diélectrique.

\vec{E}_d : Champ dipolaire à l'extérieur du diélectrique.

σ_p : Charge liée superficielle de polarisation, le champ dipolaire n'est pas le même à l'intérieur et à l'extérieur du diélectrique, même en absence d'une charge libre sur l'interface.

ρ_s Charge d'espace superficielle sur la face supérieure de la barrière.

Le champ dipolaire dans la barrière est donné par :

$$E'_d = \frac{-(\varepsilon - \varepsilon_0)(\varepsilon_0 E_{n1} + \rho_s)}{\varepsilon^2} + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} E_{dn} \quad (\text{I.14})$$

E_{dn} et E_{n1} sont respectivement, les composantes normales du champ de polarisation et de E_1 .

D'où
$$\vec{E}_2 = \vec{E}_1 + \left(-\frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)(\varepsilon_0 E_{n1} + \rho_s)}{\varepsilon^2} + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} E_{dn} \right) \vec{j} \quad (\text{I.15})$$

De l'expression (I.14), on constate que lorsque ρ_s augmente, la composante normale du champ dans cette zone s'affaiblit devant la composante tangentielle, ce qui conduit à l'apparition des décharges glissantes superficielles. Celles-ci facilitent l'amorçage de

l'intervalle pointe-plan. Cet état correspond à une position de la barrière très proche de l'électrode HT [29]. La même constatation est faite pour le champ \vec{E}_1 , puisque les composantes tangentielles sont continues.

➤ Zone Barrière-Plan (zone 3)

Les différents champs actifs dans la zone 3 sont représentés à la figure I.9

$$\vec{E}_3 = \vec{E}_2 + \vec{E}'_{dn} \quad (I.4)$$

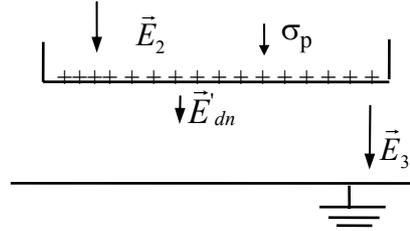


Figure I.9 Champ résultant dans la zone 3

I.5.1.3 CONDITIONS AUX LIMITES

➤ Sur la barrière.

• Faces supérieure et inférieure de la barrière :

La figure I.10 montre le champ de polarisation sur les deux faces de la barrière.

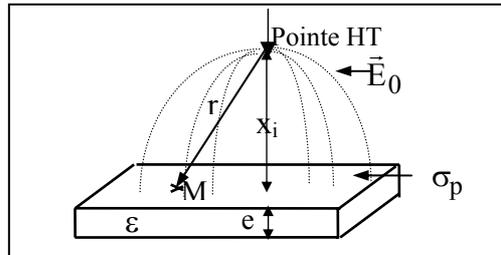


Figure I.10 Champ de polarisation sur les deux faces de la barrière

Le potentiel de polarisation est donné par

$$d\Psi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|\sigma_p|}{r} \cdot dr \quad (I.16)$$

$$\sigma_p = \frac{2(\epsilon_0 - \epsilon)\epsilon_0 a_i}{(\epsilon_0 + \epsilon)r} E_0 \quad (I.17)$$

σ_p : Charge superficielle liée de polarisation.

$$d\Psi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{2(\varepsilon_0 - \varepsilon)\varepsilon_0 a_i}{(\varepsilon_0 + \varepsilon)r^2} E_0 dr \quad (\text{I.18})$$

$$\psi(r) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon}{\varepsilon_0 + \varepsilon} E_0 a_i \ln(a_i^2 + x^2) \quad (\text{I.19})$$

x : Abscisse du point M.

- **Faces latérales**

$$\sigma_p = 0 \Rightarrow \Psi = 0 \quad (\text{I.20})$$

- **Sur la pointe**

$\psi = 0$, car la tension appliquée à la pointe est fixe.

- **Sur les limites du domaine**

$\psi = 0$ Sur le coté supérieur et inférieur.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} = 0 \quad \text{Sur les cotés latéraux du domaine d'étude (condition de Neuman)} \quad (\text{I.21})$$

I.6 MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE AU PLAN

Pour la mesure du champ électrique au plan lors d'une décharge couronne, S. Mouhoubi et Y. Zeboudj [14] ont utilisé une sonde polarisée circulaire. On considère un plan circulaire (S) de rayon r_s et de surface S centré au milieu d'une électrode E de rayons intérieur et extérieur respectifs r_e et R_e (figure I.11). Les surfaces (S) et (E) des deux parties sont au même niveau et forment un intervalle d'air de largeur $g = r_e - r_s$.

On suppose q'un champ électrique E existe à la surface de l'électrode (E) dans la région de la sonde. En appliquant une tension V_b entre les parties (S) et (E), une distribution du flux apparaît au voisinage de la sonde dépendant de la polarité de la tension V_b .

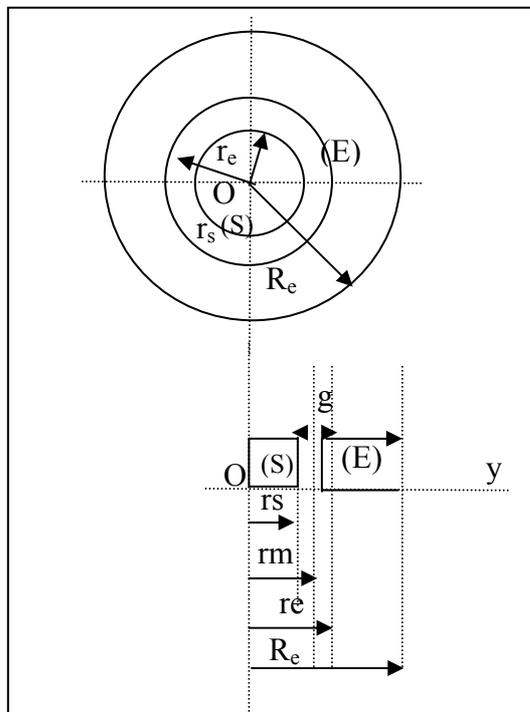


Figure I.11 : Sonde polarisée circulaire

I.6.1 DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UN SYSTEME POINTE PLAN SANS BARRIERE

La figure I.12 représente la distribution du champ électrique E sur le plan à divers niveaux de la tension V en polarité positive. Ces courbes montrent une décroissance du champ E au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre du plan. Cette décroissance est d'autant plus accentuée lorsque la tension V est élevée. L'allure des courbes obtenues concorde avec celles données par Collins et Meek en impulsionnel [15, 18].

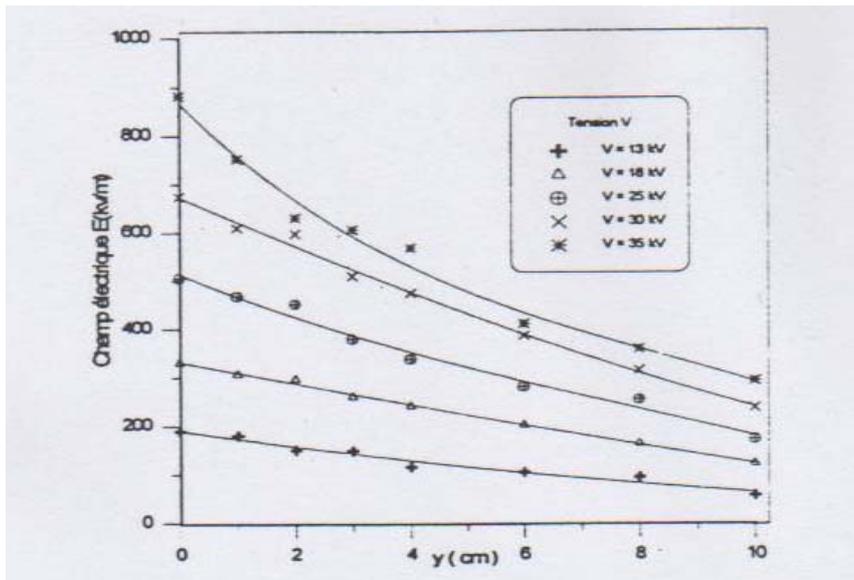


Figure 12 : Variation du champ au plan en polarité positive en fonction de la distance 'y' comprise entre le centre de la sonde et l'axe de la pointe. [14]

Les courbes $E(V)$ lors de la décharge couronne positive sont représentées sur la figure I.13. Le champ électrique au plan augmente linéairement en fonction de la tension V . Ce résultat est similaire à celui obtenu en géométrie fil plan en tension continue [34].

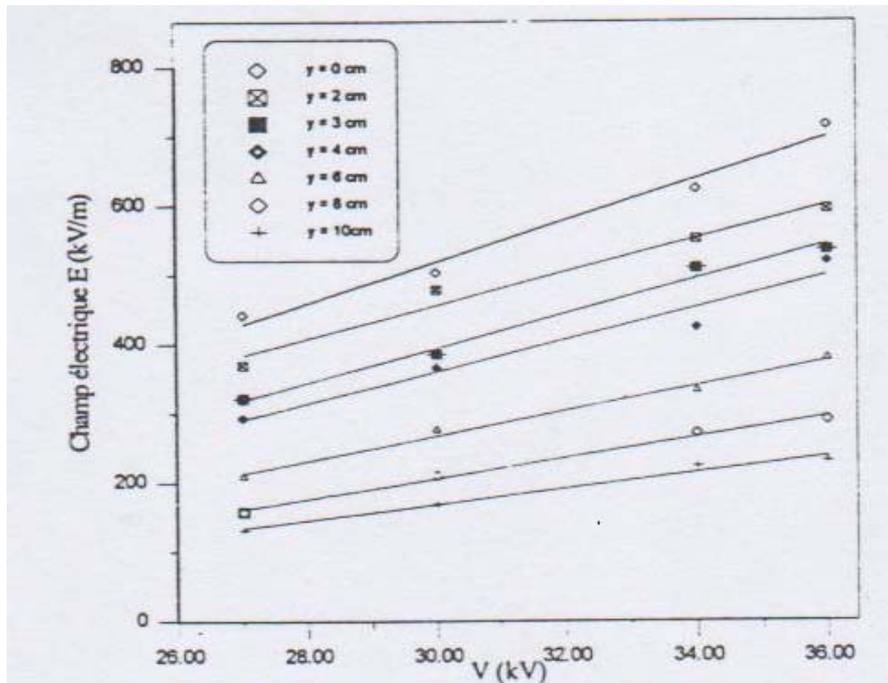


Figure I.13 : Variation du champ E en fonction de la tension V de polarité positive [14].

Les mêmes variations du champ E en fonction de la tension V et de la distance y sur le plan en polarité négative de la décharge de couronne ont été trouvées [14].

1.6.2 DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UN SYSTEME POINTE PLAN AVEC BARRIERE

Pour la mesure du champ électrique au plan en système pointe – plan avec barrière, S. Mouhoubi et A.Boubakeur [15] ont utilisé une électrode pointe soumise à une tension continue, elle est de forme conique ayant un angle de 30° . La barrière isolante est en bakélite (Figure I.15).

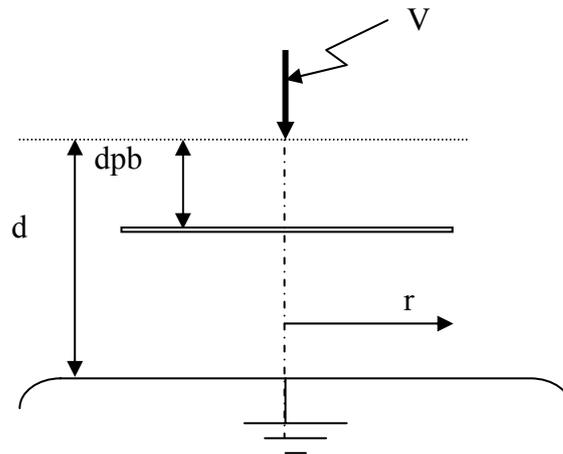


Figure I.15 : Schéma représentatif du système d'électrodes pointe-barrière-plan

Le champ électrique augmente lorsque la distance dpb entre la pointe et la barrière diminue. Le champ au plan du système sans barrière est supérieur à celui avec barrière quelle que soit la distance barrière-plan. Ainsi l'insertion d'une barrière isolante dans un intervalle pointe-plan conduit à la réduction du champ électrique au plan.

La position de la barrière ne manque pas d'influer sur le champ électrique au plan. En effet, le déplacement de la barrière de la pointe vers le plan, influe sur le champ électrique global selon que la barrière se situe dans une zone à fort champ (près de la pointe) ou dans une zone à champ électrique quasi uniforme ($a/d= 0.4- 0.6$), ou bien dans la zone à champ pratiquement uniforme (barrière sur le plan).

Concernant les barrières trouées, la décharge ne tend pas à passer par un trou de faible diamètre [15] à cause de la forte concentration de la charge d'espace au centre de la barrière.

La figure I.16 présente les courbes donnant la distribution du champ électrique au plan avec des barrières de différents diamètres de trous. Ces courbes montrent que le trou de 12mm constitue la limite supérieure où la charge d'espace joue le rôle d'obstacle électrostatique au développement de la décharge [15]. Le champ au plan est pratiquement constant, particulièrement pour les distances r au plan allant de 3 à 4 cm. En l'occurrence, ce résultat contribue à la confirmation de l'hypothèse de l'uniformisation du champ électrique dans l'intervalle barrière-plan.

La figure I.17 présente la variation du champ électrique E au plan en fonction de la distance pointe barrière d_{pb} . Nous constatons que l'effet de la charge d'espace est sensible lorsque la barrière n'est pas en contact de la pointe.

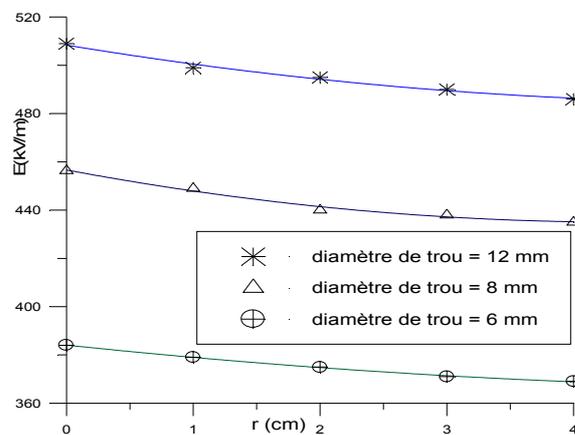


Figure I.16 : Distribution du champ au plan avec barrière trouée en fonction de la distance r pour $V=28$ kV, $d=7$ cm [15]

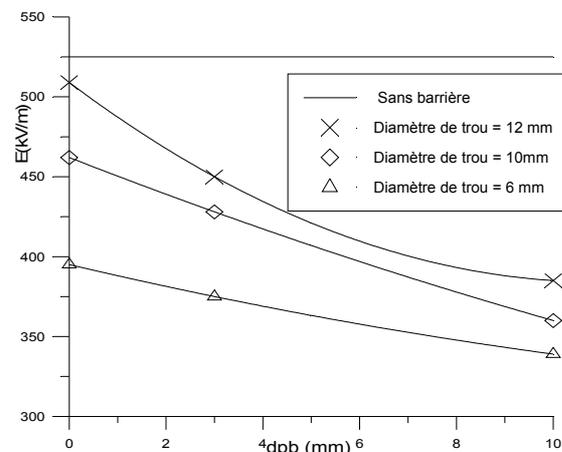


Figure I.17 : Variation du champ au plan en fonction de d_{pb} pour $V=28$ kV, $d=7$ cm [15]

1.7 CONCLUSION

A partir des résultats des travaux effectués précédemment, nous pouvons conclure que l'introduction d'une barrière isolante dans un intervalle pointe plan augmente la rigidité diélectrique du système, en modifiant la distribution du champ électrique dans l'intervalle d'air en général et sur le plan en particulier.

En effet, le système pointe-barrière-plan est équivalent à deux systèmes d'électrodes : un système pointe-plan et un autre plan-plan dont la barrière est l'électrode commune. Le champ électrique dans le deuxième système d'électrodes est quasi uniforme.

Suite à ces travaux, notre étude s'inscrit dans le même axe de recherche et concerne la distribution du champ électrique sur le plan d'intervalles d'air pointe – barrière – plan sous tension de choc de foudre, pour différents paramètres liés à la barrière.

CHAPITRE 2

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1 INTRODUCTION

Nous présentons dans ce chapitre le circuit d'essai ainsi que la méthode utilisés pour déterminer la tension de tenue $U_{0\%}$ du système pointe-plan, qui sera appliquée par la suite au système avec barrière isolante. Enfin, nous donnons le circuit utilisé pour la mesure du champ électrique au sol à l'aide d'une sonde à capacité répartie (S.C.R).

II.2 GENERATION DES ONDES DE CHOC

II.2.1 GENERATEUR DE CHOCS

Le générateur de choc est de type Marx [47] ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre d'étages = 8
- Tension nominale = 600 kV (tension de charge nominale par étage égale à 75 kV)
- Energie = 4 kJ

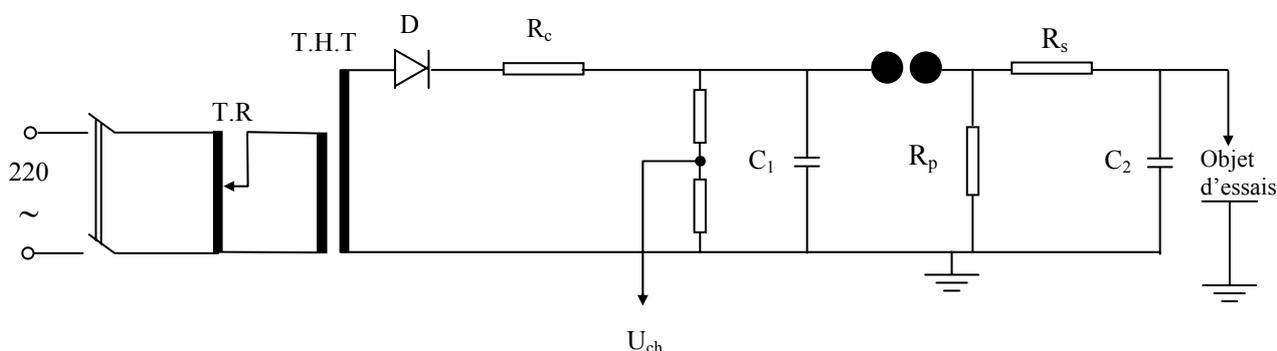


Figure II.1- Schéma simplifié du générateur de choc

Avec :

T.R : Transformateur de réglage

T.H.T : Transformateur de haute tension

D : Redresseur

R_c : Résistance de charge.

R_s : Résistance série équivalente ((8 x 10) + 150) Ω

R_p : Résistance parallèle équivalente 8 x 430 Ω

C1 : Condensateur de choc 22.5nF

C2 : Condensateur de charge 2nF

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasée. Une résistance (R_c) destinée à limiter le courant de charge à une valeur admissible est placée en série avec le redresseur. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension (T.H.T). La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances R_c.

Au cours de la charge des condensateurs, la tension aux bornes des éclateurs à sphères augmente. Lorsque les éclateurs s'amorcent, chaque condensateur se décharge à travers les résistances R_s, R_p. La tension générée appliquée à l'objet d'essais est égale à la tension aux bornes d'un étage multipliée par le nombre d'étages qui est égal à 8 dans notre cas. (Le rendement du générateur étant pratiquement égal à 1).

II.2.2 TENSION DE CHOC DELIVREE

La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI 60 [48]. L'onde délivrée est définie par les paramètres suivants:

- ❖ La constante de temps de front τ_f
- ❖ La constante de temps de mi-amplitude τ_q
- ❖ L'amplitude maximum U_m

La forme de tension générée par le générateur de choc répond à l'équation suivante:

$$U(t) = U_m[\exp(-t/\tau_q) - \exp(-t/\tau_f)] \quad (\text{II.1})$$

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite « choc 1,2/50 µs » comme l'onde la plus adoptée pour les essais en choc de foudre. La durée conventionnelle de front T_f' de cette onde est de 1.2 µs et la durée conventionnelle de mi-amplitude T_q' est de 50µs.

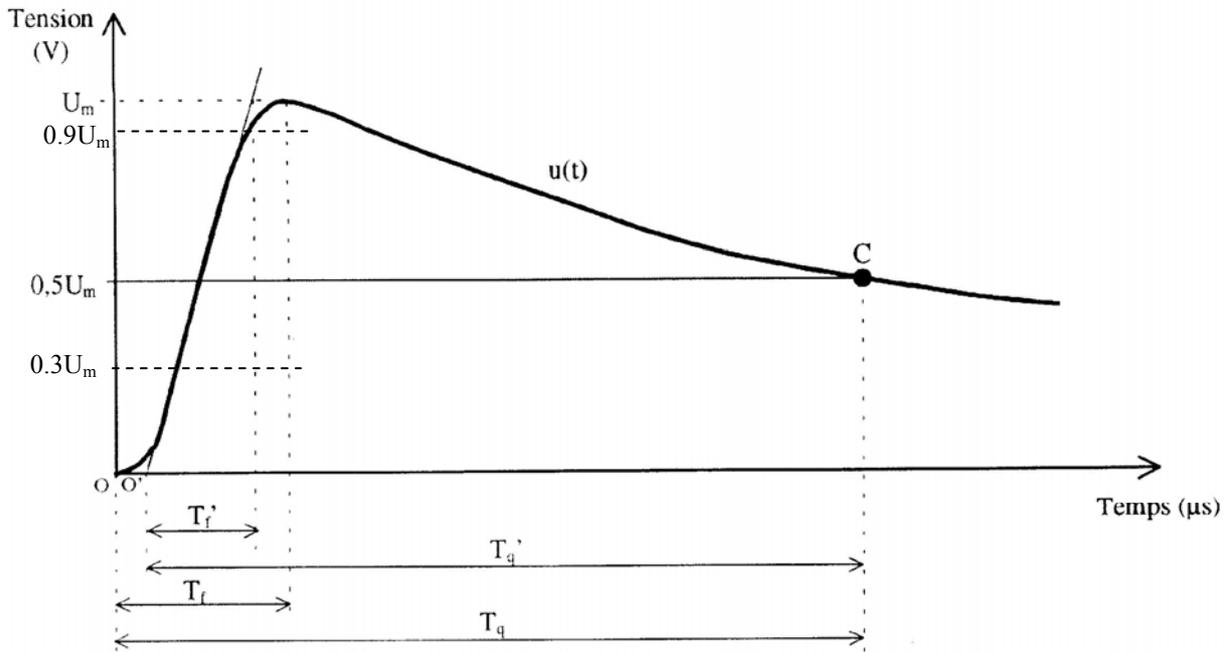


Figure II.2 Forme de l'onde de choc de foudre

O: Origine de la tension de choc

O': Origine conventionnelle de la tension de choc

T_f : Durée de front

T_f' : Durée conventionnelle de front

T_q : Durée de mi-amplitude

T_q' : Durée conventionnelle de mi-amplitude

II.2.3 DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$

La tension $U_{0\%}$ est la tension maximale qu'on peut appliquer à un système d'intervalle d'air sans qu'il y ait décharge. Pour déterminer cette tension, la méthode des paliers multiples constants a été appliquée. Elle consiste à appliquer trois paliers de tension différents avec application de 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Plus le nombre de paliers appliqué est grand plus l'interpolation des points sera meilleure et donc une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer $U_{0\%}$. En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 0.1% sur une échelle gausso-arithmétique.

Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais trouvées sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle gausso-arithmétique.

Ceci correspond à ce qu'ont obtenu d'autres auteurs [11, 49 à 53].

La distribution normale a été donc vérifiée et admise dans notre présente étude.

II.2.4 CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES

La décharge disruptive dépend des conditions atmosphériques régnantes. En appliquant les facteurs de correction, une tension mesurée peut être convertie à la valeur qui aurait été obtenue sous les conditions atmosphériques de référence. Réciproquement, une tension d'essai spécifiée pour les conditions de référence peut être convertie en la valeur équivalente dans les conditions régnant au cours de l'essai.

Dans la CEI 60 [48], on définit deux facteurs de corrections. La tension de décharge est proportionnelle à k_d / k_h .

II.2.4.1 FACTEUR DE CORRECTION DE DENSITE RELATIVE DE L'AIR k_d

Dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

- Température ambiante $T_0 = 293 \text{ K}$
- Pression atmosphérique $P_0 = 1013 \text{ mbar}$ (= 760 mmHg)

Le facteur k_d est donné par :

$$k_d = \left(\frac{p}{p_0} \right)^m \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad (\text{II.2})$$

La pression P est en mbar et la température T en K.

Les exposants m et n dépendent de la forme d'onde. Dans le cas d'un intervalle pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre, m et n sont égaux à l'unité.

II.2.4.2 FACTEUR DE CORRECTION DE L'HUMIDITE k_h

De façon semblable, le facteur de correction de l'humidité est donné par la CEI 60 [48] par :

$$k_h = (k)^w$$

L'exposant w dépend de la forme d'onde. Dans le cas d'un intervalle pointe-plan soumis à une onde de choc de foudre positif, w est égal à l'unité. Dans le cas de la polarité négative w est égal à 0. Ainsi k_h est égal à 1 en polarité négative et il est déterminé à partir d'abaques dans le cas de la polarité positive.

Durant nos essais l'humidité était comprise entre 75% et 80%. Pour ces valeurs, k_h est de l'ordre de 1.

II.3 ARRANGEMENT POINTE – BARRIERE - PLAN

Le schéma du modèle d'essai sans barrière est donné à la figure (II.3) et celui avec barrière isolante à la figure (II.4).

Choix de l'électrode pointue : L'électrode pointue est constituée par un cylindre creux, en cuivre, de longueur 1200mm et de diamètre 45mm. 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 et la terre.

Choix de l'électrode plane : Le plan est une plaque en aluminium de forme carrée, de 1000mm de côté et de 4 mm d'épaisseur. Etant donné qu'on utilise une barrière dont la largeur atteint 40 cm, il est important de choisir une électrode plane suffisamment large pour éviter l'effet des bords.

Choix des barrières :

Pour l'étude de la largeur et la position de la barrière, nos barrières sont des plaques carrées en plexiglas d'épaisseur égale à 5mm et de largeurs 10cm, 20cm, 30cm, 35cm, 40cm.

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de la barrière nous prenons des plaques de largeur égale à 40cm et d'épaisseurs de 2mm, 3mm, 4mm, 5mm.

Pour l'étude de l'effet de la barrière trouée, nous prenons une plaque de 40 cm de largeur et de 05mm d'épaisseur.

❖ Avant chaque essai, nous nettoyons nos écrans avec de l'alcool propylique.

Plusieurs niveaux de tension de choc de foudre (polarités positive et négative) ont été appliqués. Pour chaque niveau de tension, nous enregistrons les formes d'ondes captées par la sonde et visualisées à l'aide d'un oscilloscope numérique de marque TEKTRONIX TDS 340A 100MHz.

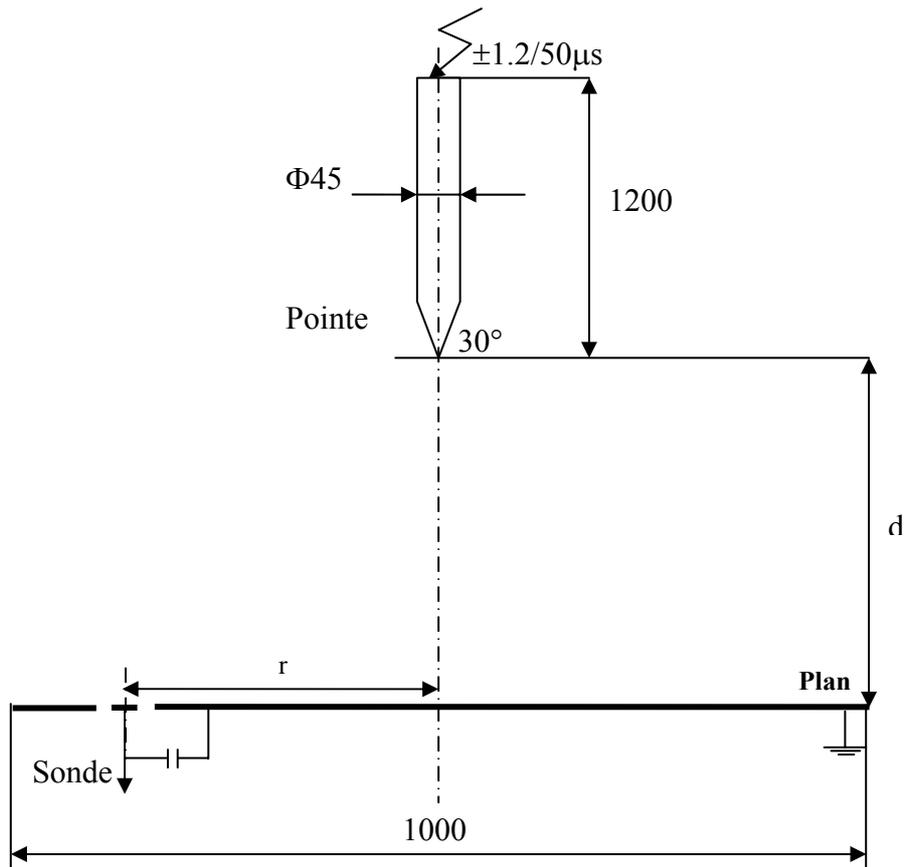


Figure : II.3 Système Pointe-Plan sans barrière.

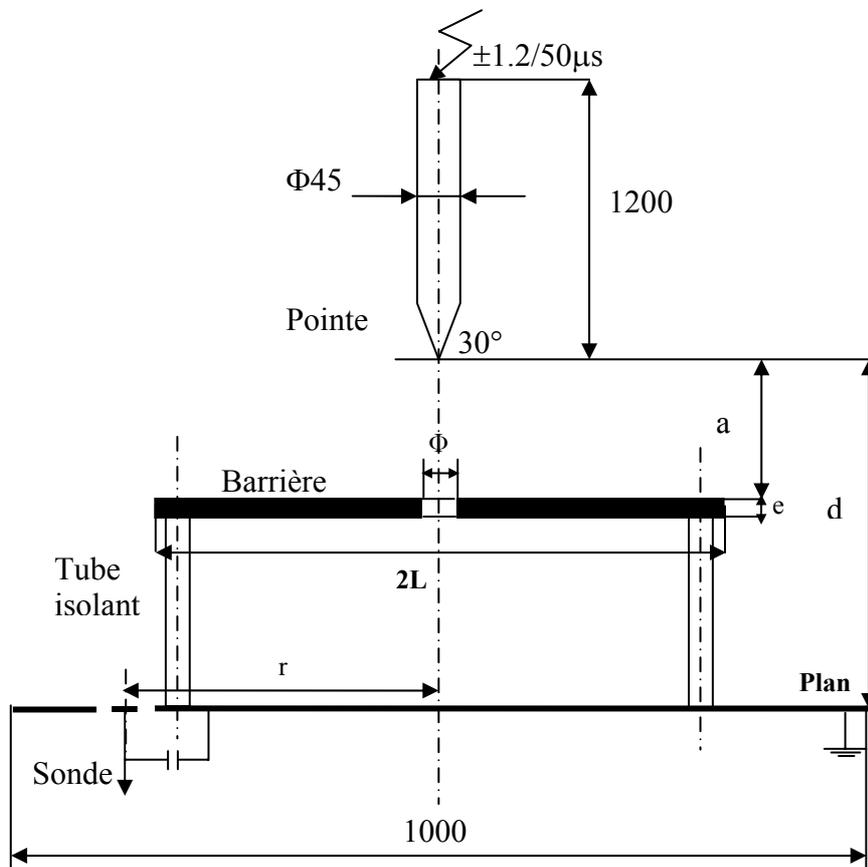


Figure : II.4 Système Pointe- Plan avec barrière.

La position de la barrière est déterminée par la distance (a) entre la barrière et la pointe et par la distance (d-a) entre la barrière et le plan.

Les distances d sont les même qu'en système sans barrière.

Les deux niveaux de tension utilisés sont $0.2U_{0\%}$ et $0.5U_{0\%}$ pour la polarité négative et $0.5U_{0\%}$ et $0.8U_{0\%}$ pour la polarité positive des système pointe-plan correspondants, à chaque distance d choisie. Pour une position donnée de la barrière, nous appliquons le même niveau de tension d'essais.

Ainsi pour une distance d donnée, c'est le même niveau de tension $U_{0\%}$ qui est pris en considération.

Cela nous permettra d'observer l'influence de la présence de la barrière sur la variation de l'intensité du champ au plan.

Les différentes distances utilisées sont données dans le tableau II.1 ci-dessous:

Polarité	+ , -	+ , -	+ , -
d (cm)	8	12	16
2L (cm)	10, 20, 30, 35, 40	10, 20, 30, 35, 40	10, 20, 30, 35, 40
a/d	0, 0.2, 0.8, 1	0, 0.2, 0.8, 1	0, 0.2, 0.8, 1
r/L	0,0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2	0,0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2	0,0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2
e (mm)		2, 3, 4, 5 (2L=40cm)	
φ(mm)		0, 2, 4, 6, 8, 10,11 (2L=40, e=5)	

Tableau II.1 : Les différents paramètres pris pour la mesure.

II.4 MESURE DU CHAMP PAR LA METHODE DE LA SONDE A CAPACITES REPARTIES (S.C.R)

Une méthode de mesure du champ électrique, lors de la décharge couronne négative en géométrie pointe-plan, est développée au moyen d'une sonde à capacité répartie. La sonde est incorporée, à un même niveau de surface, sur un système d'électrodes pointe-plan où les effets de bord sont éliminés.

La sonde à capacité répartie a une grande précision, avec une large bande passante, elle est utilisée pour les méthodes de mesure très rapide et sans contact.

Cette méthode consiste à déterminer le champ électrique E_T à la surface du sol, en mesurant la quantité des charges (Q) recueillie à la surface de la sonde. Pour réaliser la mesure, nous insérons dans le dispositif de mesure une résistance et un condensateur montés en filtre passe-bas, comme le montre la figure II.6.

II.4.1 CIRCUIT DE MESURE

La sonde de 6.12 mm de diamètre est reliée à travers une résistance R_1 à un condensateur de charge (C). Il est nécessaire d'utiliser un diviseur de tension (R_m , R_s) pour recueillir le signal de la tension V_1 aux bornes de la capacité C reliée en parallèle, au diviseur de tension.

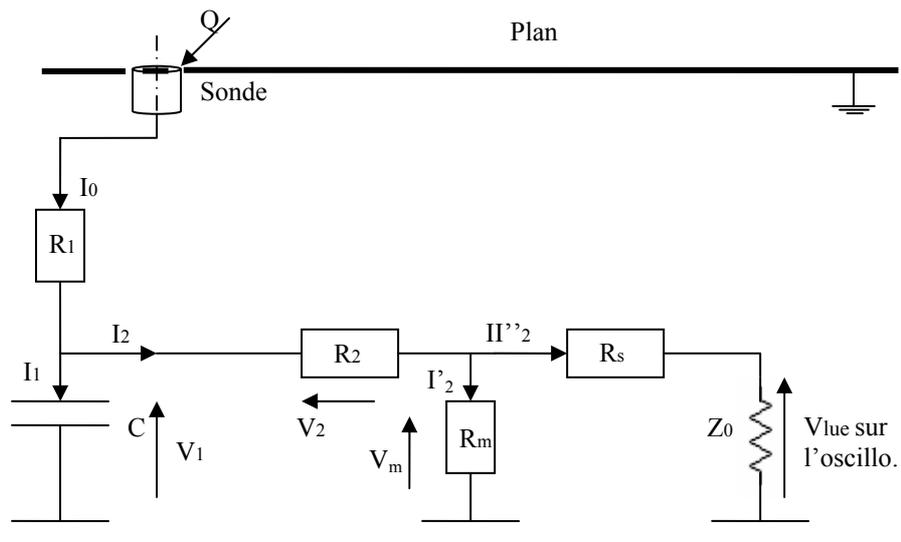


Figure II.6 Schéma montrant la méthode de mesure

Avec

R_m : résistance de l'atténuateur ou diviseur.

$Z_e = Z_0 + R_s$: impédance d'entrée du dispositif de mesure.

Z_0 : impédance d'entrée de l'oscilloscope.

R_s : résistance de protection.

R_2 : résistance d'adaptation du câble de mesure.

II.4.2 EXPRESSION DU CHAMP MESURE

$$Q = \int \sigma ds = \varepsilon_0 E.S \quad (S : \text{Surface de la sonde}) \quad (\text{II.4})$$

$$I_0 = I_1 + I_2 = I_1 + I_2' + I_2'' \quad (\text{II.5})$$

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 S \frac{dE}{dt} = C \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_m}{R_m} + \frac{V_m}{Z_e} = C \frac{dV_1}{dt} + V_m \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) \quad (\text{II.6})$$

$$\Rightarrow \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_m}{C} \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) = \frac{\varepsilon_0 S}{C} \frac{dE}{dt} \quad (\text{II.7})$$

$$\left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{Z_e} \right) \rightarrow 0 \quad R_m \text{ et } Z_e \text{ relativement grands par rapport à } R_2$$

$$\Rightarrow \frac{dV_1}{dt} = \frac{\varepsilon_0 S}{C} \frac{dE}{dt}$$

$$\Rightarrow V_1(t) = \frac{\varepsilon_0 S}{C} E(t) \quad (\text{II.8})$$

$$\begin{aligned} V_1(t) &= V_2(t) + V_m(t) = R_2 I_2 + R_m I_2' \\ &= R_2 I_2 + (R_m // Z_e) I_2 && R_m \ll Z_e \\ &= (R_2 + (R_m // Z_e)) I_2 && R_m \gg R_2 \\ &= R_m I_2 \\ &= V_m(t) \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Donc :} \quad V_1(t) = V_m(t) = \frac{\varepsilon_0 S}{C} E(t) \quad (\text{II.10})$$

$$\Rightarrow E(t) = \frac{C}{\varepsilon_0 S} V_m(t) \quad (\text{II.11})$$

Les valeurs des composantes d'antenne (C , R_1) sont choisies, de façon que, la constante de temps d'antenne soit plus petite par rapport à celle du signal d'entrée, pour pouvoir le capter.

Pour les autres composantes du circuit, le choix est basé sur l'élimination du problème de réflexion du signal à travers le câble.

Ainsi nous avons utilisé les valeurs suivantes :

$R_1 = 47\Omega$, $R_2 = 50\Omega$, $R_m = 6.6k\Omega$, $R_s = 4.5M\Omega$, $C=25.10^{-12}F$, $\phi_{\text{sonde}}=6.12\text{mm}$
 $Z_0 = 1M\Omega$: impédance d'entrée de l'oscilloscope.

$$E(t) = \frac{25.10^{-12}}{8.854.10^{-12}.\pi\left(\frac{6.12}{2}\right)^2.10^{-6}} V_1(t) \quad (\text{II.12})$$

$$E(t) = 95,947.V_1(t) \quad [\text{kV/m}] \quad \text{ou} \quad 0,95947.V_1(t) \quad [\text{kV/cm}]$$

$$E(t) = 0,95947.V_1(t) \quad [\text{kV/cm}] \quad (\text{II.13})$$

Si V_{lue} désigne la tension lue sur l'oscilloscope et comme $V_1 = V_m$, on a :

$$\frac{V_m}{R_s + Z_0} = \frac{V_{lue}}{Z_0} \Rightarrow V_m = \frac{R_s + Z_0}{Z_0} V_{lue} \quad (\text{II.14})$$

$$\Rightarrow V_m = V_1 = \frac{R_s + Z_0}{Z_0} V_{lue}$$

Donc $V_1 = 5,5.V_{lue}$

$$E(t) = 0,95947 \times 5,5.V_{lue}(t) \quad [\text{kV/cm}] \quad (\text{II.15})$$

Ces valeurs sont corrigées par les coefficients de correction atmosphérique.

II.4.3 DETERMINATION DE LA CONSTANTE DE LA SONDE K_s

Pour déterminer la constante de la sonde K_s , nous effectuons d'abord nos essais pour un système plan-plan, en suivant la procédure suivante :

- ❖ Maintenir une distance plan-plan (d) aussi petite que possible et faire varier la tension sans présence d'arc électrique et lire la valeur sur l'oscilloscope.
- ❖ Déterminer les champs par la méthode théorique et calculer le rapport entre les valeurs du champ mesuré et théorique.

En choisissant $d = 8$ cm nous obtenons :

U (kV)	E (théorique) = U/h (kV/cm)
40	5
48	6
56	7
60	7.5

U (kV)	V _{lue} (V)	E (expérimental) (kV/cm)	K _s
40	3.512	18.533	0.269
48	3.802	20.063	0.299
56	4.564	24.084	0.291
60	5.103	26.928	0.278

Les valeurs de K_s sont obtenues en utilisant la relation :

$$K_{s_i} = E_{th_i} / E_{exp_i}$$

$$K_s = \frac{\sum K_{s_i}}{n} \quad (II.16)$$

D'où :

$$K_s = \frac{0.269 + 0.299 + 0.291 + 0.278}{4} \Rightarrow K_s = 0.284$$

La valeur finale du champ électrique au sol est donnée par la formule suivante :

$$E(t) = 0.284 \times (0,95947 \times 5,5 \times V_{lue}(t)) \quad [kV/cm] \quad (II.17)$$

Alors

$$E(t) = 1.499 \times V_{lue}(t) \quad [kV/cm]$$

II.4.4 FORME DES SIGNAUX OBTENUS

Pour les essais de mesure de champ, nous avons utilisé un oscilloscope numérique de marque TEKTRONIX TDS 340A 100MHz, qui nous permet d'obtenir la valeur de chaque point du signal plus particulièrement la valeur crête.

La démarche de mesure est d'enregistrer pour chaque position de la sonde, cinq signaux, en appliquant deux niveaux de tensions différents ($0.2U_{0\%}$, $0.5U_{0\%}$ pour la polarité négative et $0.5U_{0\%}$, $0.8U_{0\%}$ pour la polarité positive); assurant une application de tension sans décharge.

Nous considérons que la valeur V_{luc} est le signal moyen des cinq signaux enregistrés par l'oscilloscope numérique. Nous nous intéressons à la valeur de crête de ces signaux. Cette dernière est considérée comme étant la valeur du champ, en la multipliant par le rapport de mesure.

Nous donnons la forme d'onde obtenue sans décharge (figure II.7 et figure II.8).

L'axe des abscisses est l'axe de temps.

L'axe des ordonnées représente la tension du signal reçu, les échelles sont données en bas du graphe.

La première valeur à droite du graphe donne la valeur de la crête du signal, et la deuxième nous donne la durée de mi-amplitude.

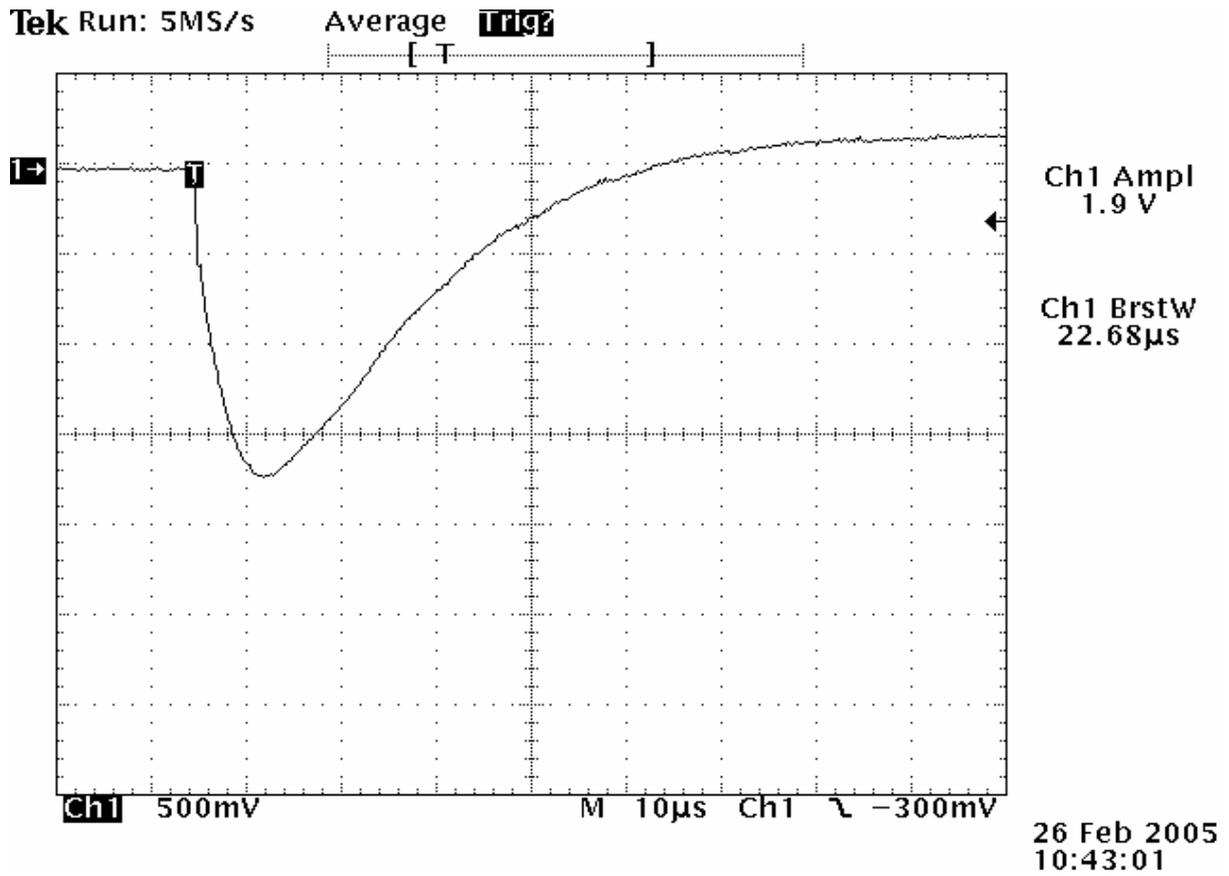


Figure II.7 Forme d'onde donnée par l'oscilloscope numérique pour l'onde négative.

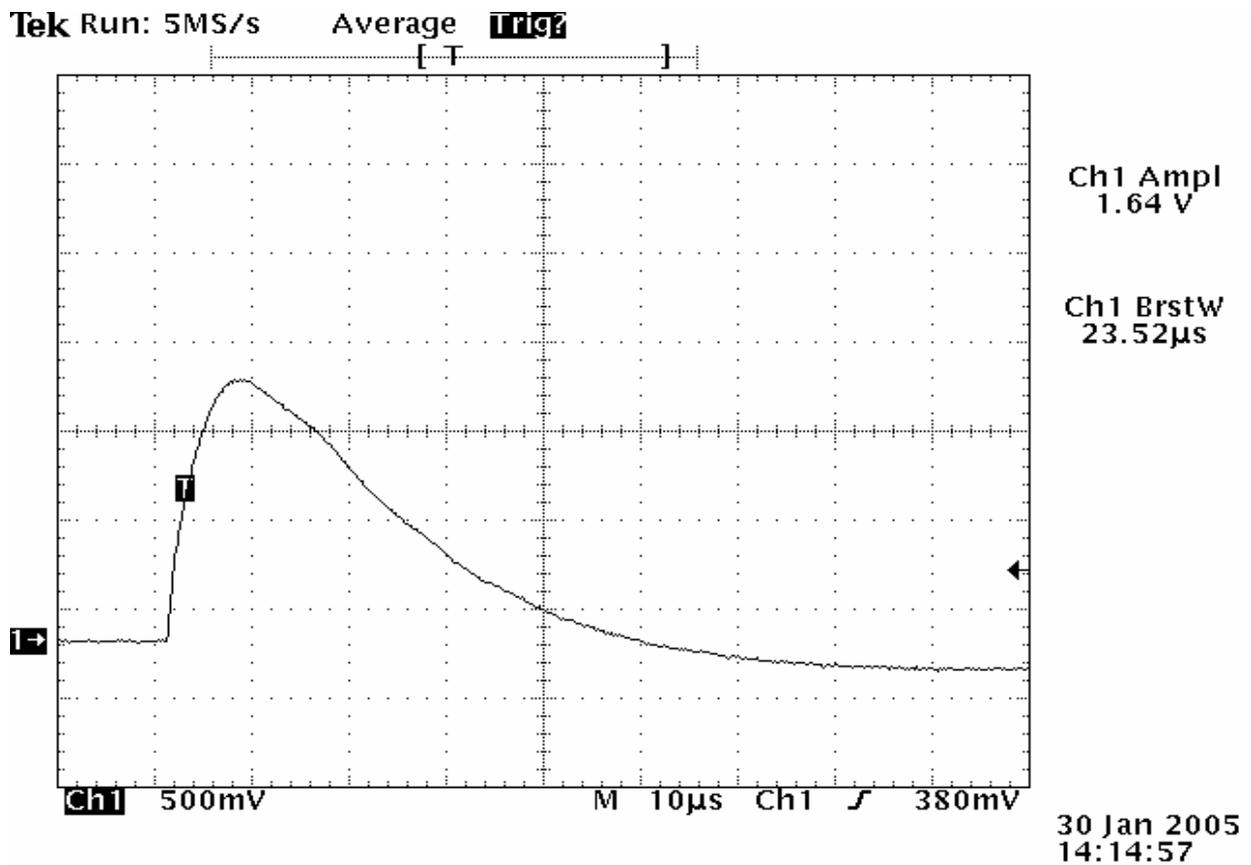


Figure II.8 Forme d'onde donnée par l'oscilloscope numérique pour l'onde positive.

CHAPITRE 3

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite de l'influence d'une barrière isolante à surfaces propres, sur la distribution du champ électrique sur le plan d'un intervalle d'air 'pointe – plan', aux chocs de foudre positifs et négatifs.

Nous commençons par la présentation des résultats concernant le système pointe-plan sans barrière isolante, qui serviront de référence pour la comparaison des résultats.

Nous abordons ensuite l'étude de l'influence des différents paramètres de l'écran isolant tels que sa position, sa largeur, son épaisseur. La dernière partie de nos essais traite l'influence d'une barrière trouée en son milieu.

III.2 SYSTEME POINTE – PLAN SANS BARRIERE

III.2.1 DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$

Dans cette première partie d'essais, nous avons choisi des niveaux de tension appliquée de $0.2U_{0\%}$ et $0.5U_{0\%}$ pour la polarité négative et $0.5U_{0\%}$ et $0.8U_{0\%}$ pour la polarité positive. Ainsi, nous nous sommes intéressés en premier lieu à déterminer la tension $U_{0\%}$ de décharge disruptive. Nous avons opté pour ces niveaux de tension afin d'éviter les décharges disruptives au niveau de la sonde à cause de sa sensibilité aux forts courants.

Les caractéristiques de probabilité de décharge $P = f(U)$, à partir desquelles nous avons déterminé par extrapolation la tension de tenue $U_{0\%}$ pour chaque distance inter électrode (d) choisie, sont présentées aux figures III.1 et III.2. (Les valeurs sont représentées sur les tableaux 01 et 02). Nous avons considéré $U_{0\%}$ comme étant la tension ayant une probabilité de décharge égale à 0,1 % sur l'échelle gaussio-arithmétique.

**DETERMINATION DE LA TENSIONS DE TENUE $U_{0\%}$ POUR
L'INTERVALLE D'AIR POINTE-PLAN**

Polarité positive

d (cm)	8	12	16
$U_{50\%}$ (kV)	75	100	116
$U_{0\%}$ (kV)	60	84	96
$U_{0\%} / 8$ (kV)	7.5	10.5	12
$0.5 U_{0\%}$ (kV)	3.75	5.25	6
$0.8 U_{0\%}$ (kV)	6	8.4	9.6

Tableau 01. Tension de tenue en polarité positive

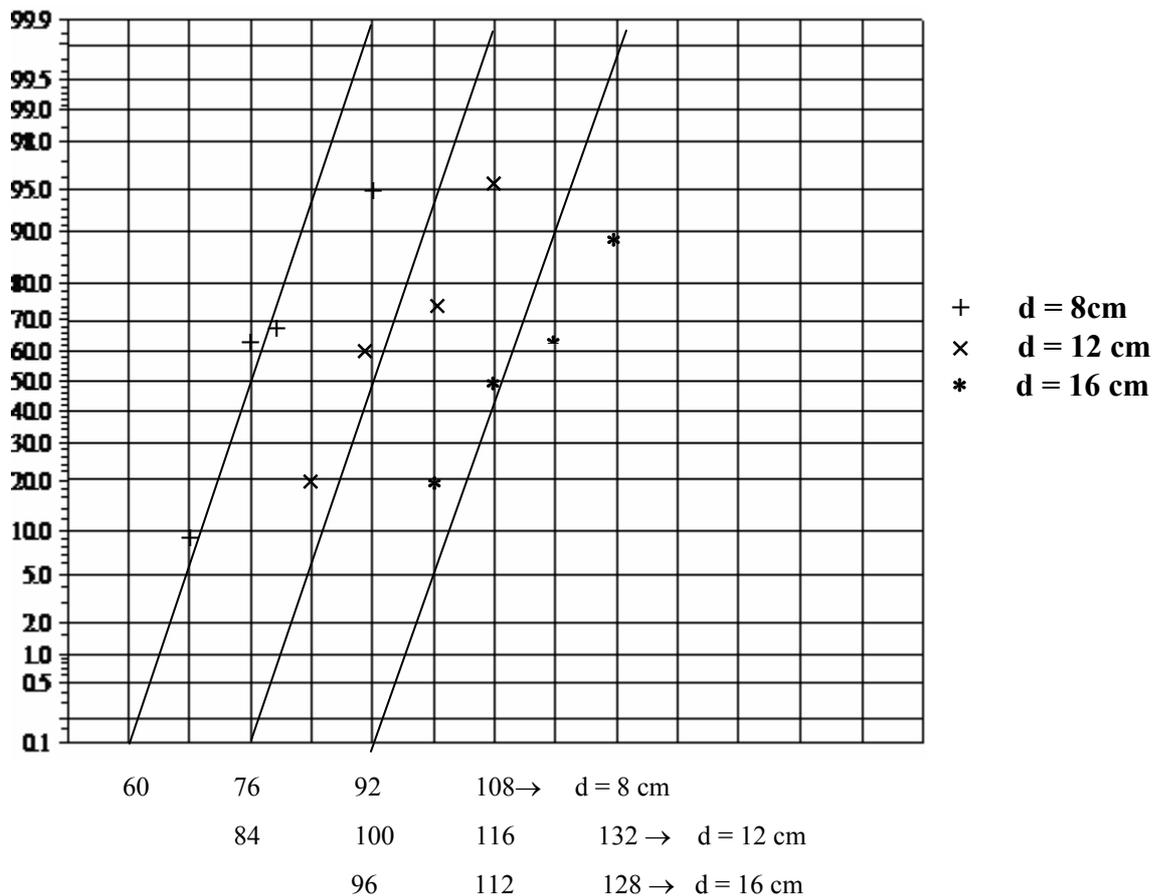


Figure III.1 : Détermination des tensions $U_{0\%}$ pour les différentes distances inter électrodes d (polarité positive)

Polarité négative

d (cm)	8	12	16
$U_{50\%}$ (kV)	173	246	318
$U_{0\%}$ (kV)	144	206	280
$U_{0\%/8}$ (kV)	18	≈26	35
$0.2(U_{0\%/8})(kV)$	3.6	5.2	7
$0.5(U_{0\%/8})(kV)$	9	13	17.5

Tableau 02. Tension de tenue en polarité négative

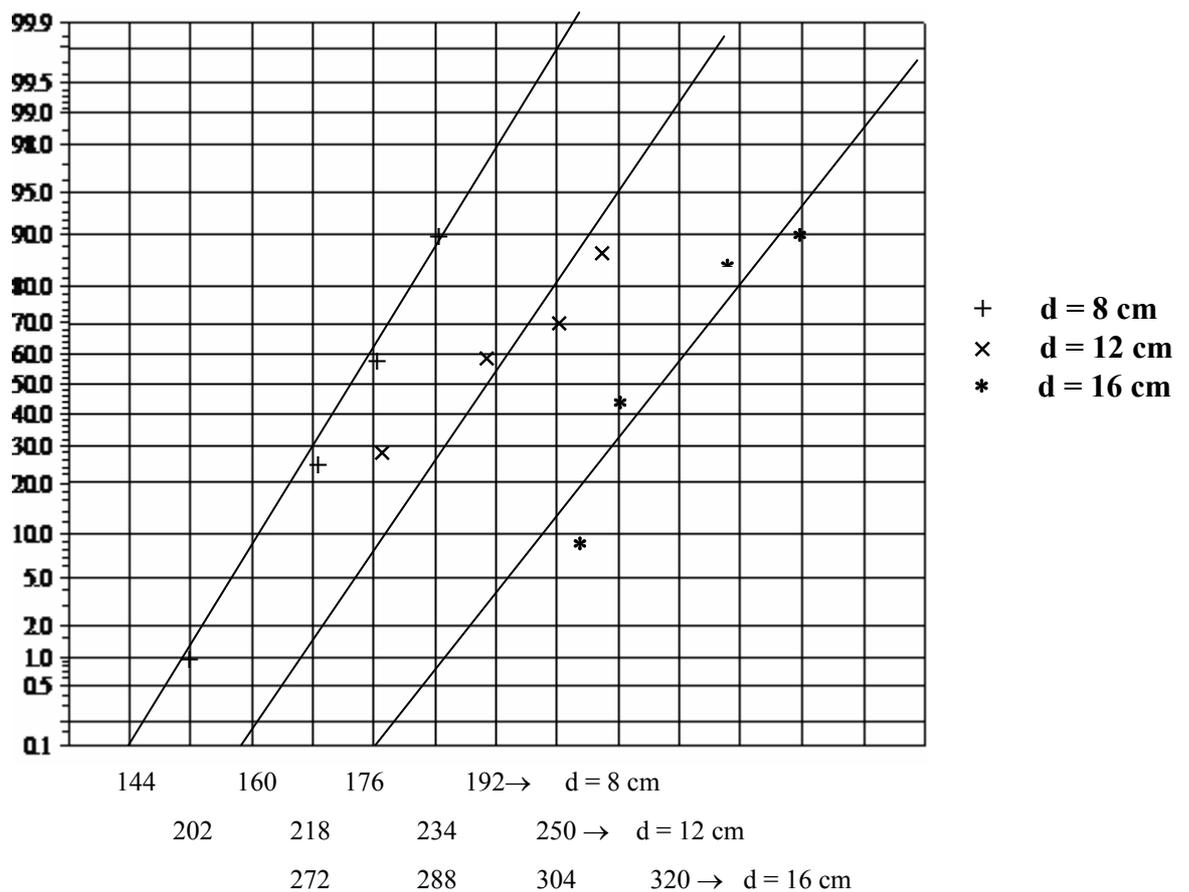


Figure III.2 : Détermination des tensions $U_{0\%}$ pour les différentes Distances inter électrodes d (polarité négative)

D'après les mesures, nous constatons que la tension $U_{0\%}$ croît linéairement avec l'augmentation de la longueur de l'intervalle d'air d (Figure.III.3) pour les deux polarités.

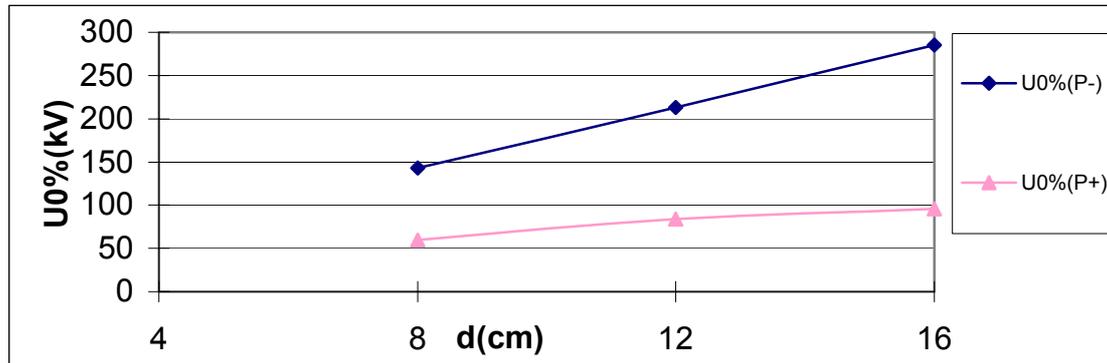


Figure III.3 Evolution de la tension $U_{0\%}$ en fonction de l'intervalle d'air d .

Nous remarquons que les valeurs de tensions de tenue $U_{0\%}$ pour la polarité négative sont plus grandes que celles de la polarité positive, ce qui vérifie qu'au choc de foudre le système 'pointe négative – plan' est plus rigide que le système 'pointe positive – plan'.

Les valeurs de $U_{0\%}$ obtenues pour 8, 12 et 16 cm sont prises aussi comme niveau de référence de tension d'essais dans les mesures de champ dans le cas du système pointe – plan avec barrière.

III.2.2 DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE AU PLAN EN FONCTION DE LA DISTANCE AXE DE LA POINTE - AXE DE LA SONDE

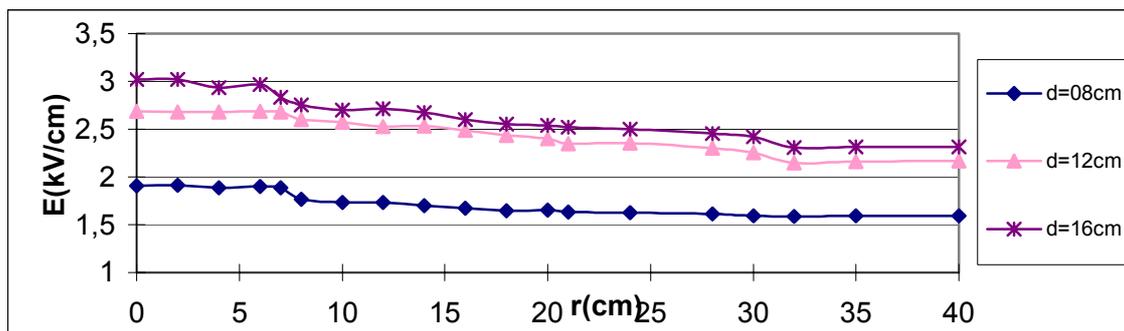
Afin d'étudier l'influence d'une barrière isolante, nous déterminons d'abord la distribution du champ au plan, en fonction de la distance inter électrodes d , pour les différents niveaux de tension utilisés.

D'après les figures III.4 et III.5, avec les différents niveaux de tension $0.5U_{0\%}$ et $0.8U_{0\%}$ (respectivement $0,2U_{0\%}$ et $0,5 U_{0\%}$) pour la polarité positive (respectivement négative), nous constatons que l'intensité du champ prend une valeur maximale pour $r=0 \text{ cm}$, et en s'éloignant de l'axe de la pointe (r augmente) l'intensité du champ électrique diminue faiblement.

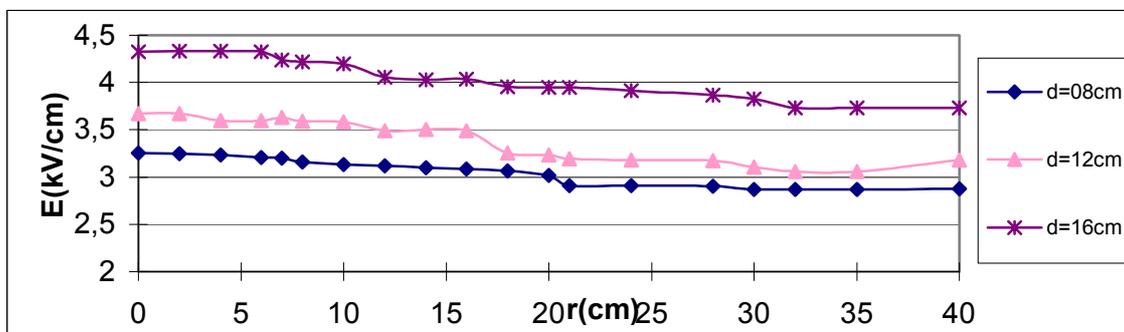
Pour les différentes positions de la sonde (r) et pour les deux niveaux de tension appliqués, nous remarquons que la longueur de l'intervalle d'air (d) a une grande influence sur la valeur du champ au sol. En effet, nous constatons que l'intensité du champ augmente avec la hauteur d . Cette augmentation est due au niveau de tension appliquée à la pointe, correspondant à $0,5U_{0\%}$ et $0,8 U_{0\%}$ (respectivement $0,2U_{0\%}$ et $0,5 U_{0\%}$) pour la polarité positive (respectivement négative).

L'augmentation du champ au sol pourrait être expliquée par la présence du champ créé par la charge d'espace au voisinage de la pointe, lorsque le niveau de tension d'essais augmente.

Le champ électrique varie avec la polarité de la tension appliquée à la pointe. La valeur du champ pour une polarité de choc de foudre négative est plus élevée par rapport à celle du champ électrique pour une polarité positive.



(a)

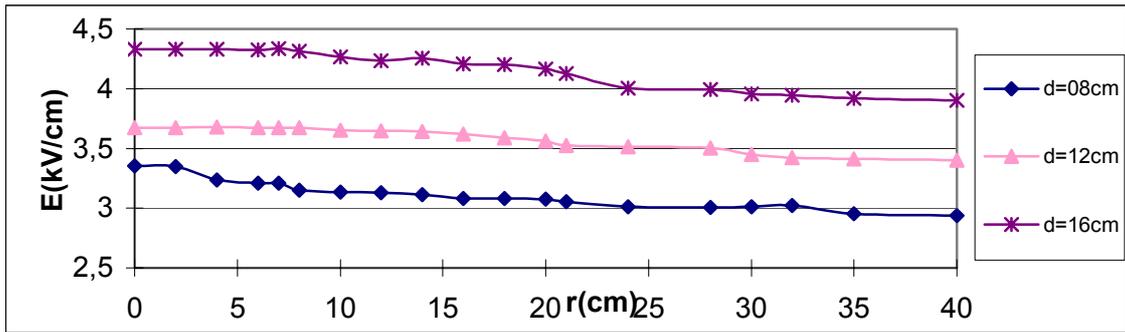


(b)

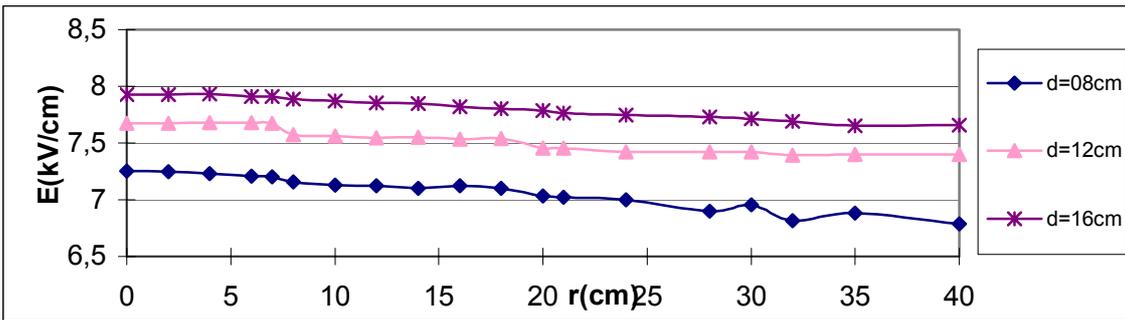
Figure III.4 – Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position r de la sonde dans le cas de la polarité positive

(a) $U=0.5 U_{0\%}$.

(b) $U=0.8 U_{0\%}$.



(a)



(b)

Figure III.5 – Champ électrique mesuré au sol en fonction de la position r de la sonde dans le cas de la polarité négative

(a) $U = 0.2 U_0$.

(b) $U = 0.5 U_0$.

III.3 SYSTEME POINTE – PLAN AVEC BARRIERE

La barrière isolante de largeur $2L$ (10,20, 30, 35, 40 cm) et d'épaisseur ($e= 5\text{mm}$) est suspendue par 04 tubes isolants (figure II.4).

Dans un premier lieu, nous vérifions l'influence de la position de la barrière pour les trois intervalles d'air ($d=08, 12, 16$ cm) et pour chaque largeur $2L$.

La position de la barrière est définie par la distance (a) entre la pointe et la barrière. Cette distance prend différentes valeurs entre zéro et d . En négligeant l'épaisseur de la barrière (e) devant la distance pointe-plan (d), les distances choisies sont :

$$a/d=0; \quad a/d=0.2; \quad a/d=0.8; \quad a/d=1.$$

La position de la sonde est définie par la distance (r) distance horizontale sur le plan par rapport à l'axe de la tige. Cette distance prend différentes valeurs entre zéro (sous la pointe de haute tension) et $2L$. Les distances choisies sont :

$$r/L=0; \quad r/L=0.4; \quad r/L=0.8; \quad r/L=1.2; \quad r/L=1.6; \quad r/L=2.$$

Les figures III.6 à III.8 (respectivement III.9 à III.11) représentent les variations du champ électrique sur le plan en fonction des différentes positions a/d des différentes barrières utilisées en polarité positive (respectivement en polarité négative) de l'onde de choc de foudre. Nous présentons sur les figures (III.12, III.17) les variations du champ au point O (axe de la pointe).

D'après ces figures, nous pouvons subdiviser la distribution du champ électrique en trois zones :

Zone N° 1 : (pour les petites valeurs de r/L):

Dans cette zone, la distribution du champ électrique en polarité positive est presque uniforme aux petites valeurs de r (quand la sonde est proche de l'axe de la pointe au dessous de la barrière), elle est inférieure au champ électrique sans barrière. Cela peut être interprété par le fait que la barrière joue un rôle d'obstacle électrostatique pour la distribution du champ électrique. Même constat pour la polarité négative sauf pour la distance inter électrodes $d=8$ cm (la plus petite distance), car nous remarquons aisément que le champ électrique atteint des valeurs supérieures à la valeur du champ électrique sans barrière.

Zone N° 2 : (pour $r/L \approx 1$):

Le champ augmente au fur et à mesure que la sonde s'approche du bord de la barrière ($0.6 < r/L < 1.4$) et l'augmentation maximale est obtenue quand la sonde est aux alentours du bord de la barrière ($r=L$), ce qui peut être expliqué par la présence d'une forte concentration de charges d'espace à ce niveau.

Zone N° 3 : (pour les valeurs $r/L < 2$):

Dans cette zone, le champ électrique au plan diminue et tend vers une valeur constante presque égale à la valeur du champ électrique sans barrière quand r est très loin du bord de la barrière ($r/L=2$).

III.3.1 INFLUENCE DE LA POSITION DE LA BARRIÈRE

La position de la barrière ne manque pas d'influer sur le champ électrique au plan. En effet, le déplacement de la barrière de la pointe vers le plan influe sur le champ électrique global selon que la barrière se situe dans une zone à fort champ (près de la pointe $0 < a/d < 0.2$) ou dans une zone à champ électrique relativement faible ($0.8 < a/d < 1$). Les courbes représentant le champ électrique sur le plan pour quelques positions de la barrière, indiquées par le rapport a/d , montrent que le champ électrique au plan croît lorsqu'on éloigne la barrière de la pointe. Ce résultat est similaire à celui obtenu par simulation par Li Ming en tension continue positive [16].

Lorsque la barrière s'éloigne de la pointe, le champ électrique augmente et prend sa valeur maximale pour $a/d = 0.8$.

Les valeurs du champ pour les positions $a/d = 0$ et $a/d = 0.2$ sont presque identiques.

Quand la barrière touche le plan, son influence reste faible et le champ électrique correspond approximativement à celui obtenu dans le système 'pointe – plan' sans barrière. (Nous n'avons pas pu mesurer le champ au dessous de la plaque car le signal correspondant est très faible, et nous ne prenons en considération que les valeurs prises pour $r/L \geq 1.2$, pour la position de la barrière $a/d = 1$).

Nous remarquons que le champ électrique est plus grand pour une tension de choc de foudre négative que pour une tension de foudre positive.

Nous constatons que le champ électrique au plan augmente avec l'augmentation de la tension de choc de foudre appliquée, aussi bien en polarité positive qu'en polarité négative.

Au point O sur l'axe de la pointe, pour une polarité positive, nous remarquons que l'utilisation d'une barrière isolante diminue le champ électrique quel que soit le niveau de tension et la distance inter électrode d , il est très faible pour la position $a/d=0$ et plus grand pour la position $a/d = 0.8$ (Figures III.12 à III.14).

Par contre, pour une polarité négative, le champ électrique varie de manière complexe en fonction de la distance pointe – plan, la largeur de la barrière et le niveau de tension appliquée (Figures III.15 à III.17).

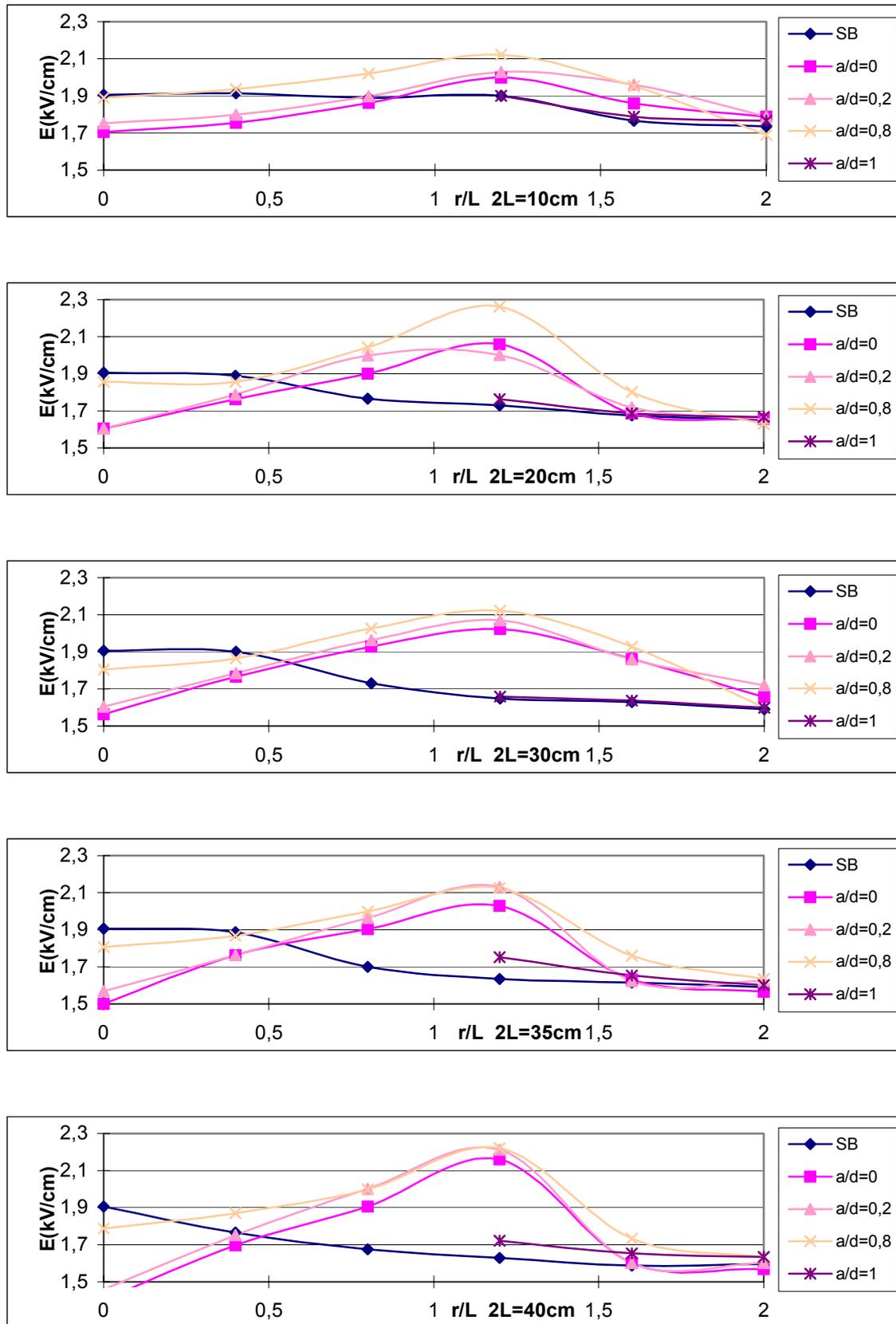


Figure III.6 – a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=08$ cm, $U=0,5U_{0\%}$)

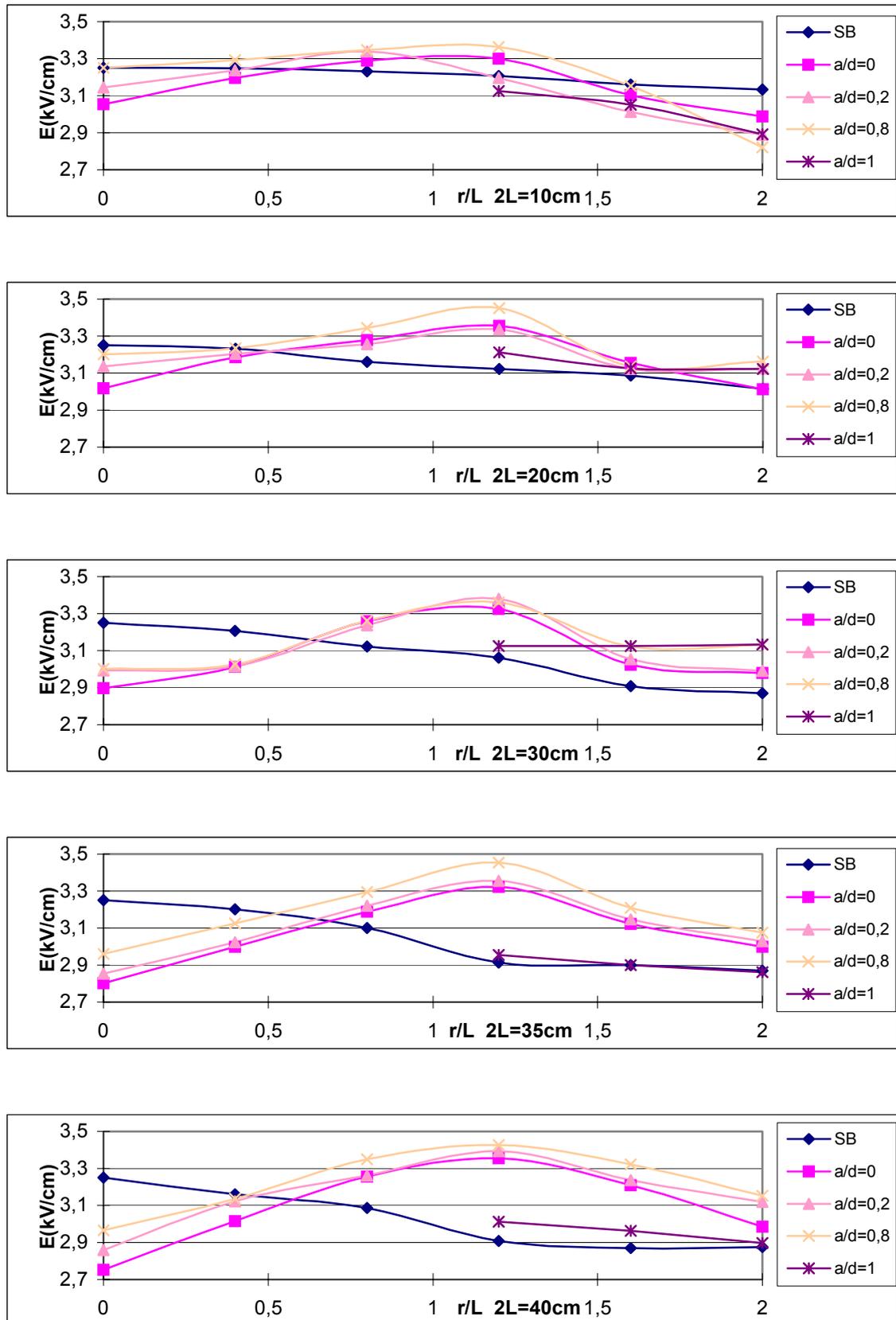


Figure III.6 – b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=08$ cm, $U=0,8U_{0\%}$)

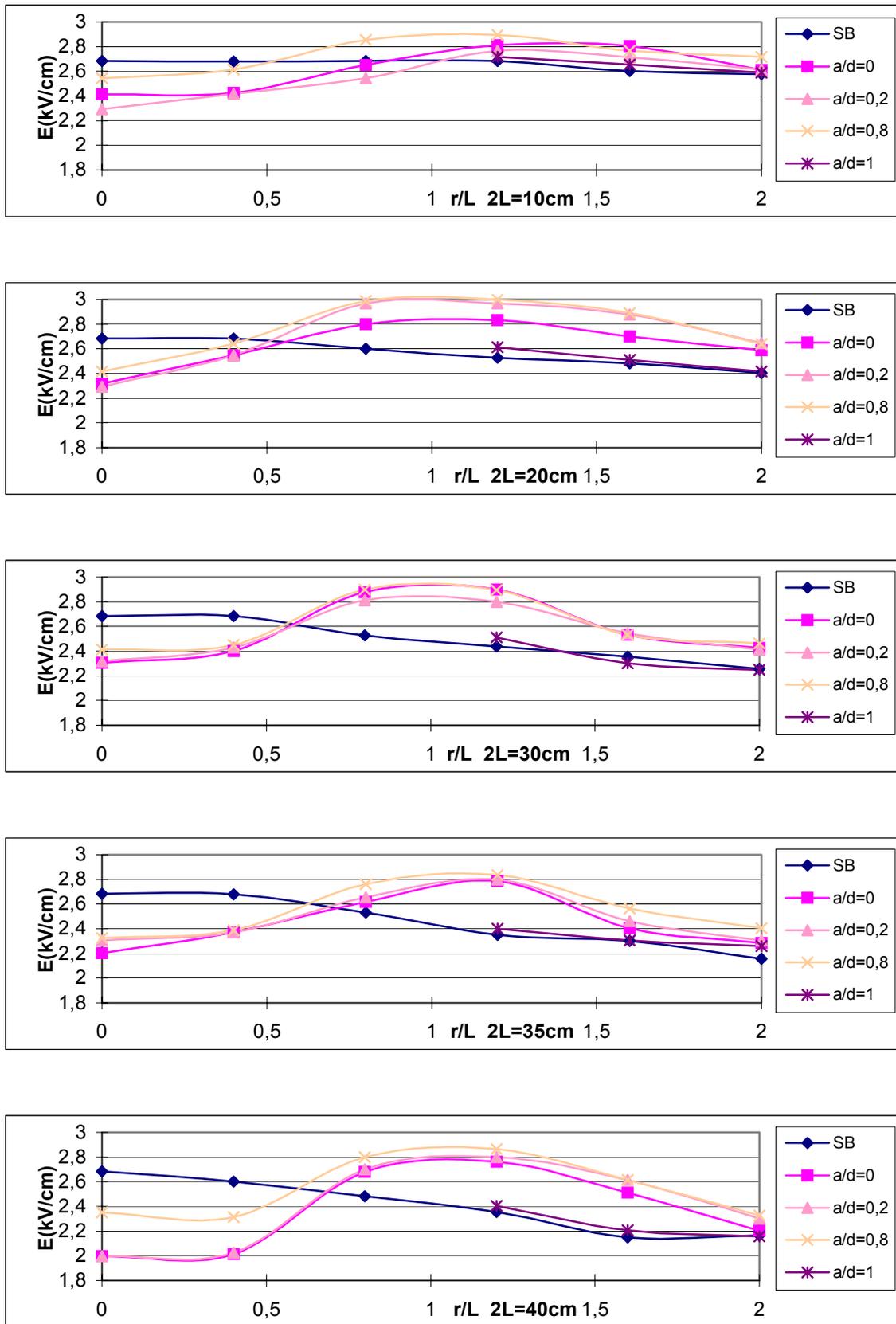


Figure III. 7-a– Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12$ cm, $U=0,5U_{0\%}$)

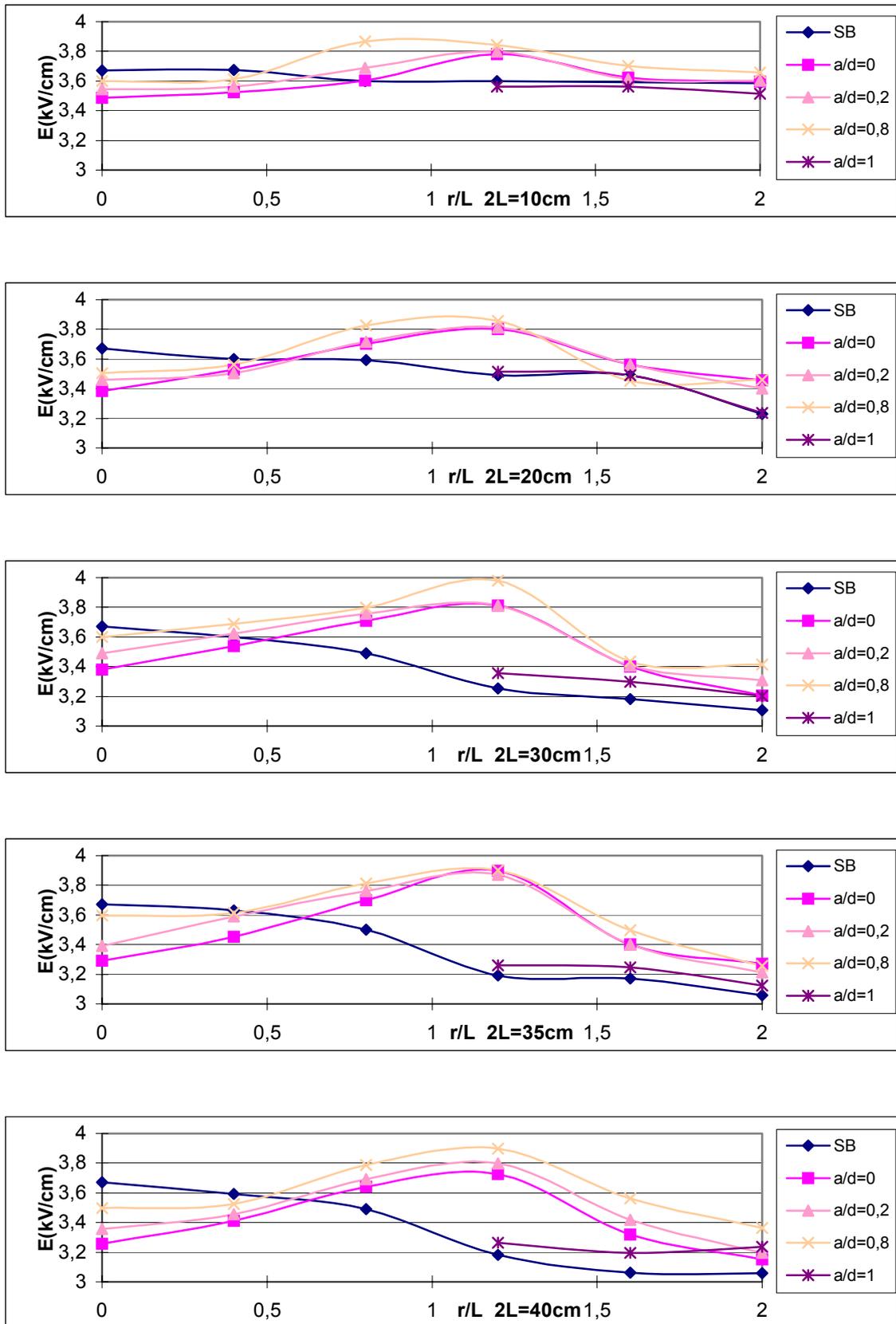


Figure III. 7- b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12$ cm, $U=0,8U_{0\%}$)

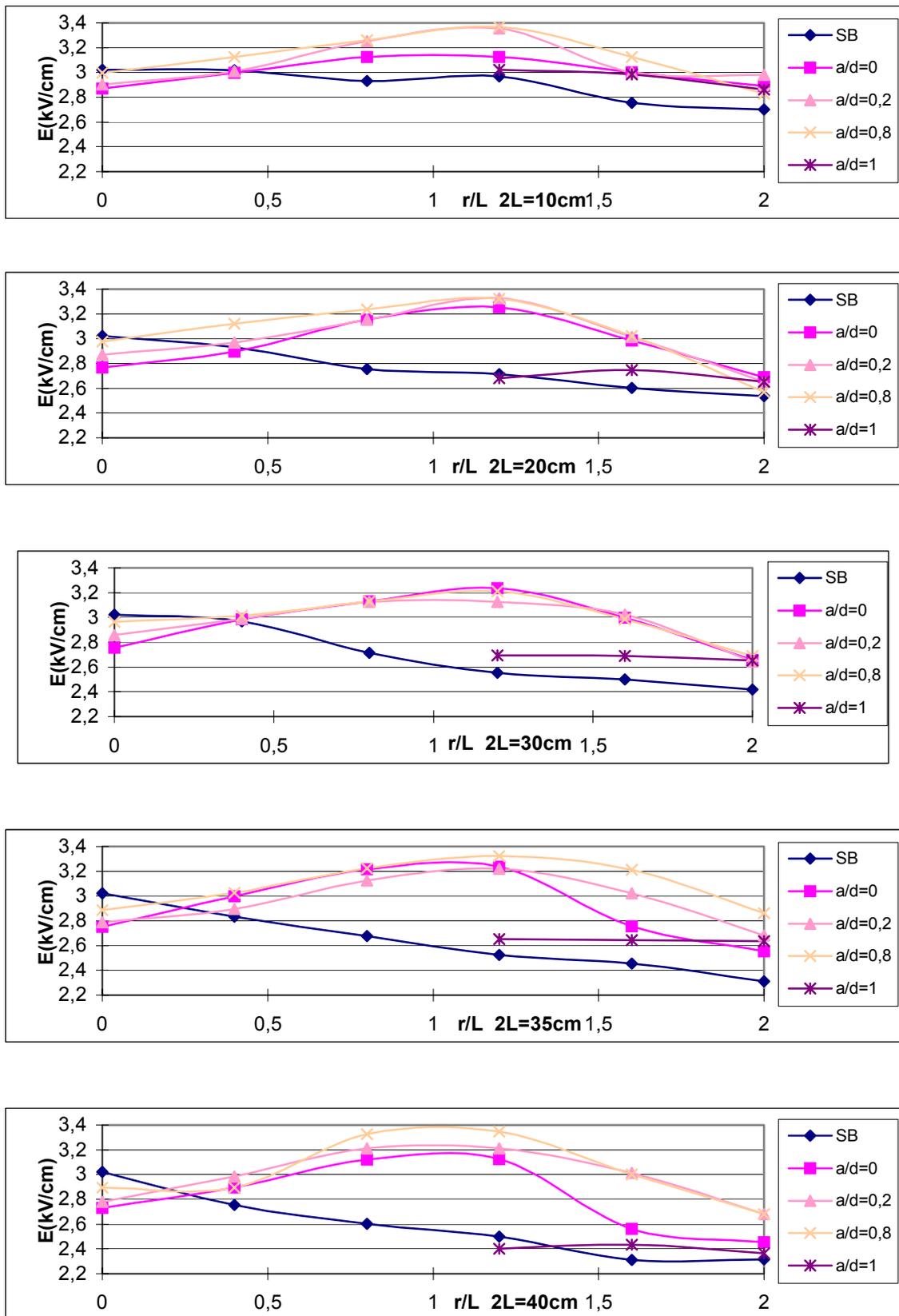


Figure III. 8-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=16$ cm, $U=0,5U_{0\%}$)

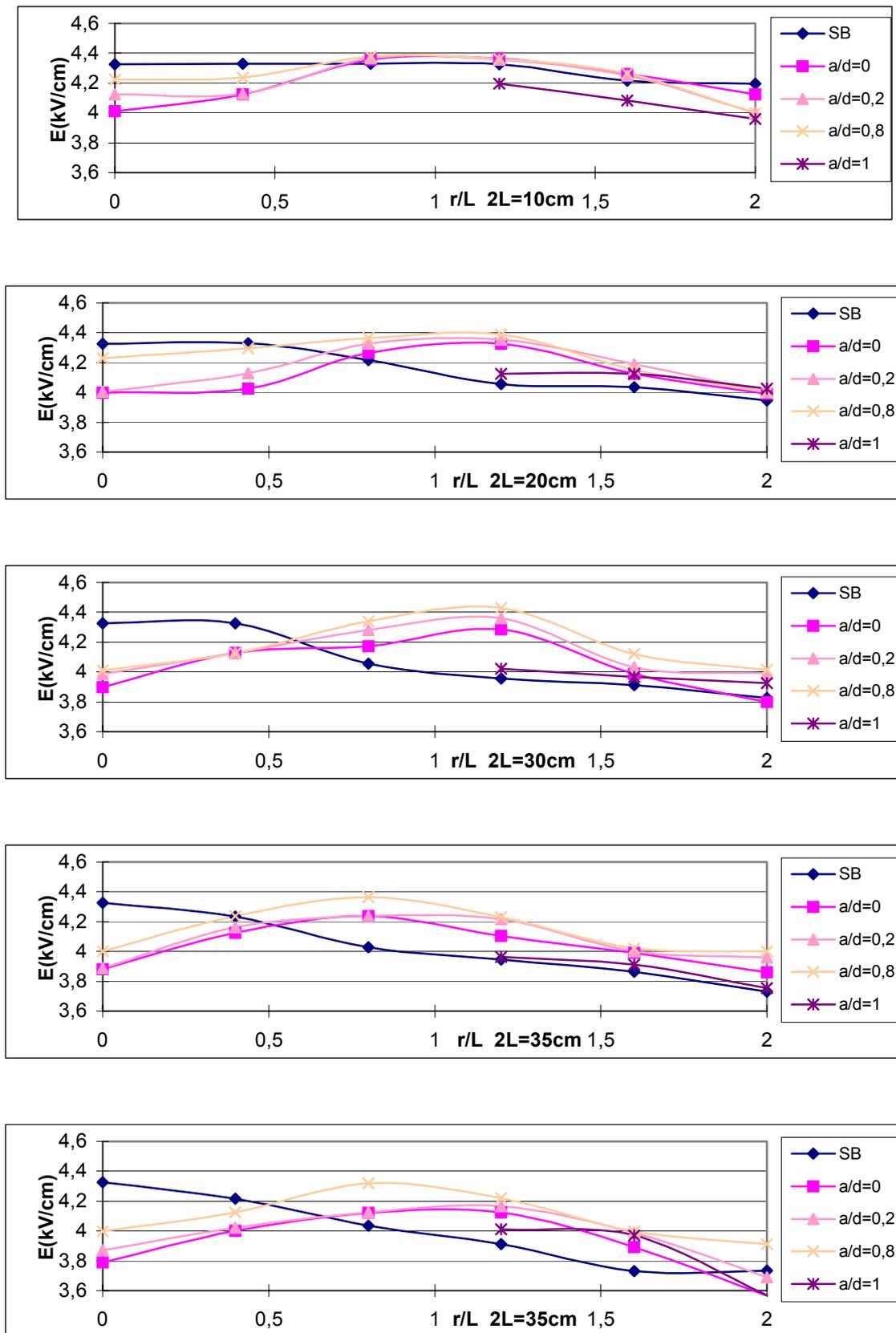


Figure III. 8– b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=16$ cm, $U=0,8U_{0\%}$)

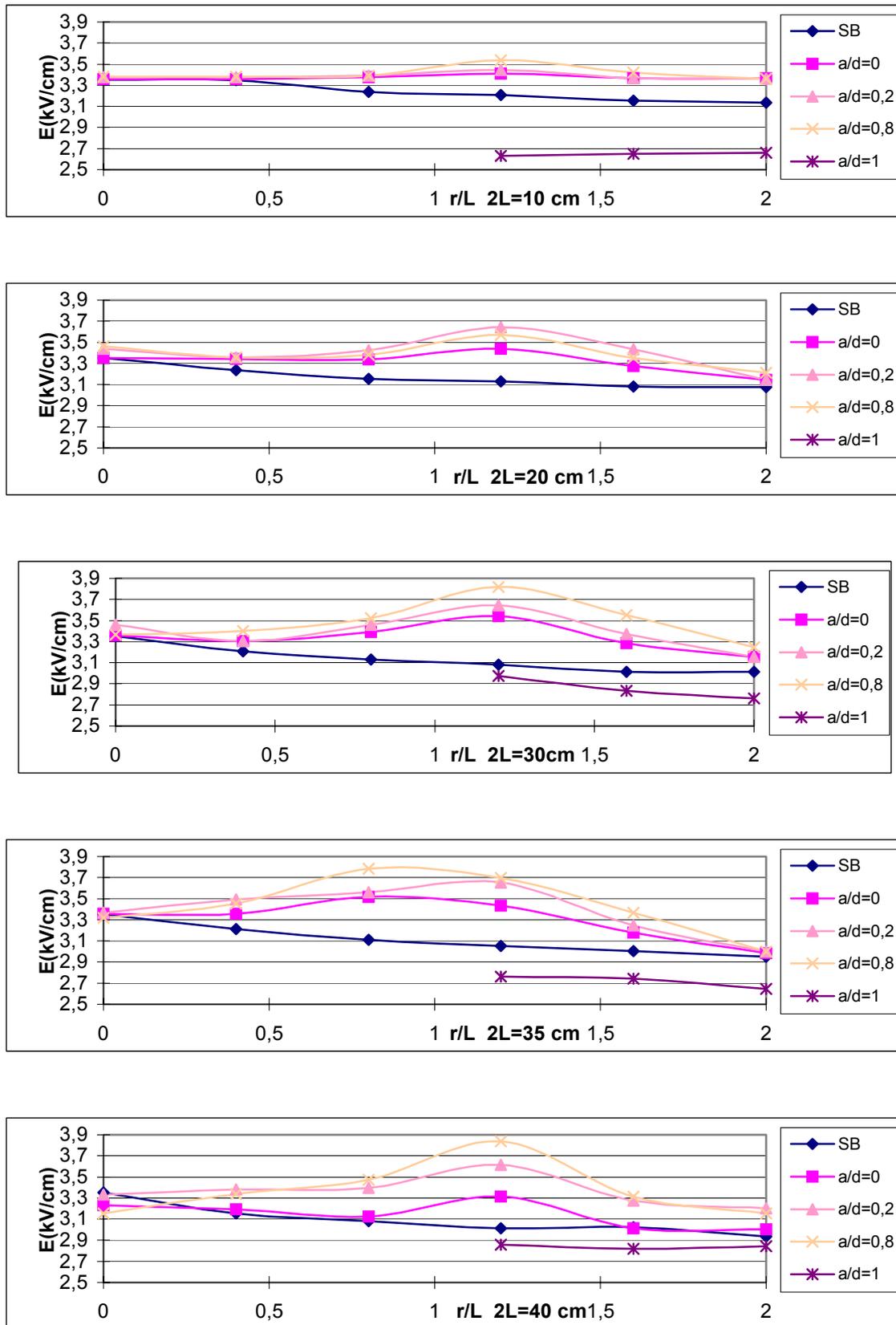


Figure III. 9-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=08$ cm, $U=0,2U_{0\%}$)

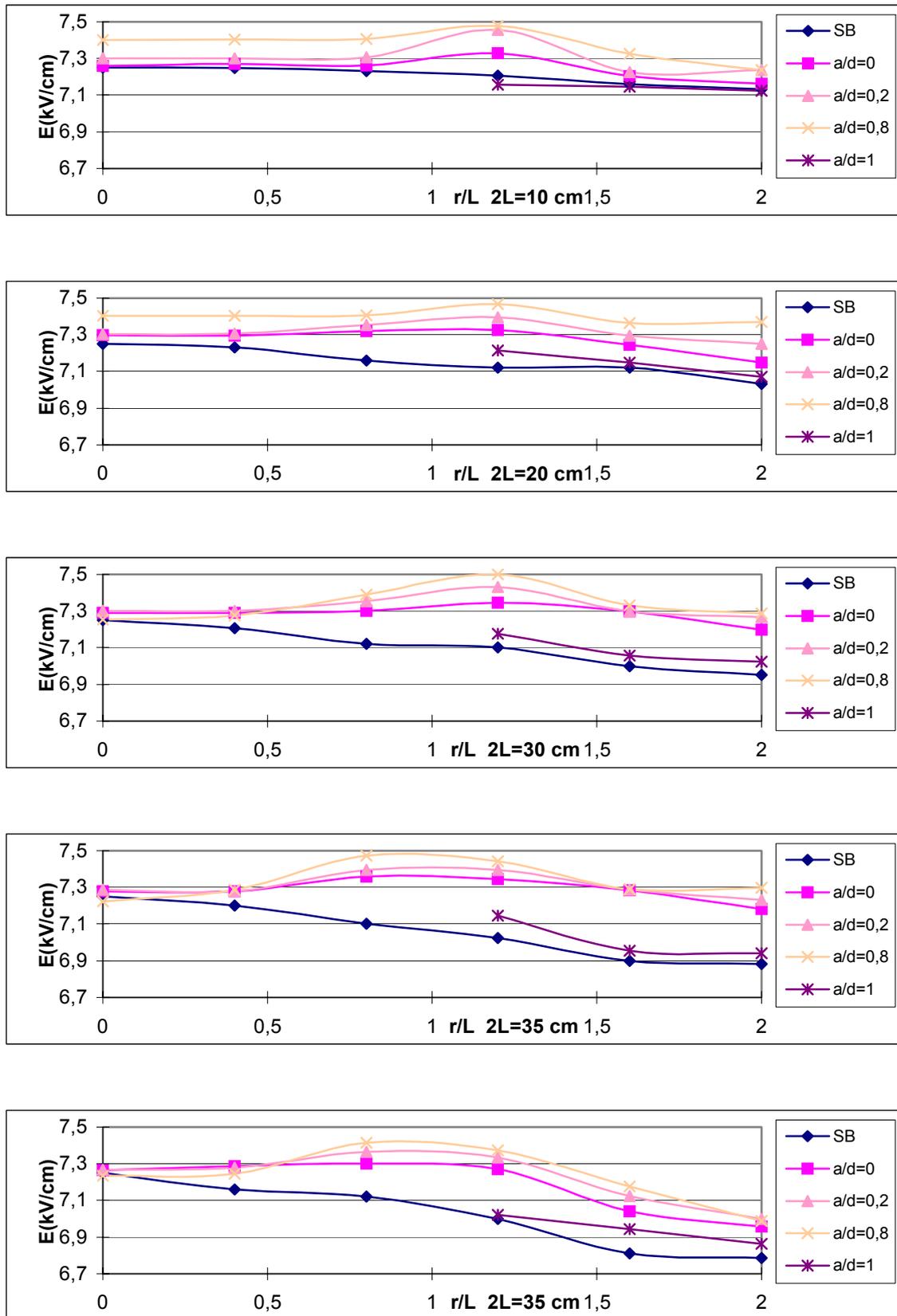


Figure III. 9– b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=08$ cm, $U=0,5U_{0\%}$)

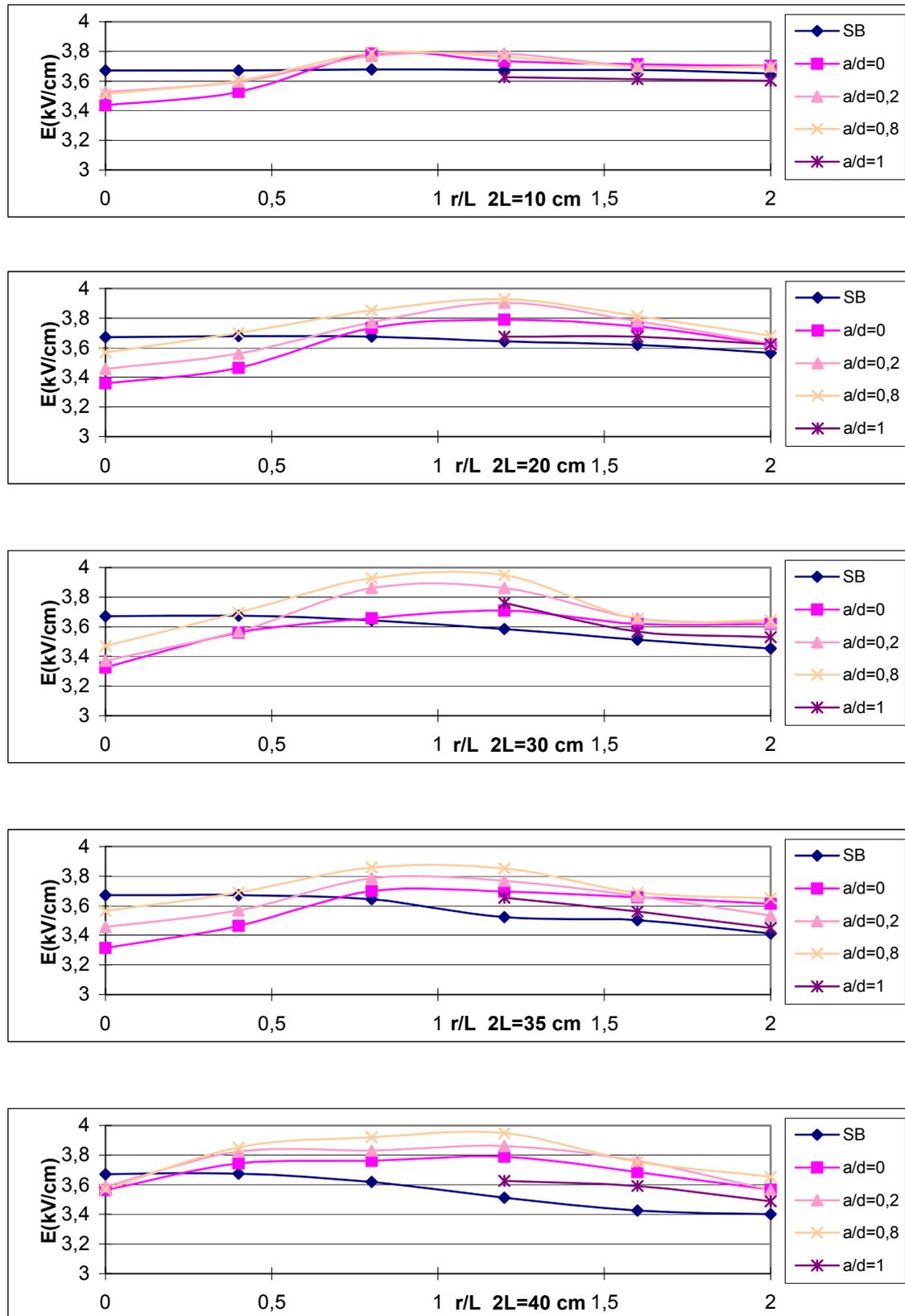


Figure III. 10-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12$ cm, $U=0,2U_{0\%}$)

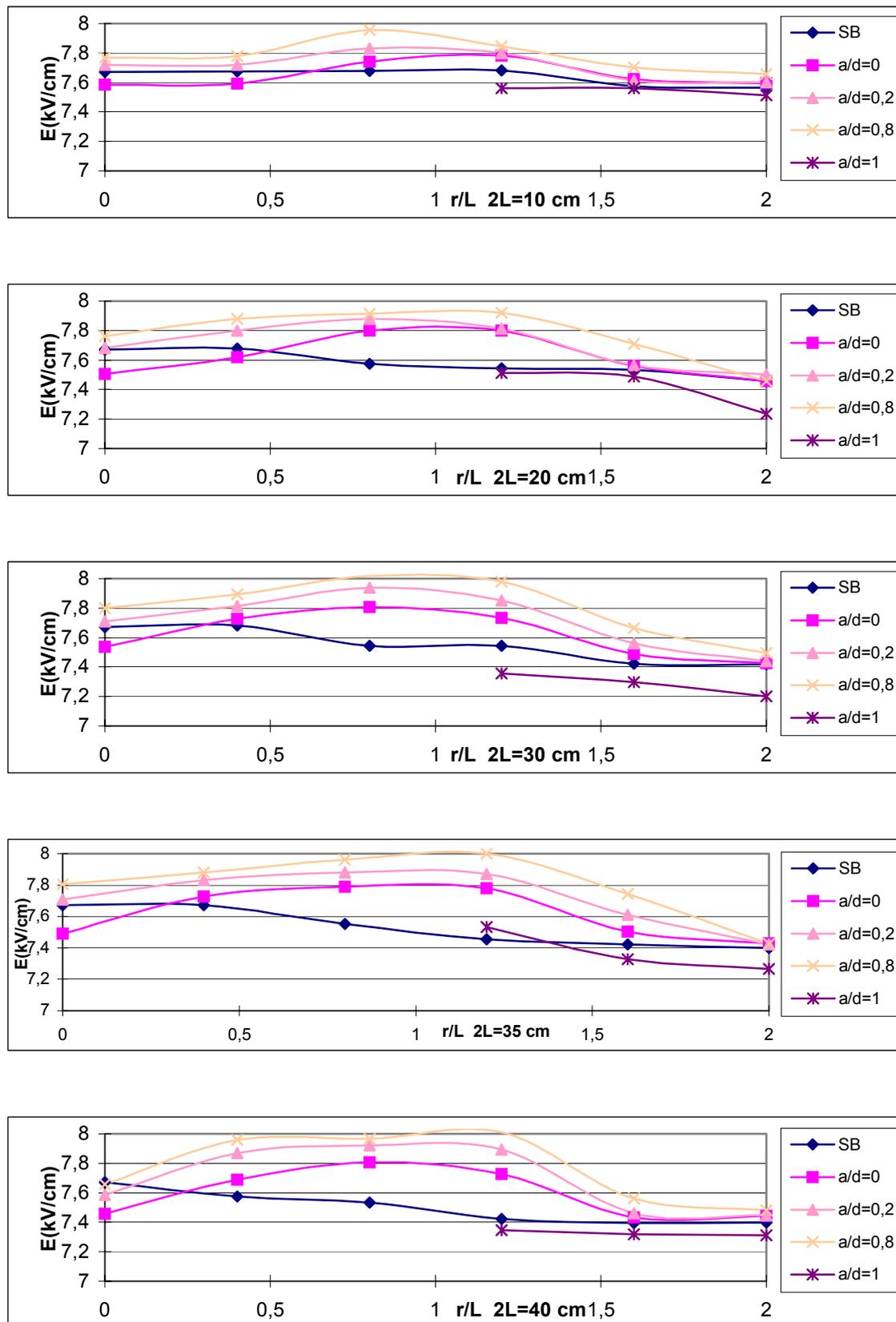


Figure III. 10- b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12$ cm, $U=0,5U_{0\%}$)

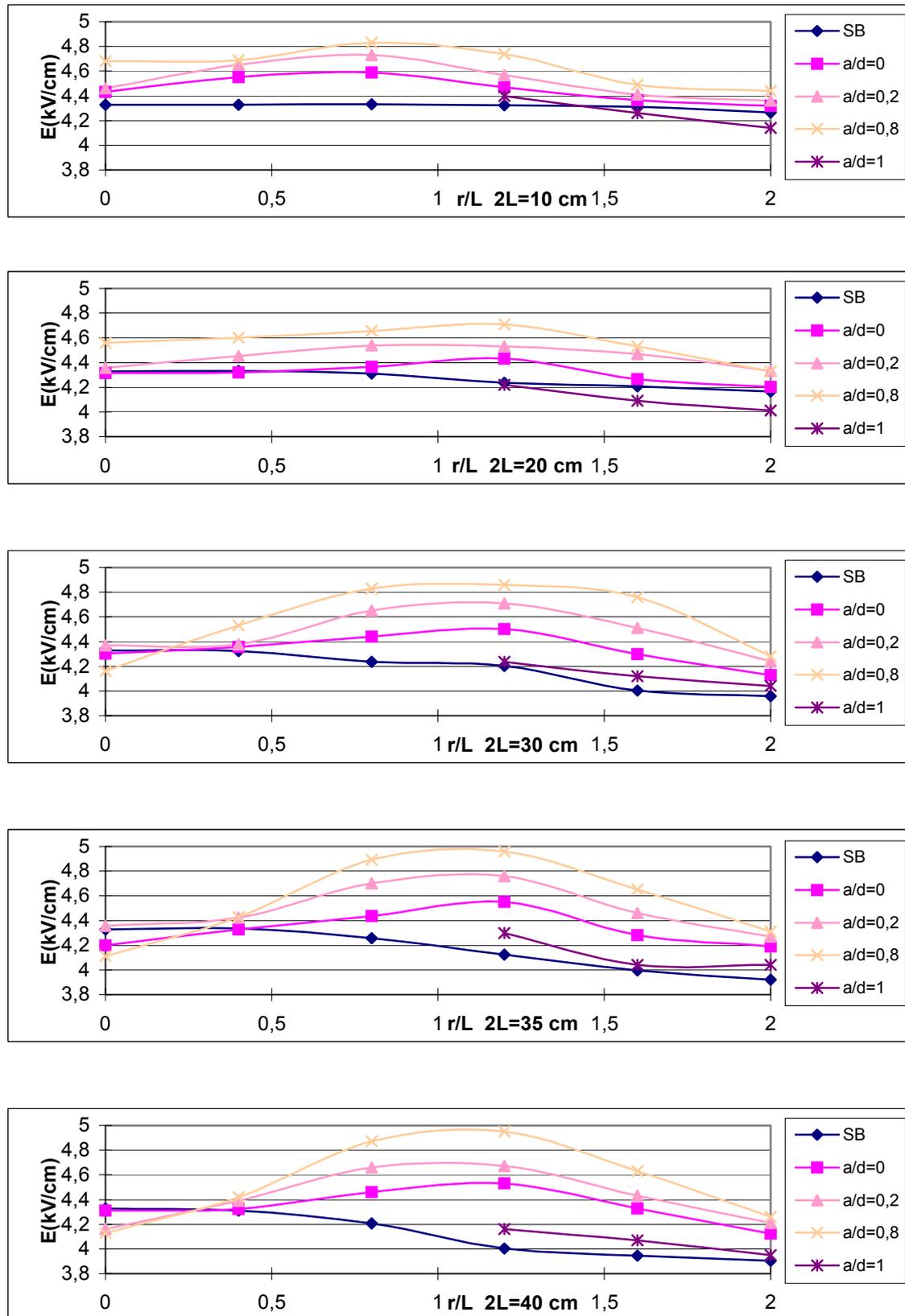


Figure III. 11-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=16$ cm, $U=0,2U_{0\%}$)

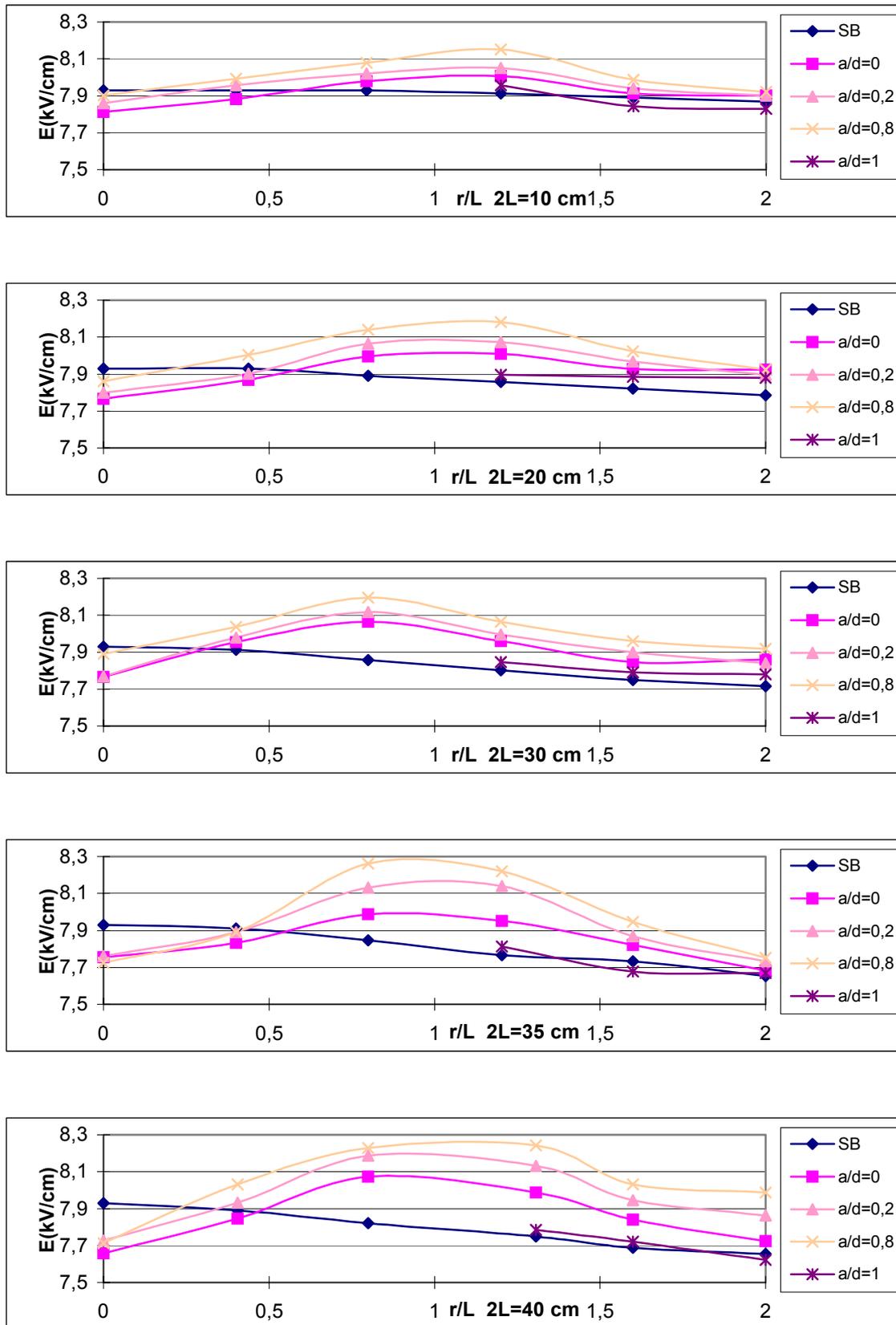
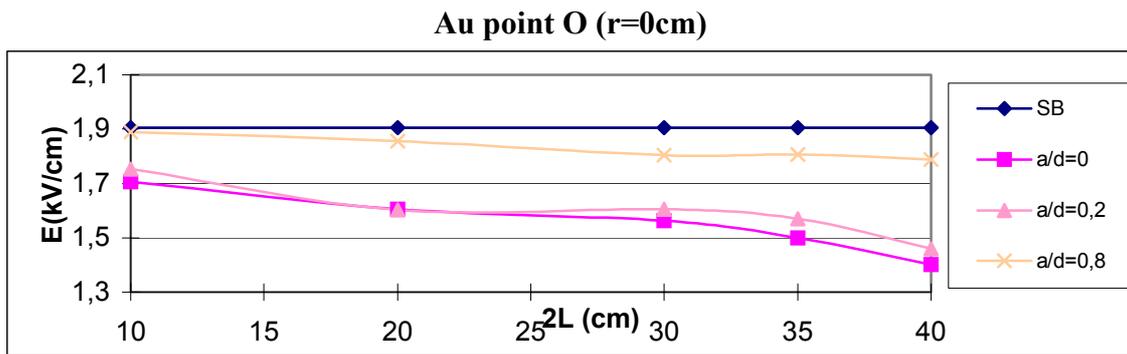
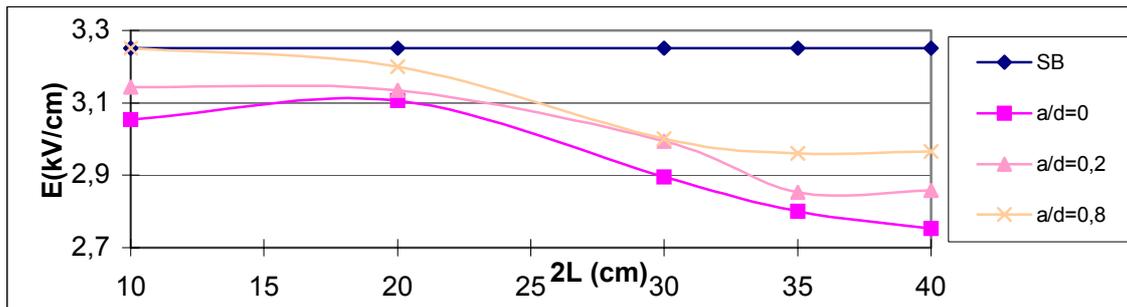


Figure III. 11– b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=16$ cm, $U=0,5U_{0\%}$).



(a)

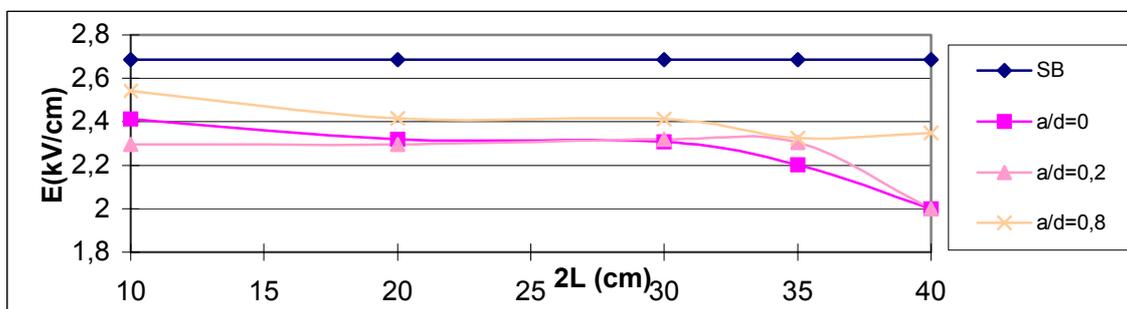


(b)

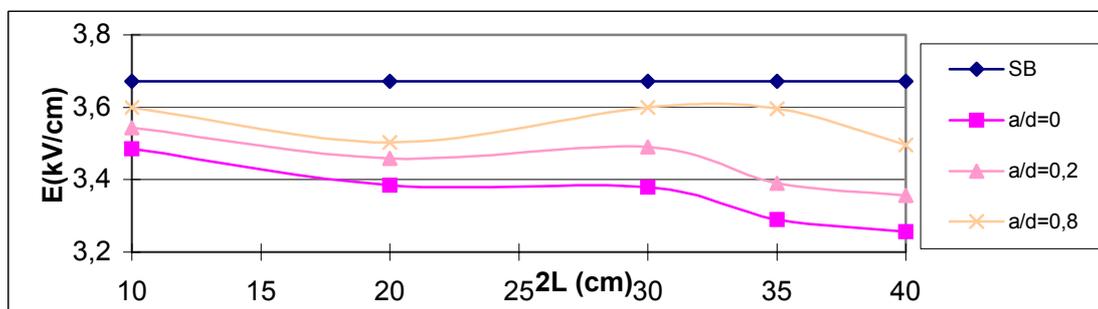
Figure III. 12– Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, $d=0.8$ cm

(a) - $U=0.5U_{0\%}$

(b) - $U=0.8U_{0\%}$



(a)

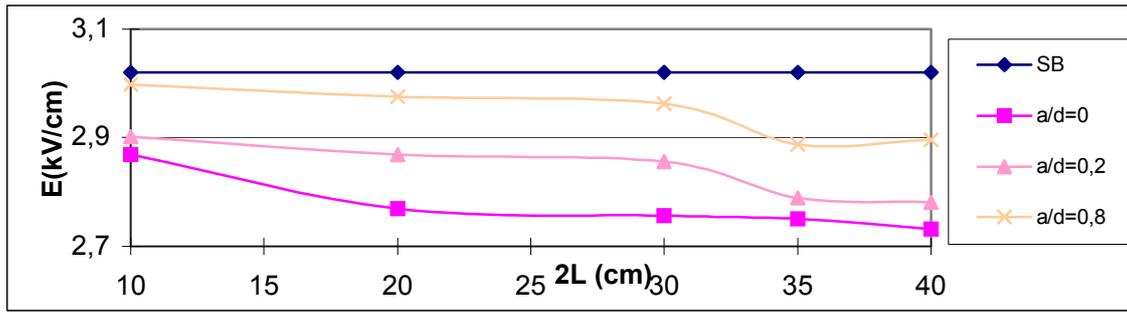


(b)

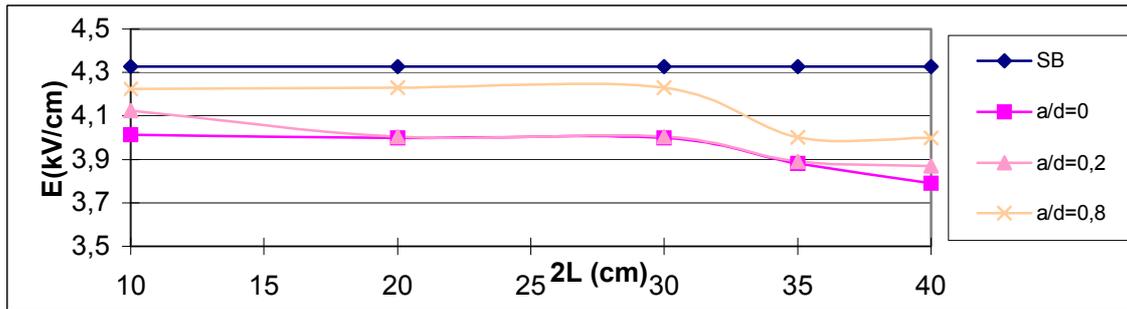
Figure III. 13 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, $d=12$ cm

(a) - $U=0.5U_{0\%}$

(b) - $U=0.8U_{0\%}$



(a)

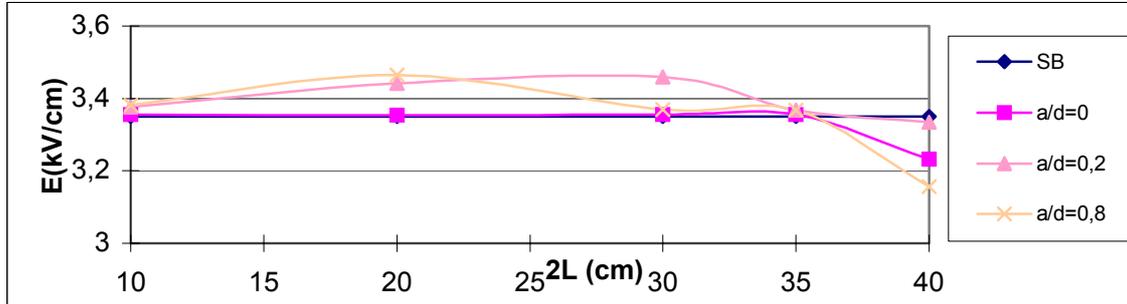


(b)

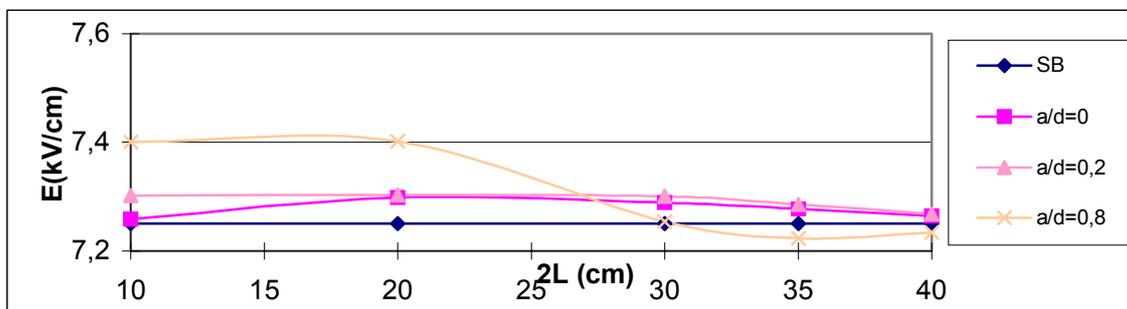
Figure III. 14 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, $d=16\text{cm}$

(a) - $U=0,5U_{0\%}$

(b) - $U=0,8U_{0\%}$



(a)

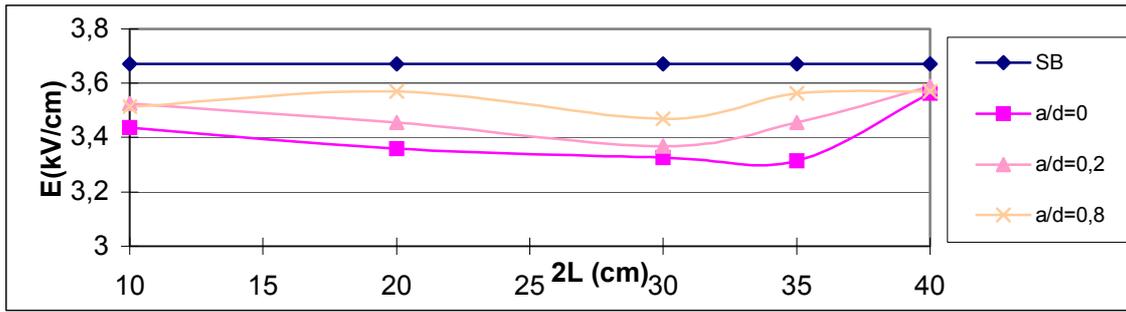


(b)

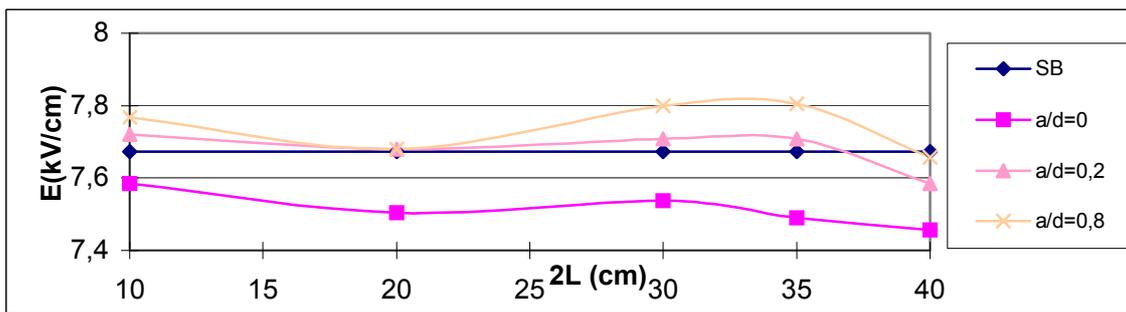
Figure III. 15 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=08\text{cm}$

(a) - $U=0,2U_{0\%}$

(b) - $U=0,5U_{0\%}$



(a)

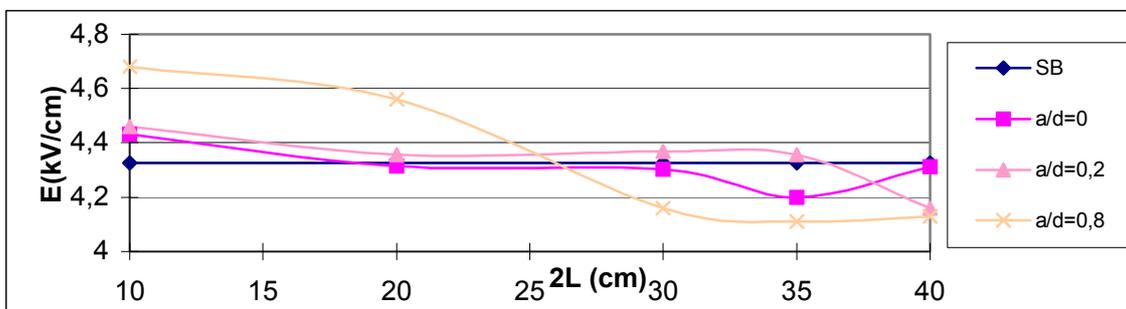


(b)

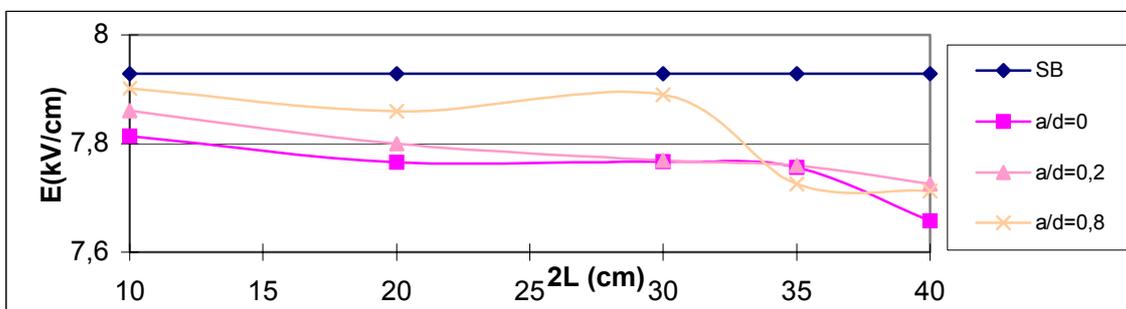
Figure III. 16 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=12\text{cm}$

(a) - $U=0,2U_0\%$

(b) - $U=0,5U_0\%$



(a)



(b)

Figure III. 17 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=16\text{cm}$

(a) - $U=0,2U_0\%$

(b) - $U=0,5U_0\%$

III.3.2 INFLUENCE DE LA LARGEUR DE LA BARRIERE

Pour étudier la variation du champ électrique en fonction de la largeur de l'écran, nous prenons les mêmes positions et les mêmes largeurs des plaques utilisées précédemment.

Les figures III.18 à III.20 (respectivement III.21 à III.23) représentent les variations du champ électrique sur le plan en fonction des différentes largeurs de la barrières en polarité positive (respectivement en polarité négative) de l'onde de choc de foudre. Nous présentons sur les figures (III.24, III.29) les variations du champ au point O (axe du plan au dessous de la pointe).

Zone N° 1 :

On voit clairement d'après les figures III.18 à III.20 (polarité positive), que le champ électrique est très faible pour les grandes largeurs de la barrière ($2L=30, 35, 40\text{cm}$) et il augmente avec la diminution de la largeur de la barrière ($2L=10, 20\text{cm}$). Ceci peut être expliqué par le fait que l'écran joue le rôle d'un obstacle géométrique empêchant les ions positifs de gagner la cathode, plus la largeur de la barrière augmente plus le nombre d'ions freinés devient de plus en plus important . En effet ces ions, dans leur mouvement vers la cathode, se répartissent sur la surface de la barrière, et quand la largeur de la barrière augmente, cette diminution serait dûe à une uniformisation du champ qui devient de plus en plus importante avec l'augmentation de la largeur (en particulier au point O sur l'axe du plan sur les figures III.24 à III.26).

Pour la polarité négative, nous trouvons les mêmes résultats que pour la polarité positive (figures III.21, III.22, III.23). Le champ électrique est très faible pour les grandes largeurs de la barrière. Il augmente avec la diminution de la largeur de la barrière. Sauf pour la distance inter électrodes $d=12\text{cm}$ et pour un niveau de tension $U=0.2U_{0\%}$, où nous remarquons que le champ électrique pour la barrière de largeur $2L=35\text{ cm}$, est supérieur à celui obtenu dans le cas de la barrière de largeur $2L=10\text{cm}$.

Zone N° 2 :

Dans cette zone le champ électrique pour les grandes largeurs de la barrière ($2L=30, 35, 40\text{cm}$) est supérieur à celui des petites largeurs ($2L=10, 20\text{cm}$).

Zone N° 3 :

Quand nous nous éloignons du bord de la barrière, le champ électrique diminue et tend vers une valeur constante. Dans cette zone, le champ électrique des petites barrières est supérieur à celui des grandes barrières.

En général, l'insertion d'une barrière isolante conduit à la réduction du champ électrique au plan, quelle que soit sa largeur.

Le champ est pratiquement uniforme dans l'intervalle barrière-plan pour les grandes largeurs.

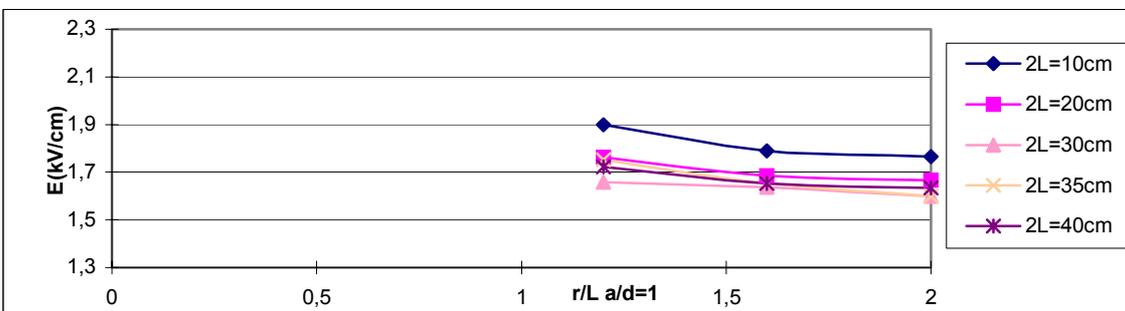
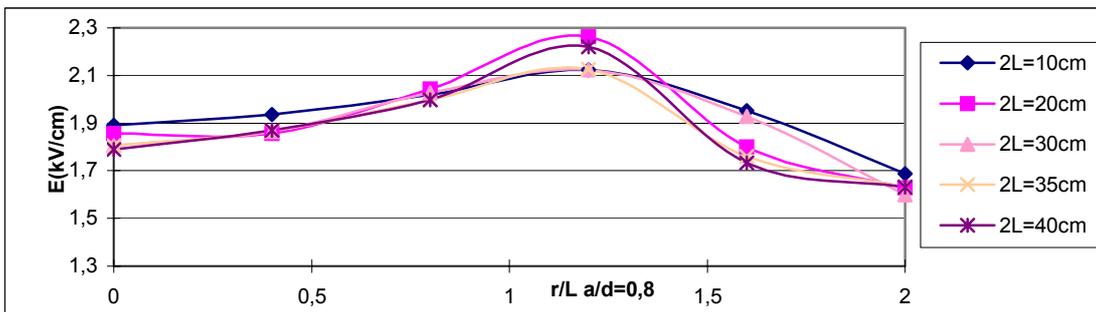
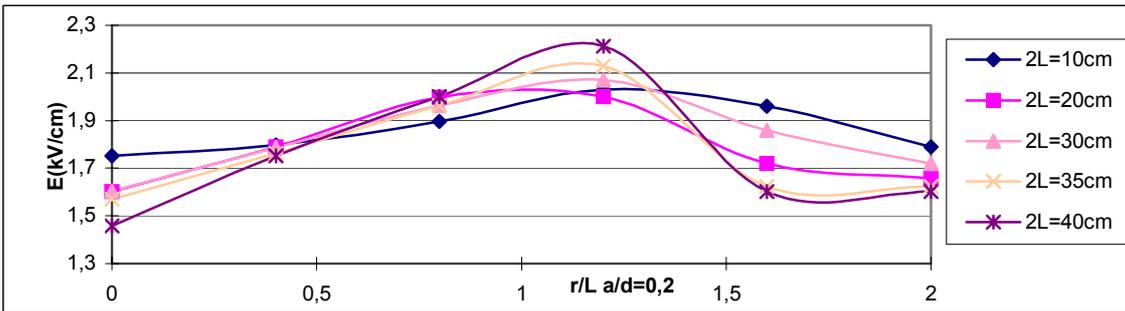
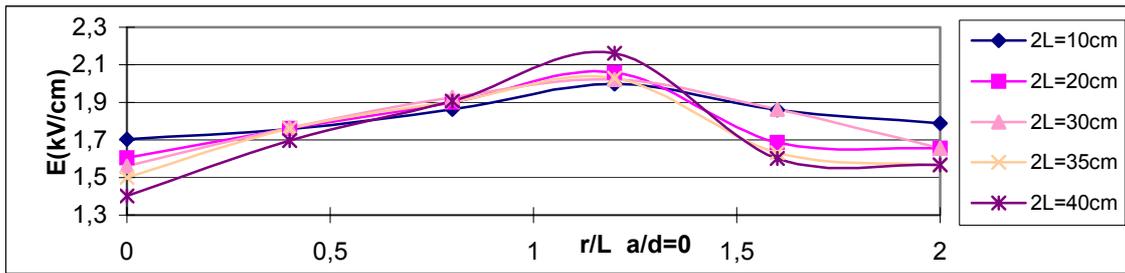


Figure III. 18-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=08\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$)

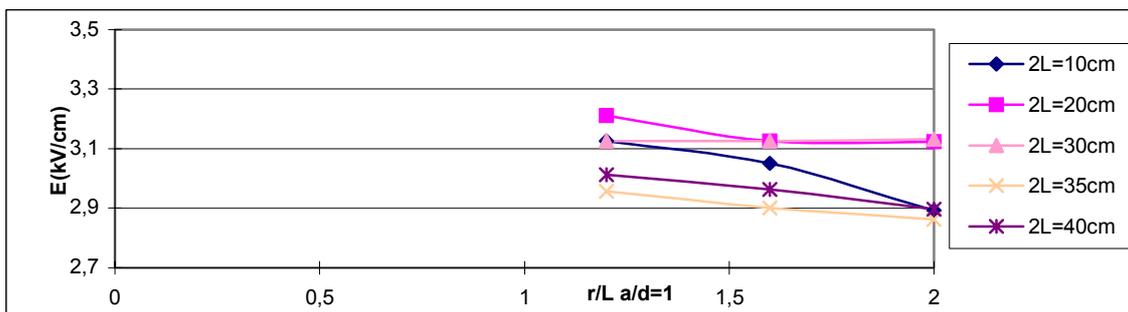
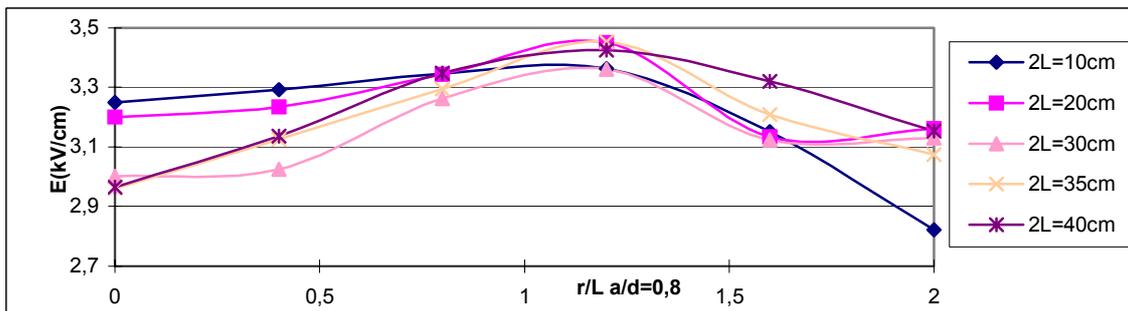
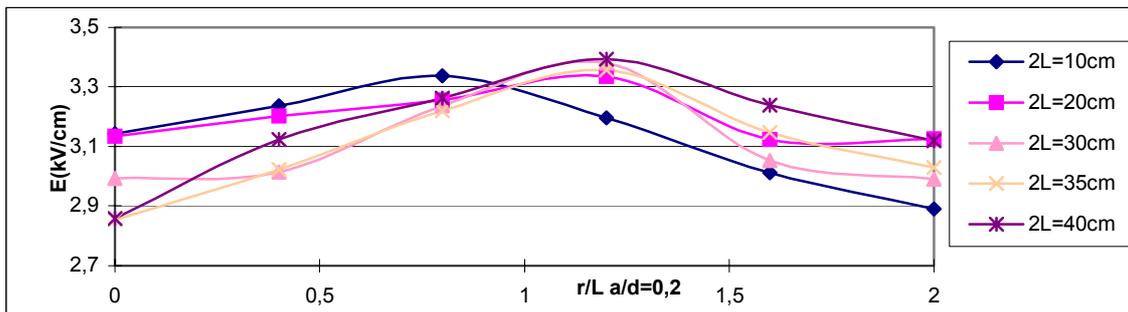
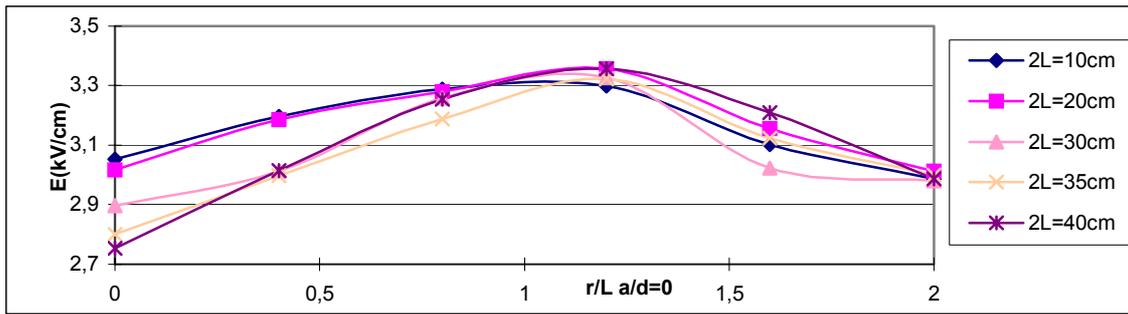


Figure III. 18-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=0,8$ cm, $U=0,8U_{0\%}$)

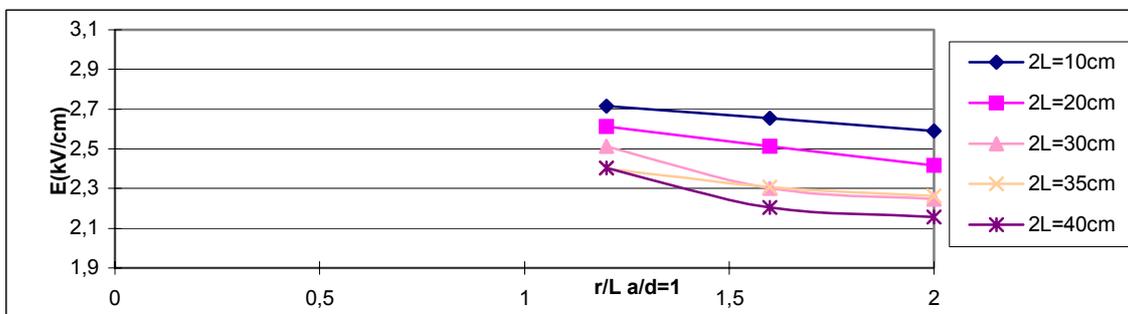
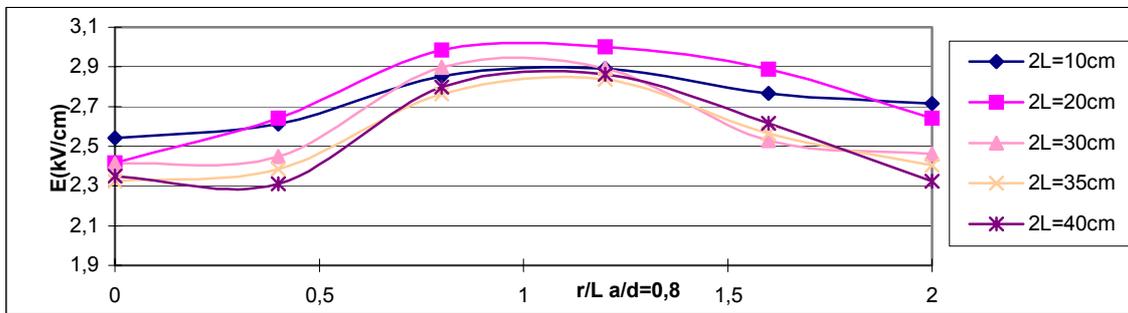
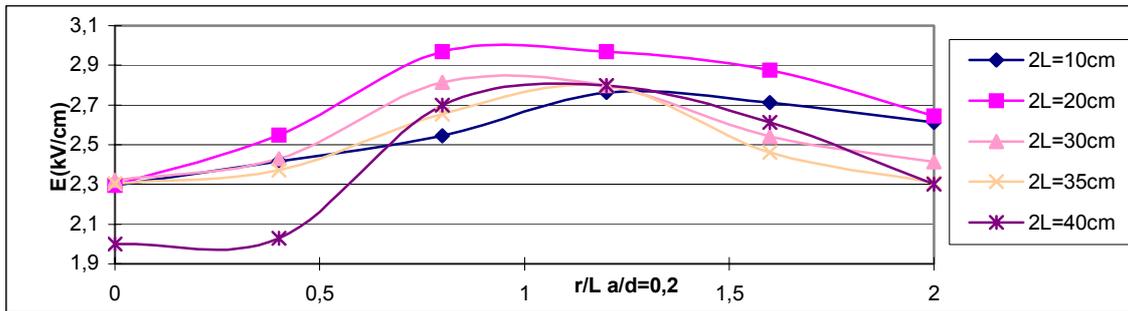
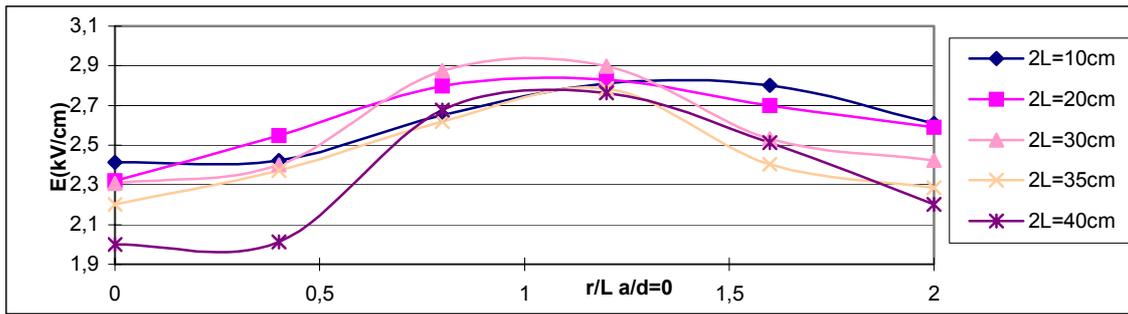


Figure III. 19-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$)

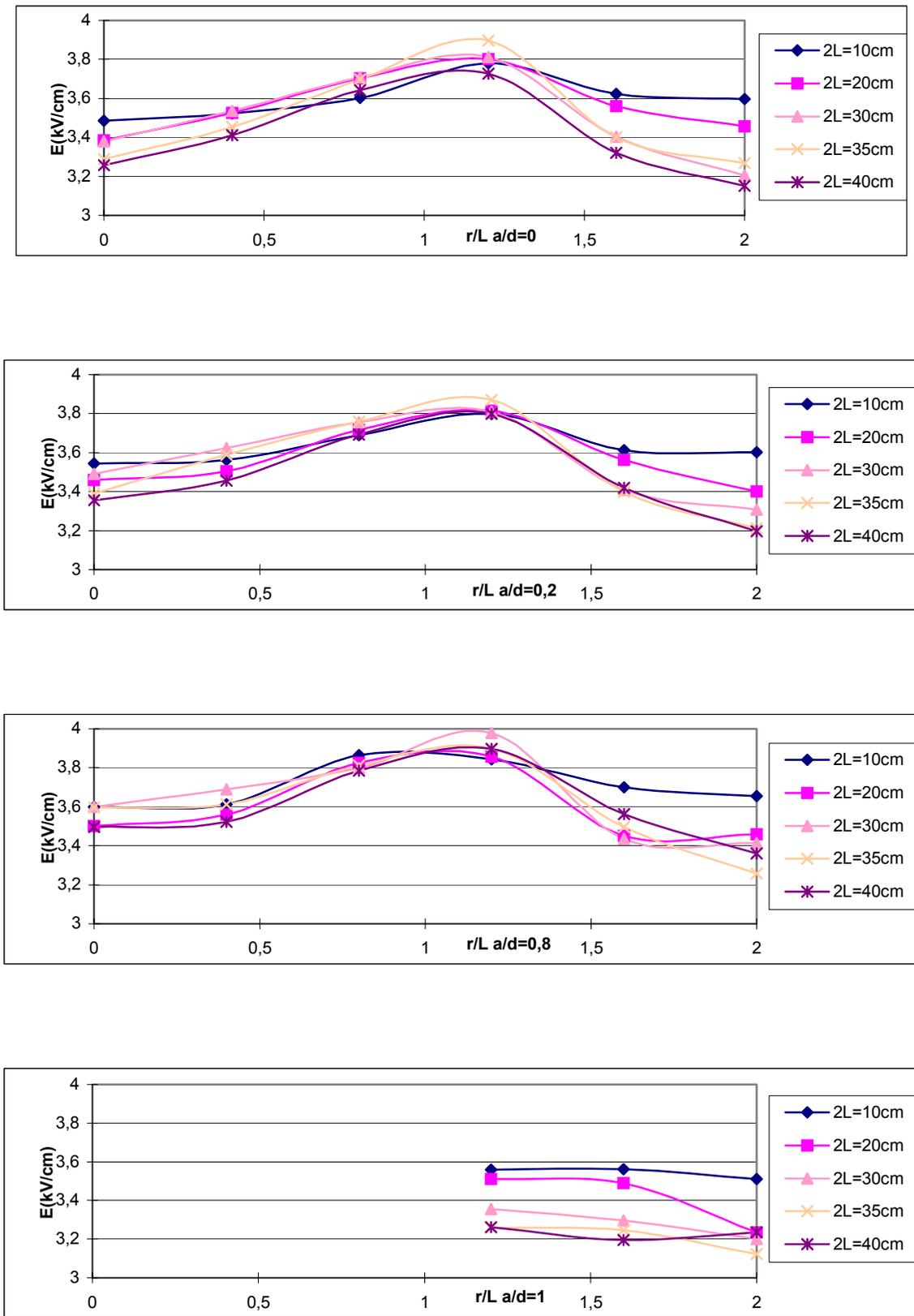


Figure III. 19-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12$ cm, $U=0,8U_0\%$)

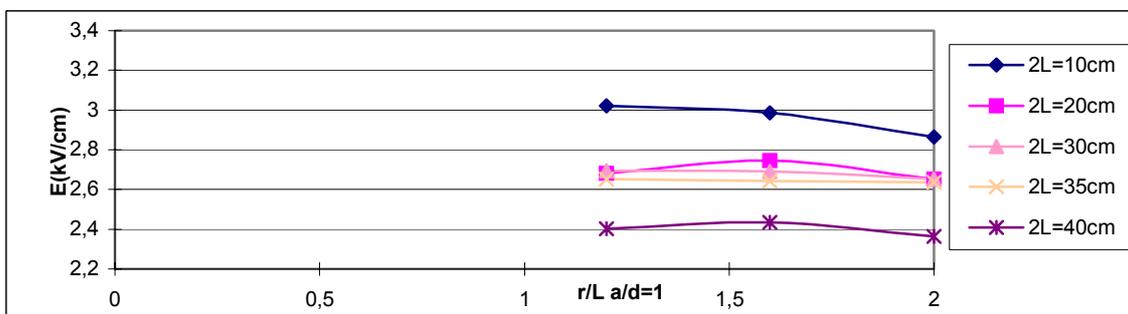
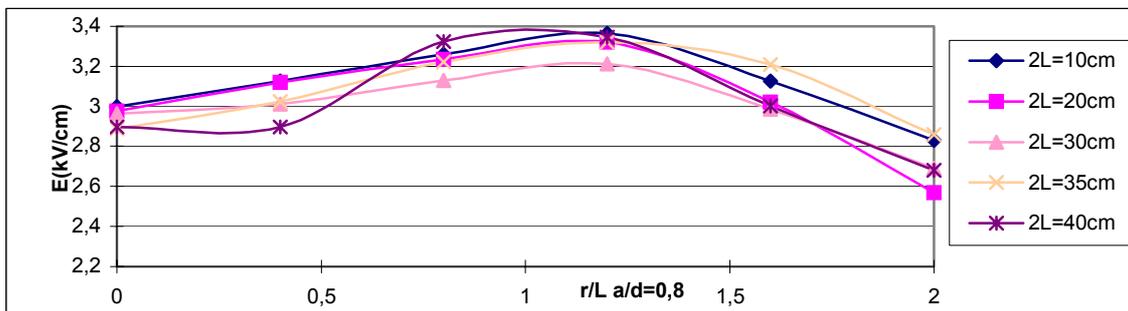
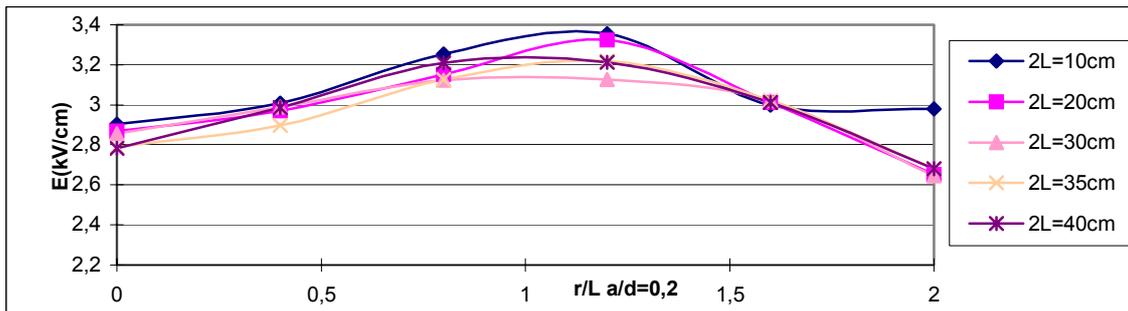
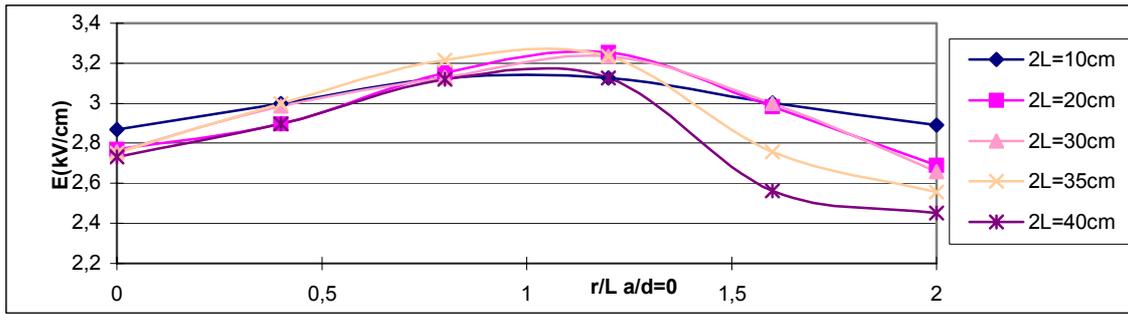


Figure III. 20-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=16\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$)

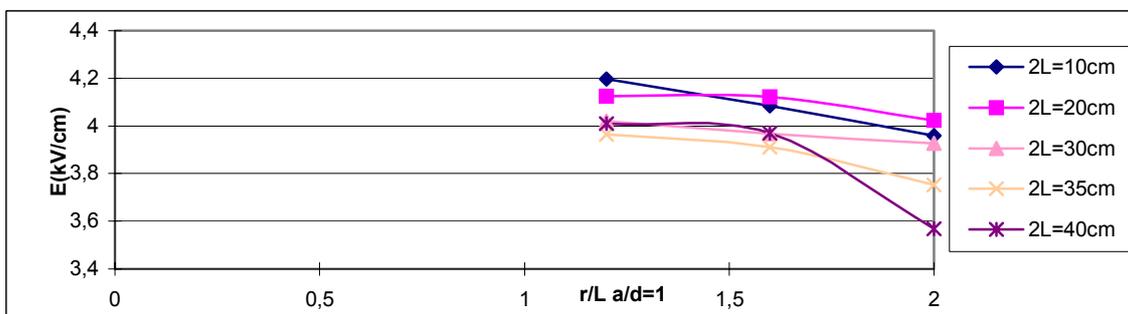
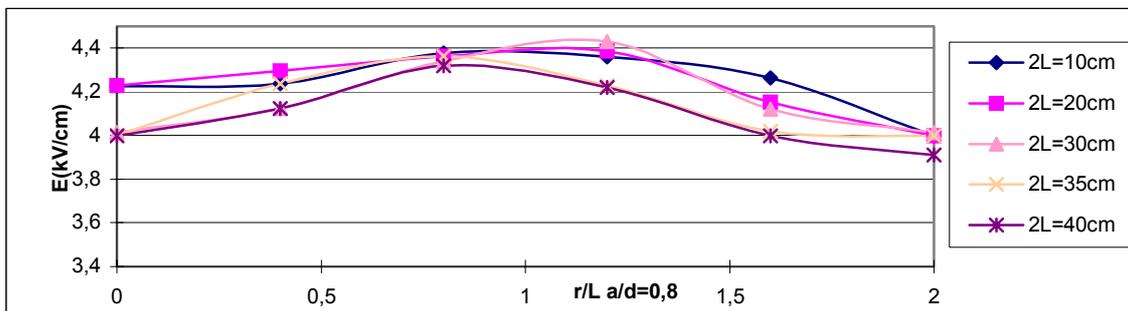
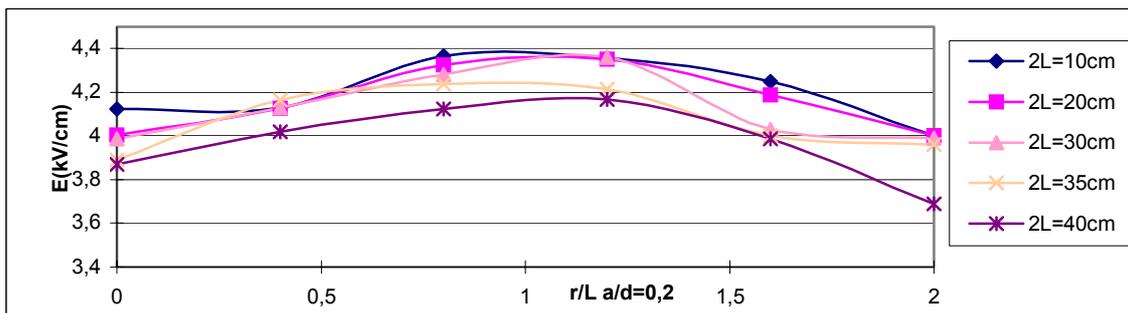
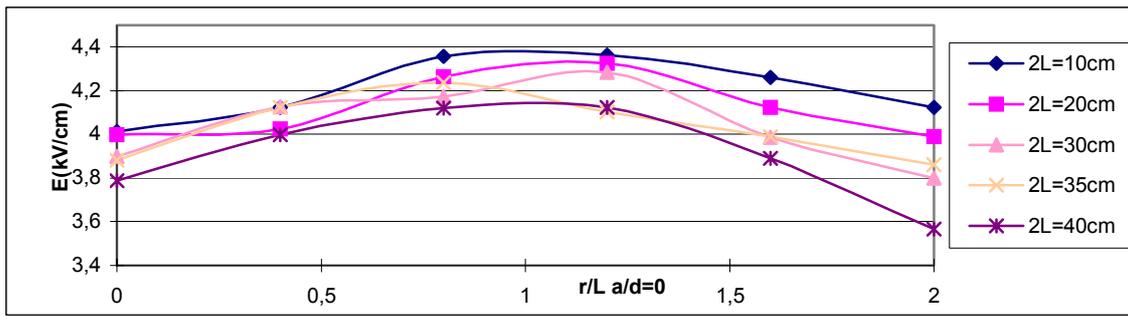


Figure III. 20-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=16\text{cm}$, $U=0,8U_{0\%}$)

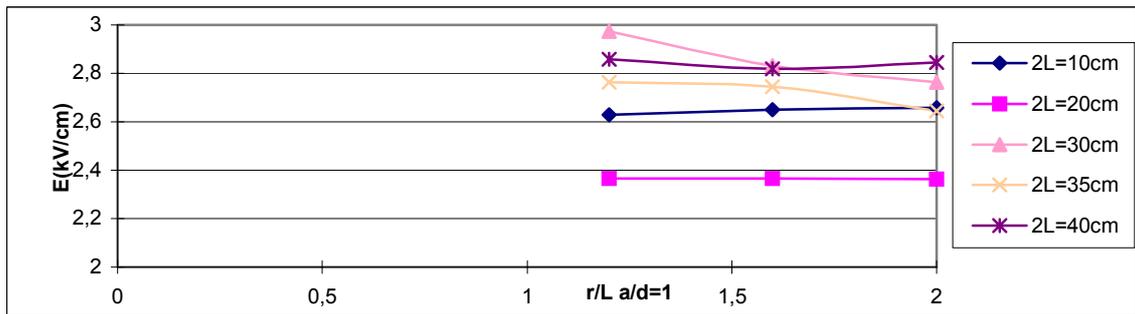
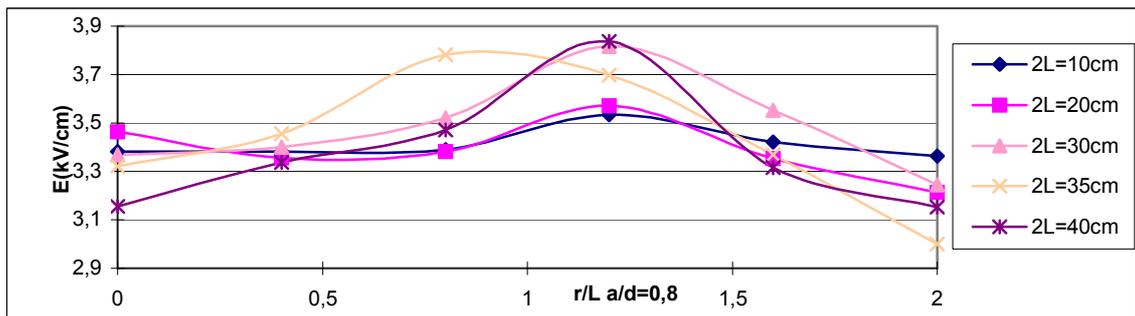
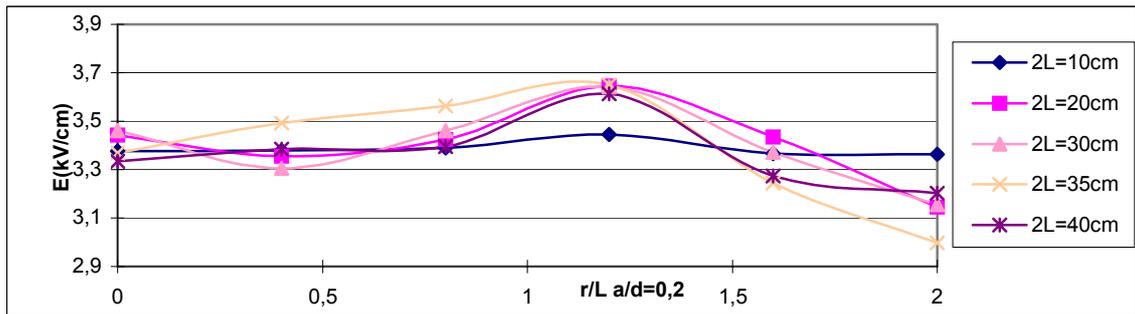
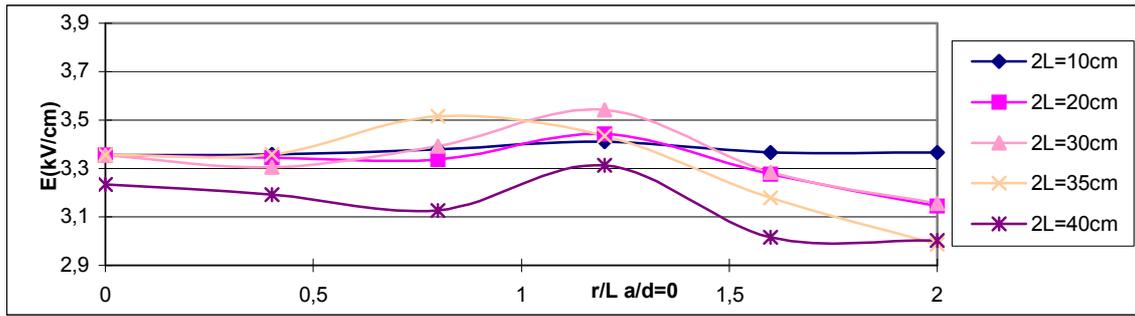


Figure III. 21-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=08$ cm, $U=0,2U_{0\%}$)

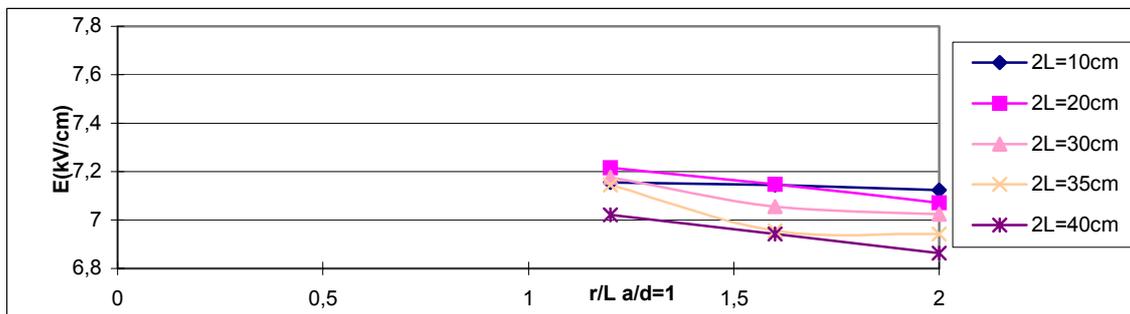
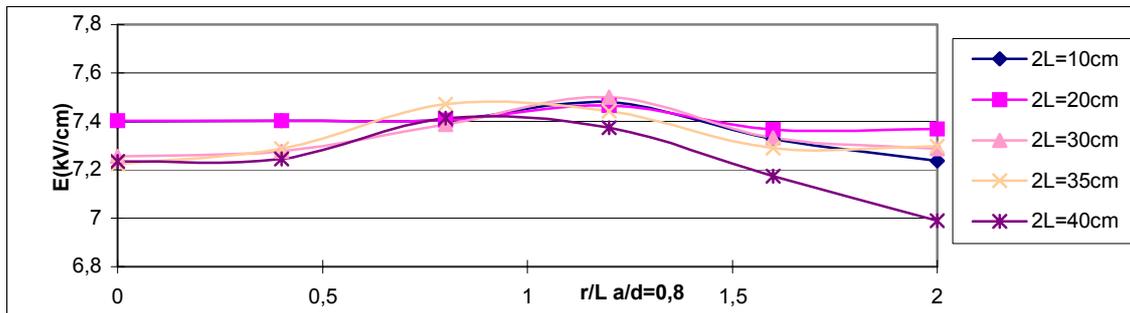
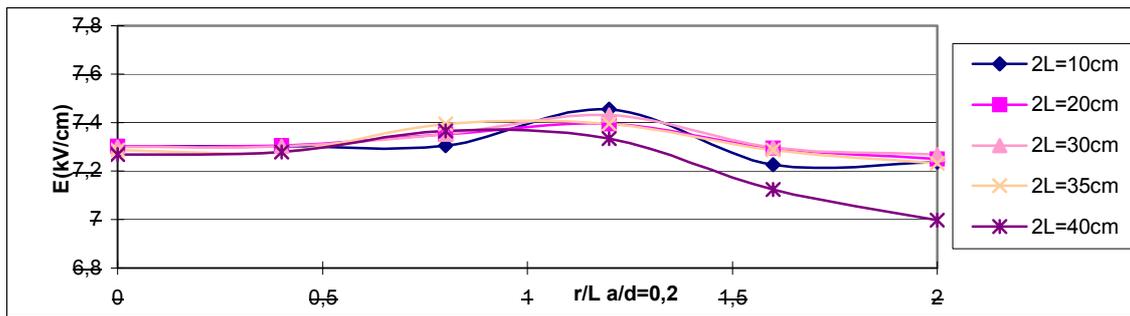
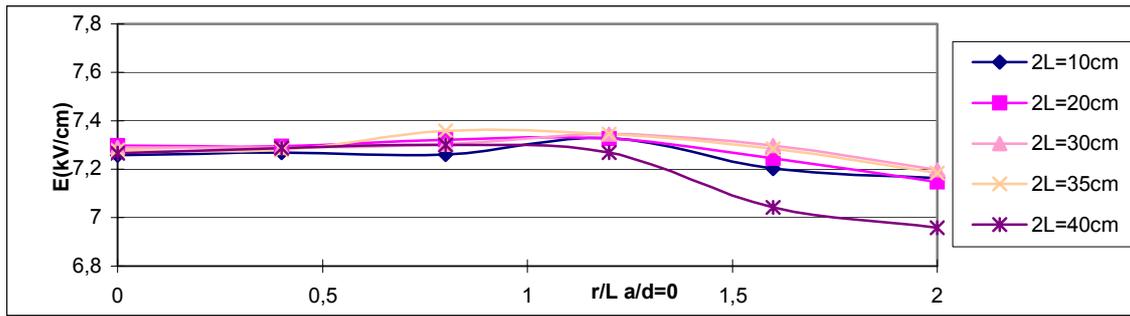


Figure III. 21-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=08\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$)

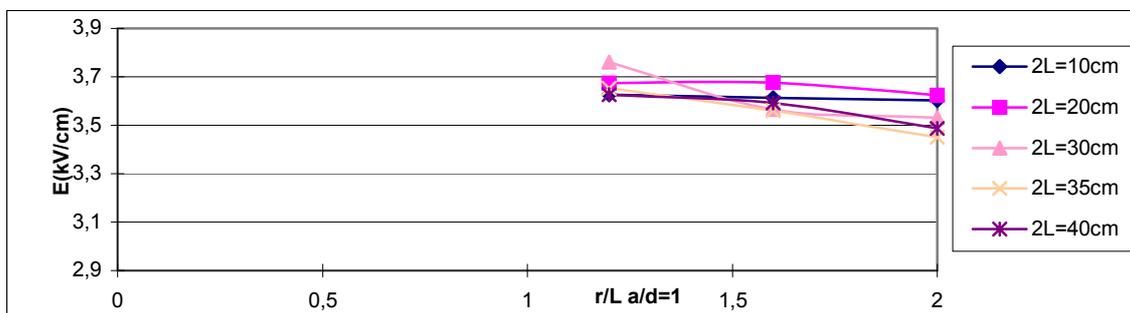
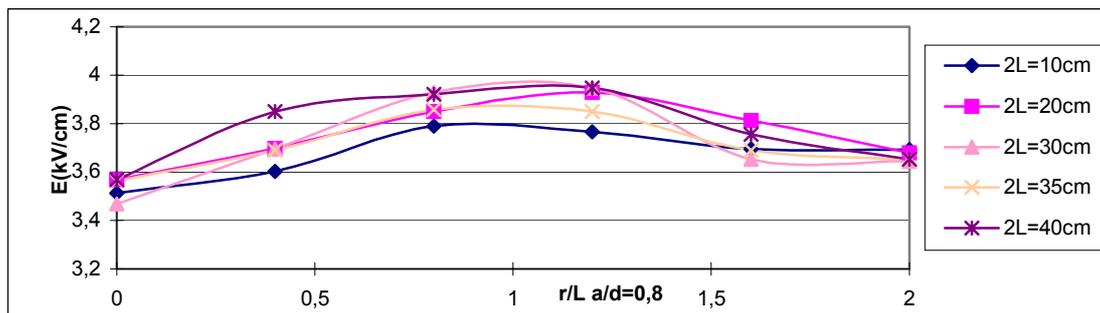
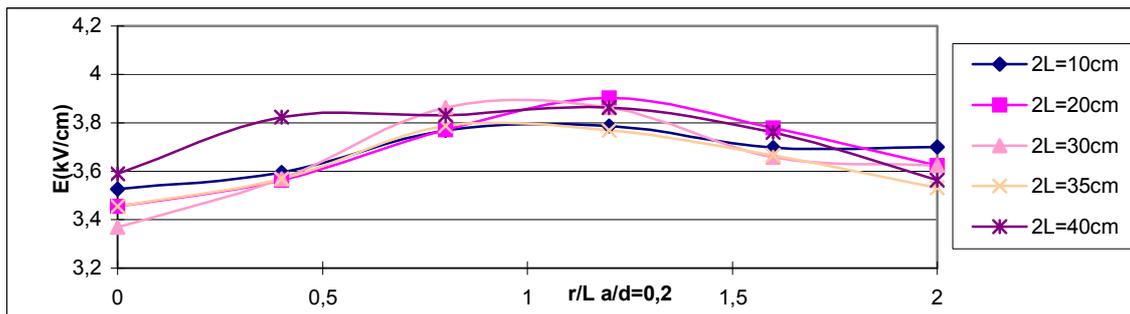
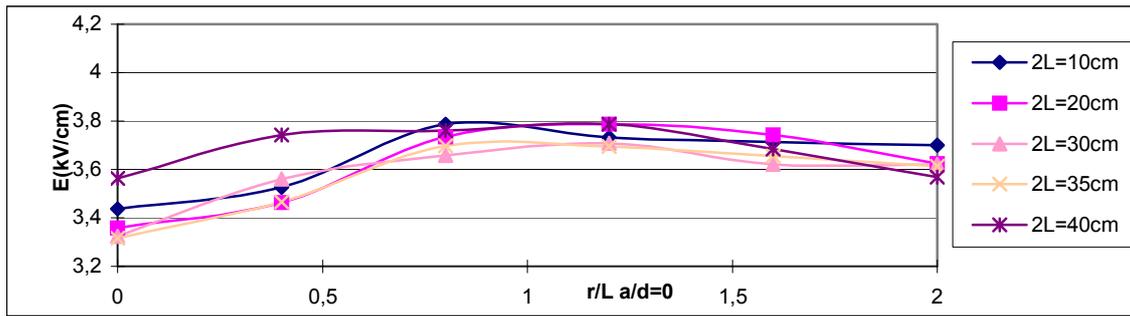


Figure III. 22-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12\text{cm}$, $U=0,2U_{0\%}$)

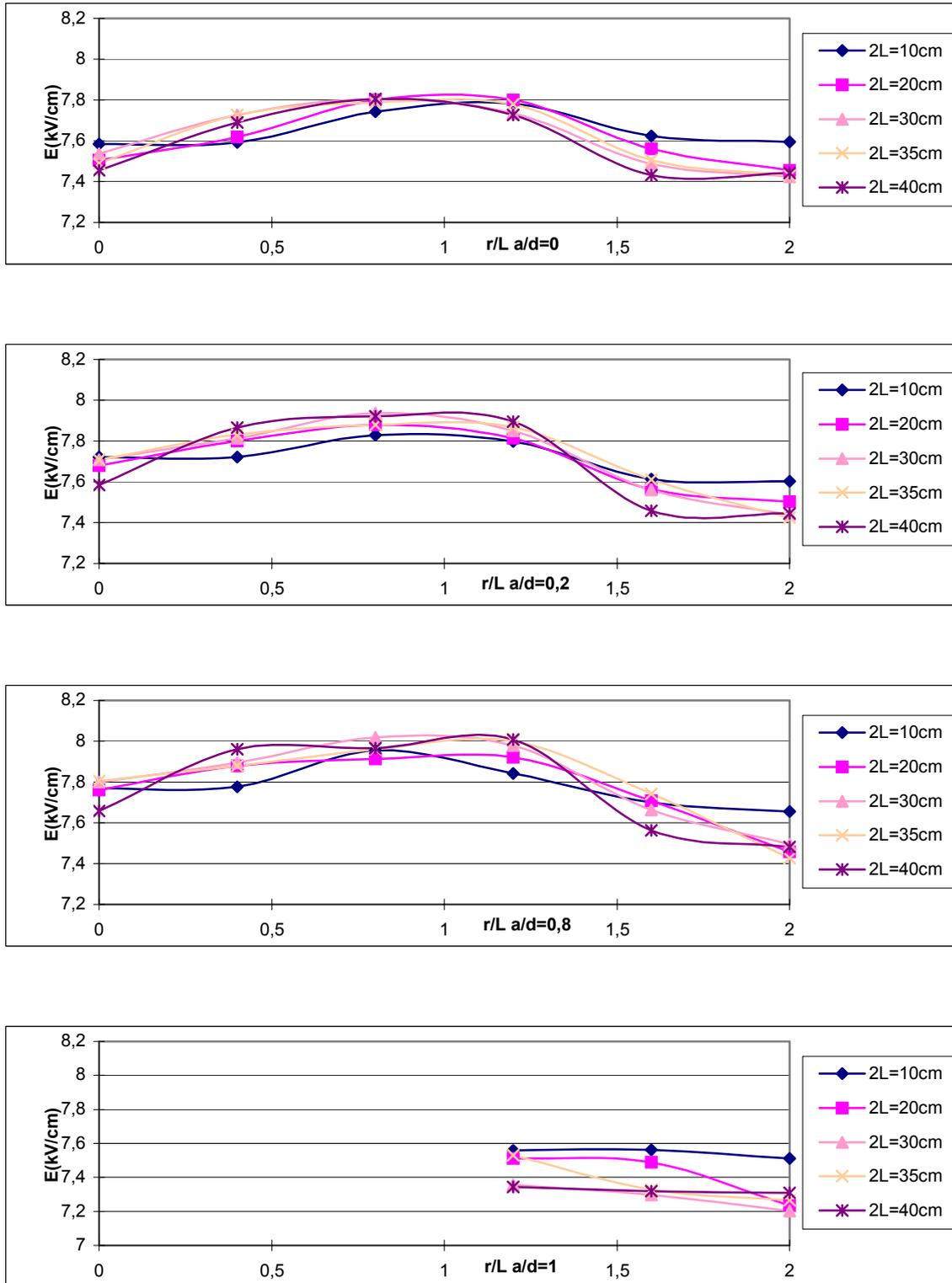


Figure III. 22–b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$)

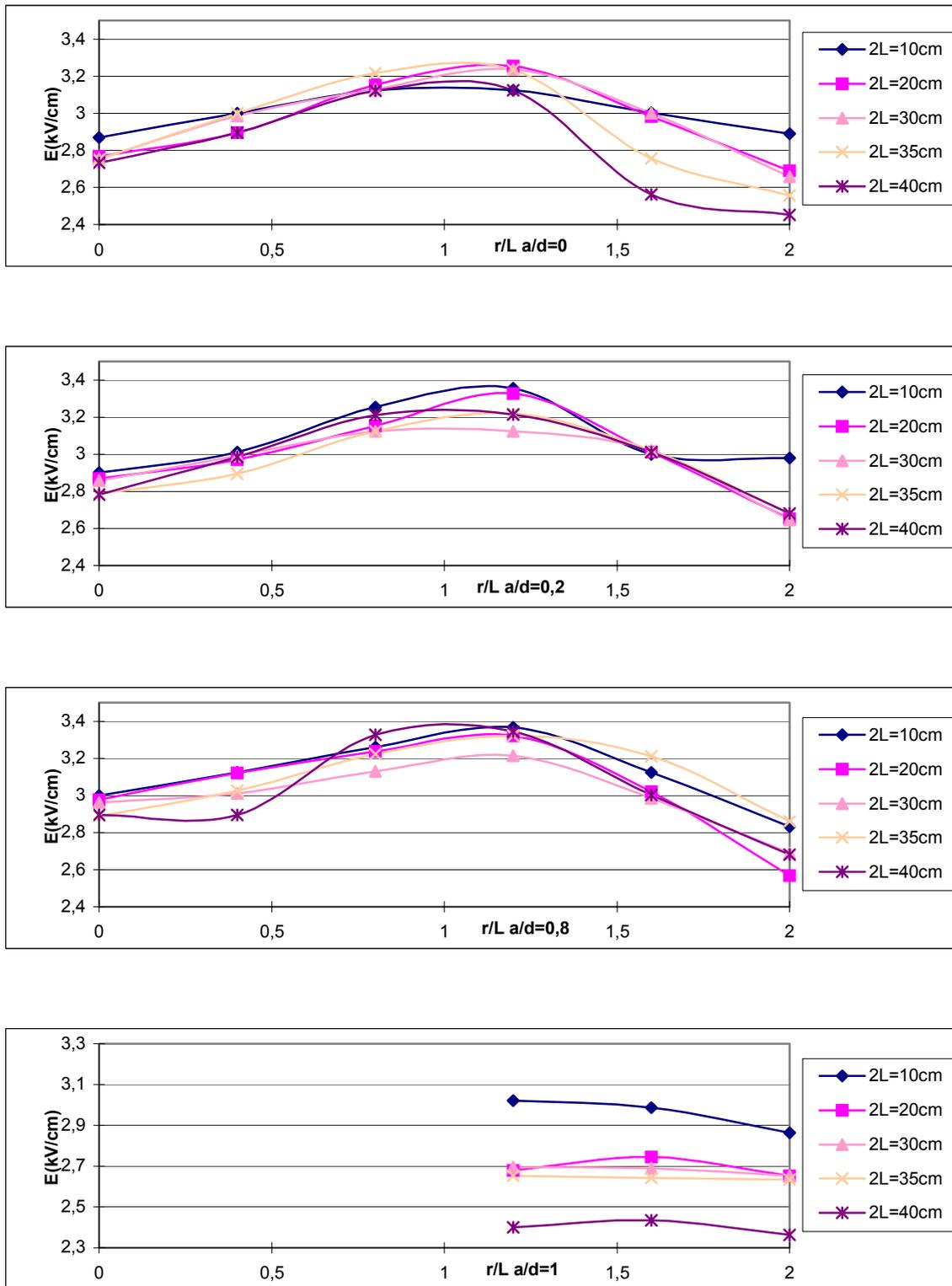


Figure III. 23-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=16\text{cm}$, $U=0,2U_{0\%}$)

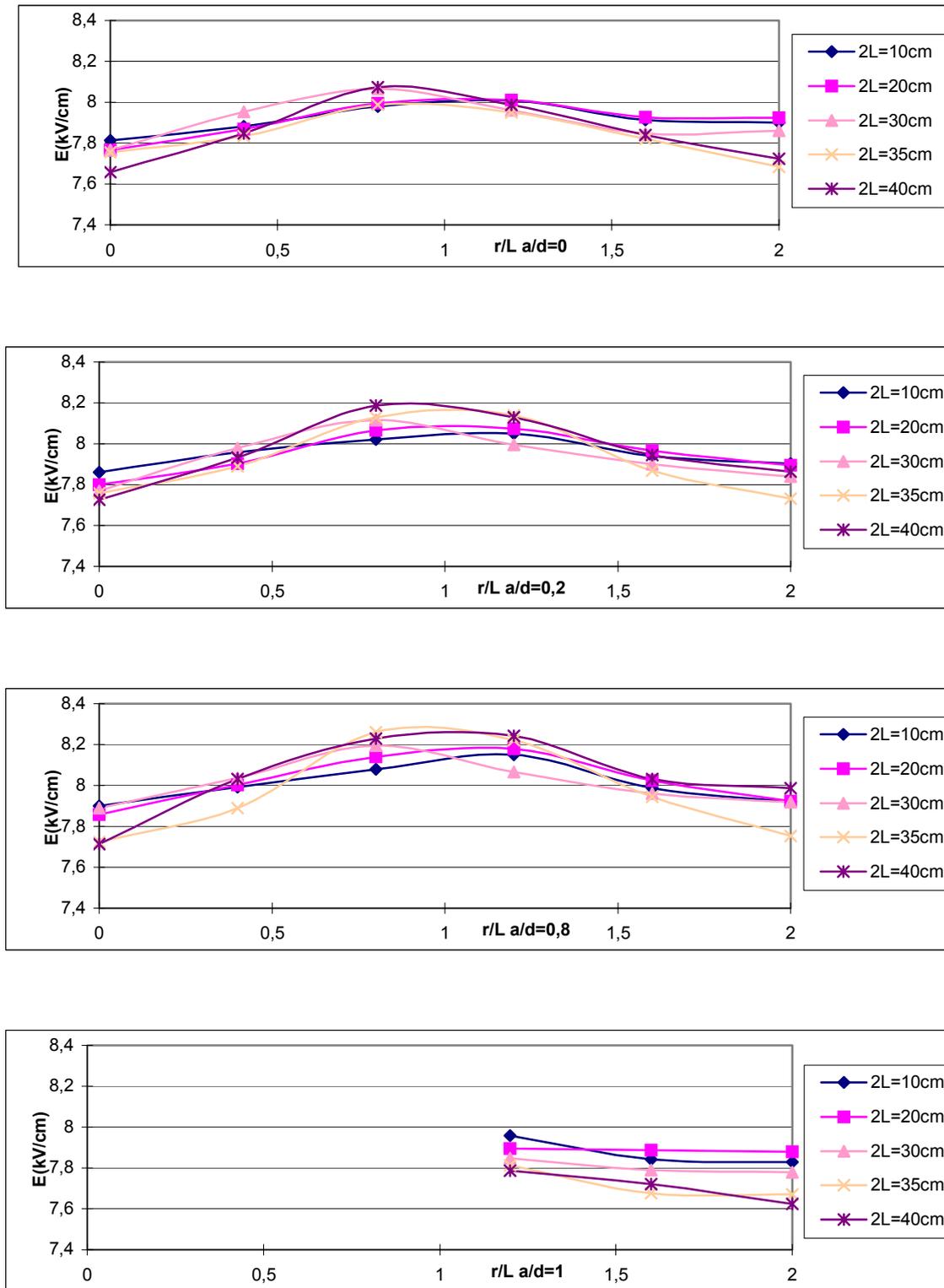
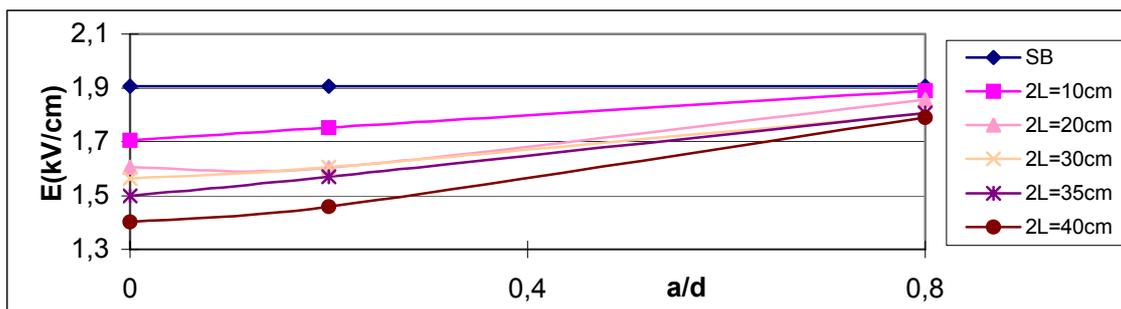
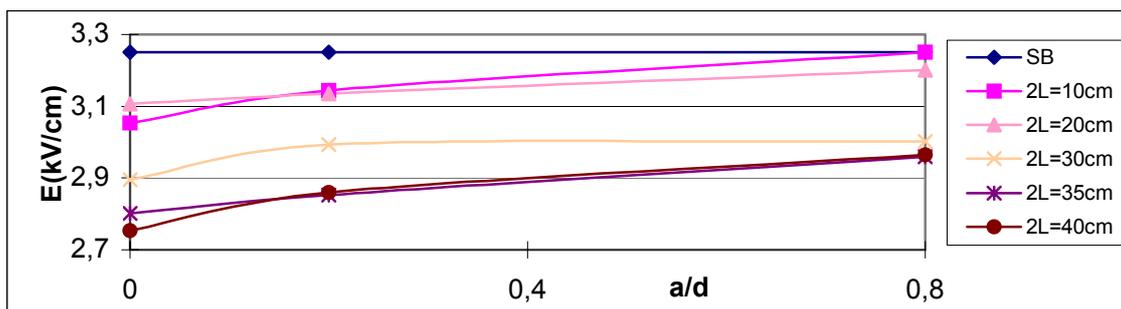


Figure III. 23-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=16\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$)

Au point O (r=0cm)



(a)

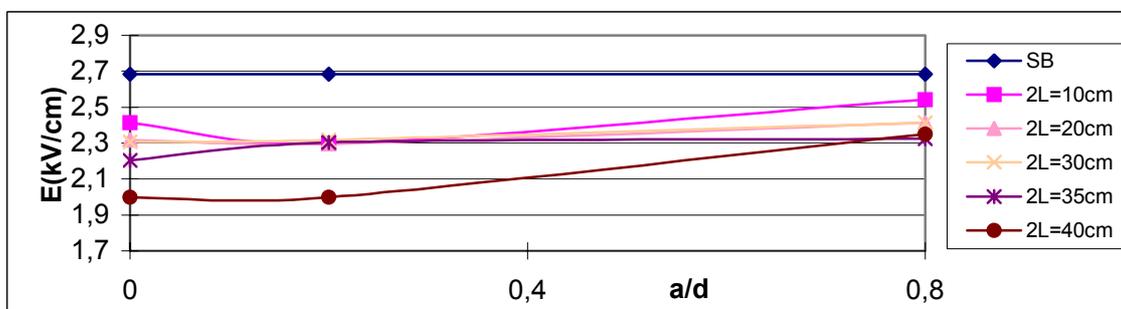


(b)

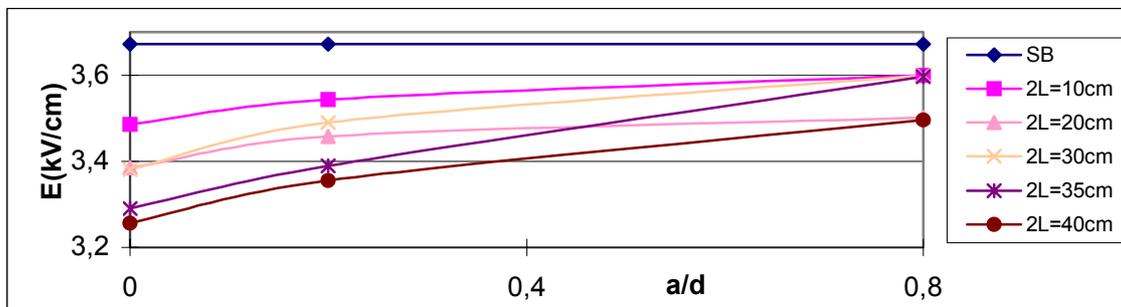
Figure III. 24 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, d=0.08cm

(a) - $U=0,5U_{0\%}$

(b) - $U=0,8U_{0\%}$



(a)

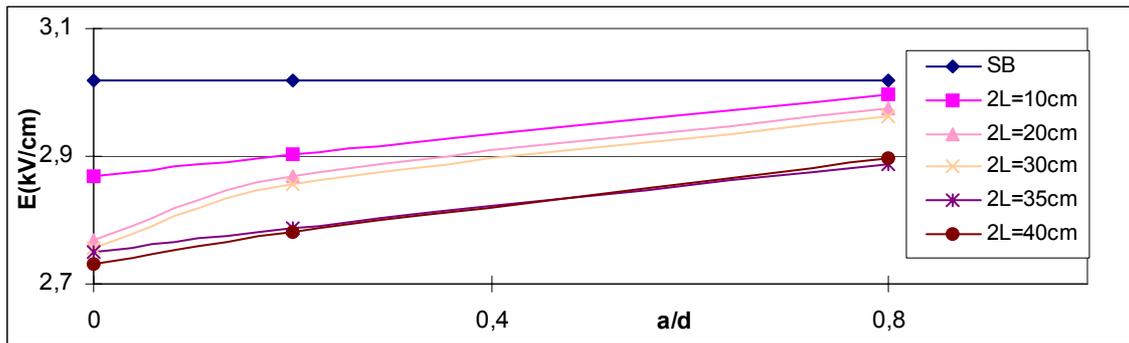


(b)

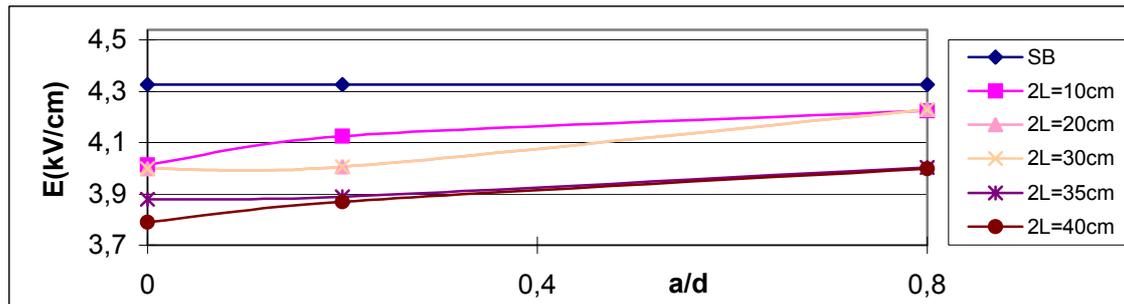
Figure III. 25 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, d=0.12cm

(a) - $U=0,5U_{0\%}$

(b) - $U=0,8U_{0\%}$



(a)

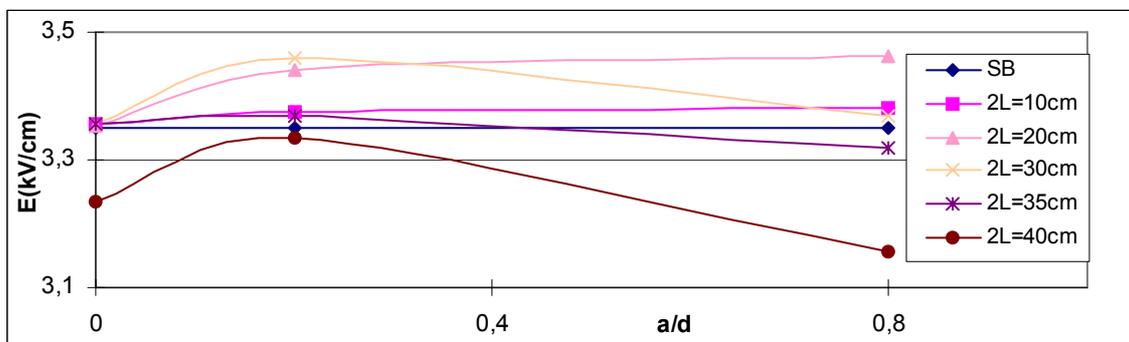


(b)

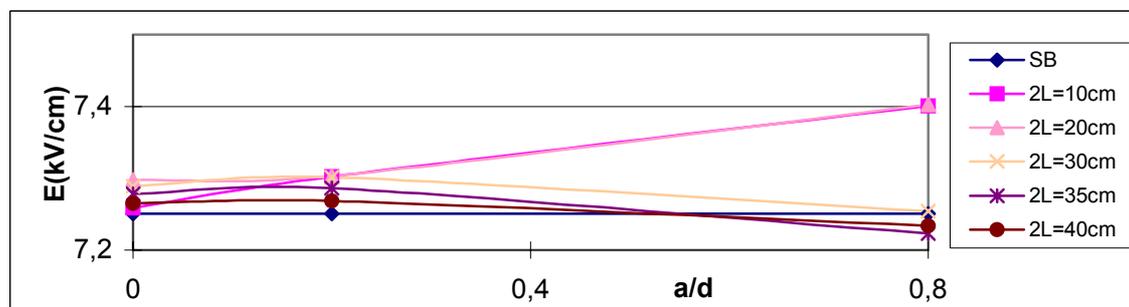
Figure III. 26 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, $d=16\text{cm}$

(a) - $U=0,5U_{0\%}$

(b) - $U=0,8U_{0\%}$



(a)

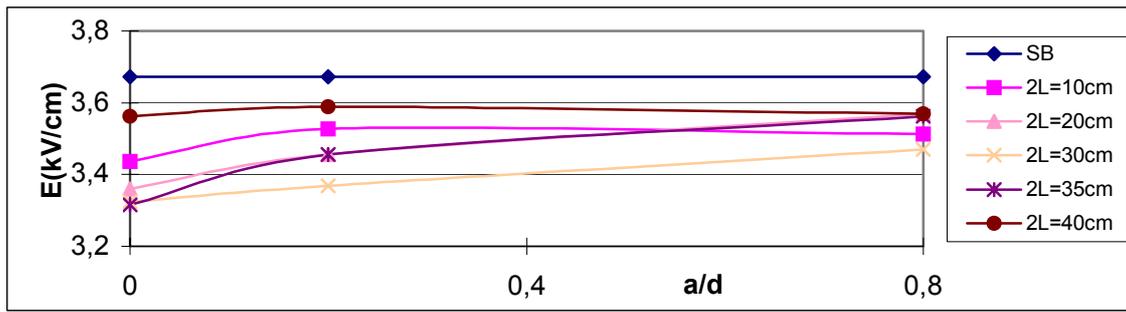


(b)

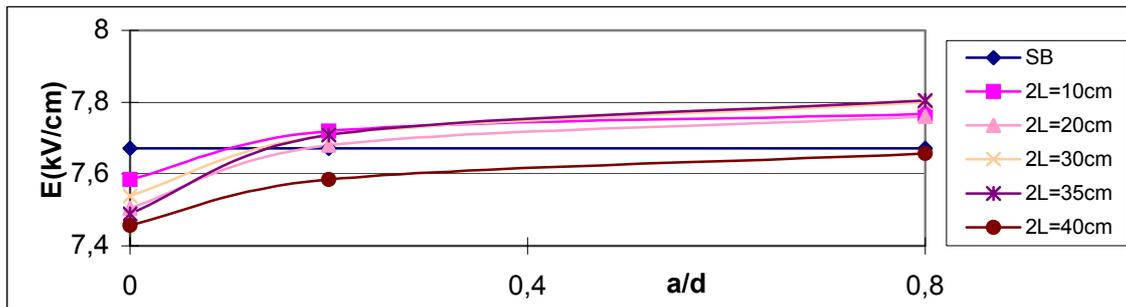
Figure III. 27 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=08\text{cm}$

(a) - $U=0,2U_{0\%}$

(b) - $U=0,5U_{0\%}$



(a)

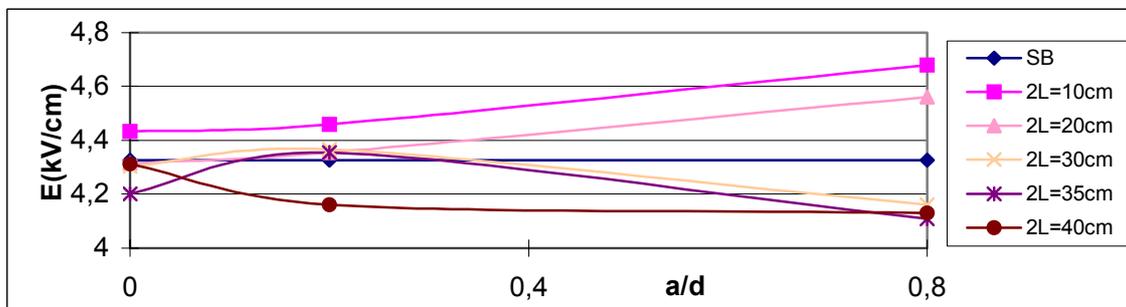


(b)

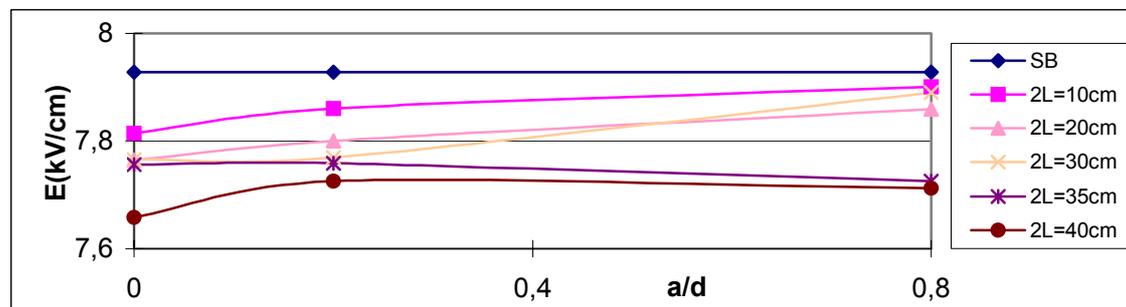
Figure III. 28 – Variation du champ électrique à l’axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=12\text{cm}$

(a) - $U=0,2U_{0\%}$

(b) - $U=0,5U_{0\%}$



(a)



(b)

Figure III. 29 – Variation du champ électrique à l’axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=16\text{cm}$

(a) - $U=0,2U_{0\%}$

(b) - $U=0,5U_{0\%}$

III.3.3 INFLUENCE DE LA L'ÉPAISSEUR DE LA BARRIÈRE

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la barrière isolante sur la distribution du champ électrique au plan, on prend quatre plaques de largeur identique $2L=40\text{cm}$ et d'épaisseurs différentes : $e = 2, 3, 4, 5 \text{ mm}$. Nous nous limitons à une seule distance inter électrode $d = 12 \text{ cm}$, pour les deux niveaux de tension des deux polarités positive et négative et pour les quatre positions de la barrière.

Aux figures III.30 et III.31 sont présentées les distributions du champ électrique au plan. Et aux figures III.32 à III.34 sont représentées les variations du champ électrique à l'axe de la pointe sur le plan.

Au point O, nous constatons que le champ électrique est presque constant pour les différentes épaisseurs des barrières utilisées, avec une légère diminution pour $e = 5\text{mm}$, épaisseur la plus importante utilisée.

Ce qui est remarquable aussi concernant la distribution du champ au plan, c'est que nous obtenons les mêmes allures et les valeurs sont presque les mêmes. Nous pouvons donc dire que l'influence de l'épaisseur de la barrière sur la distribution du champ électrique est très minime par rapport aux autres facteurs tels que la position et la largeur.

Ainsi l'insertion d'une barrière isolante dans un intervalle pointe-plan conduit à la réduction du champ électrique au plan quelle que soit son épaisseur.

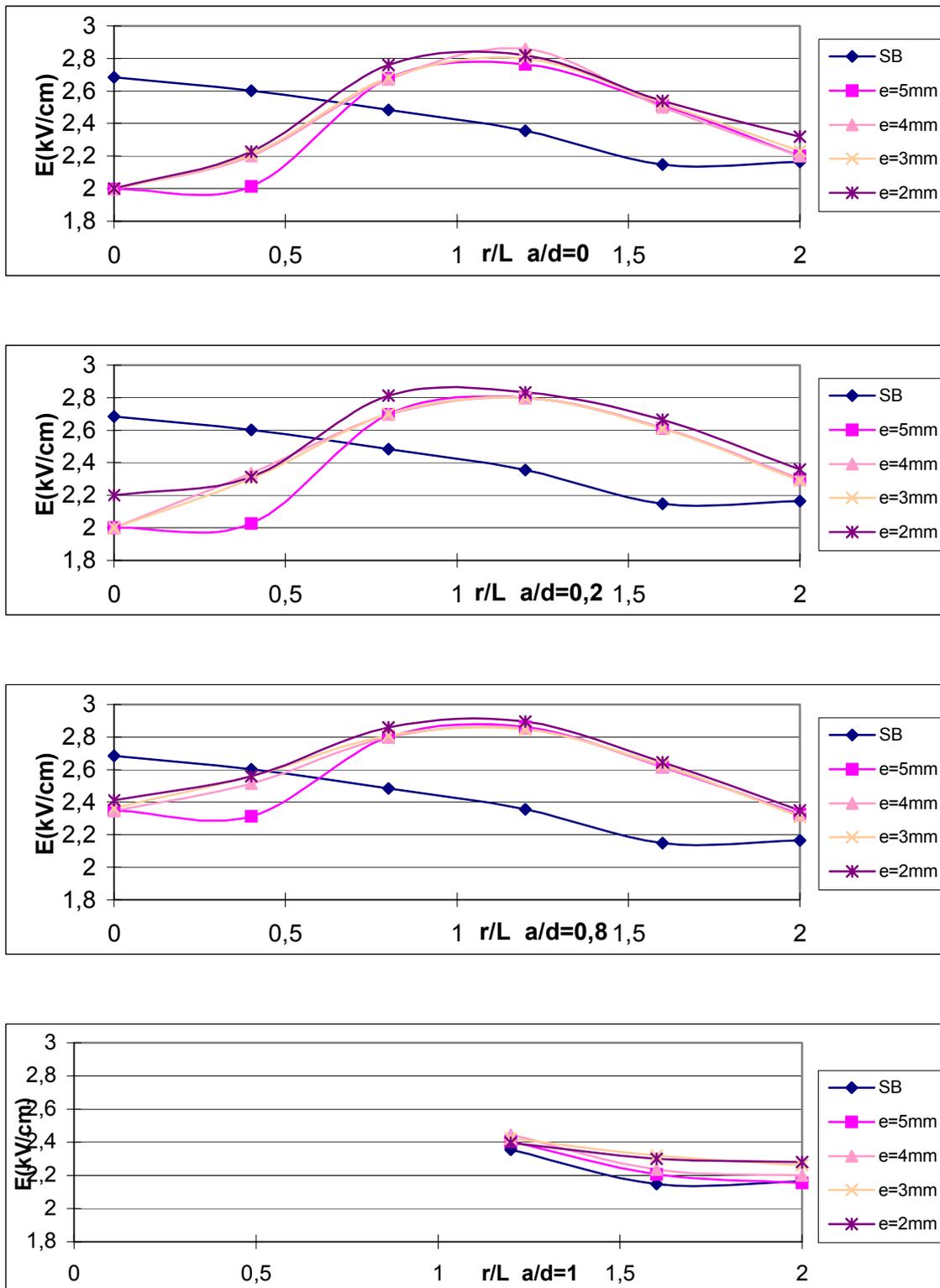


Figure III. 30-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

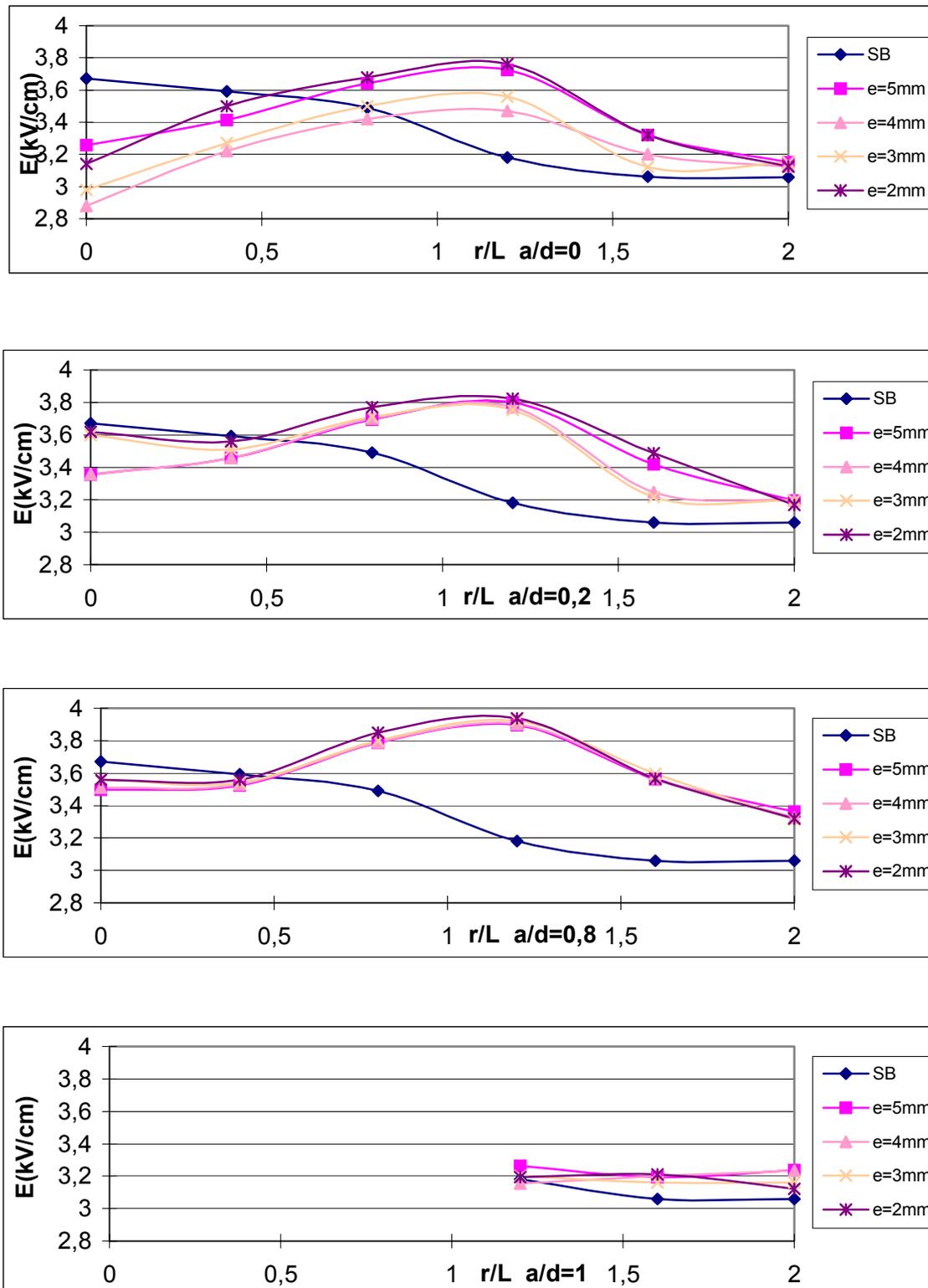


Figure III. 30-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12\text{cm}$, $U=0,8U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

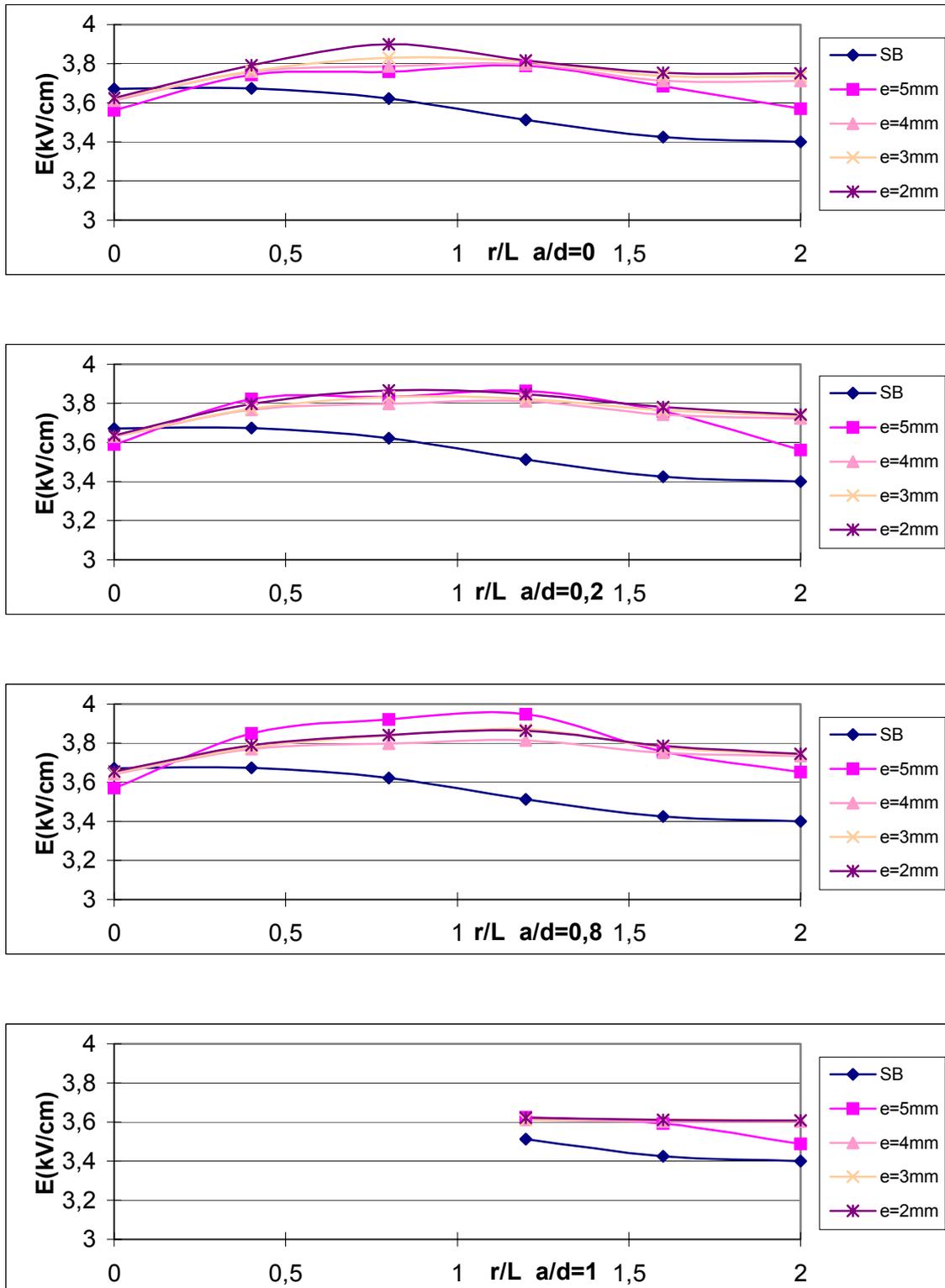


Figure III. 31-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12\text{cm}$, $U=0,2U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

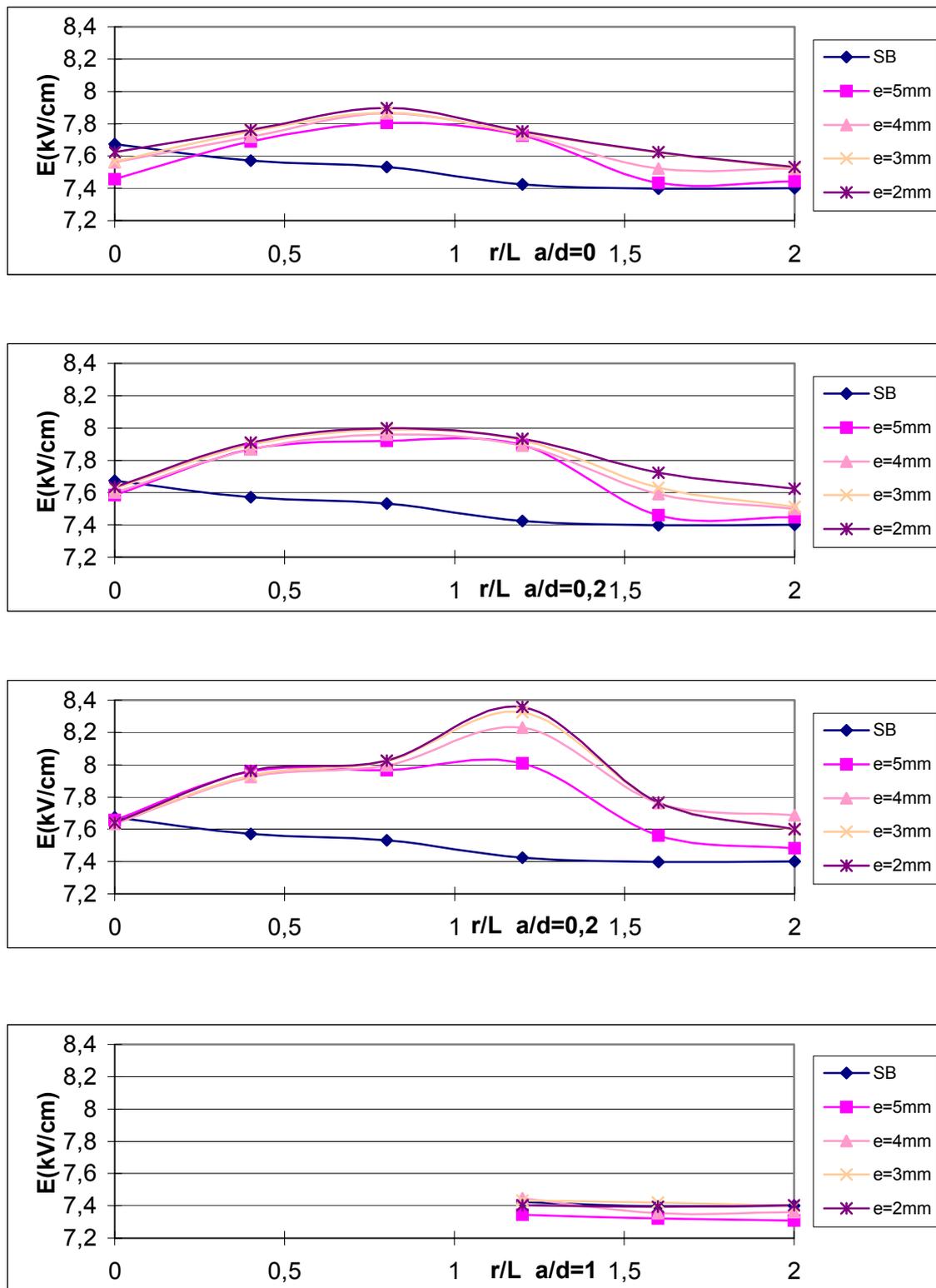
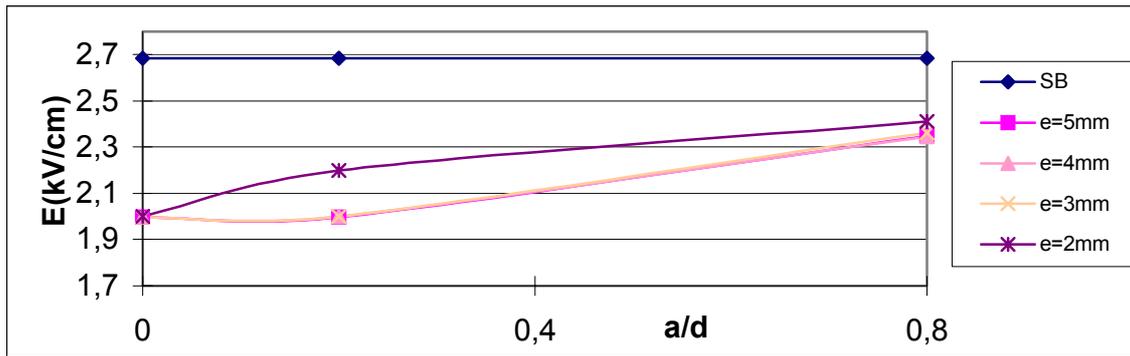
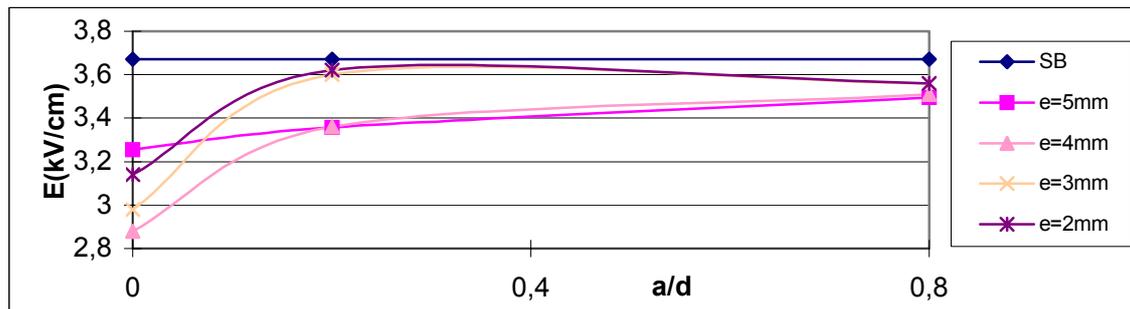


Figure III. 31-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

Au point O (r=0cm)



(a)

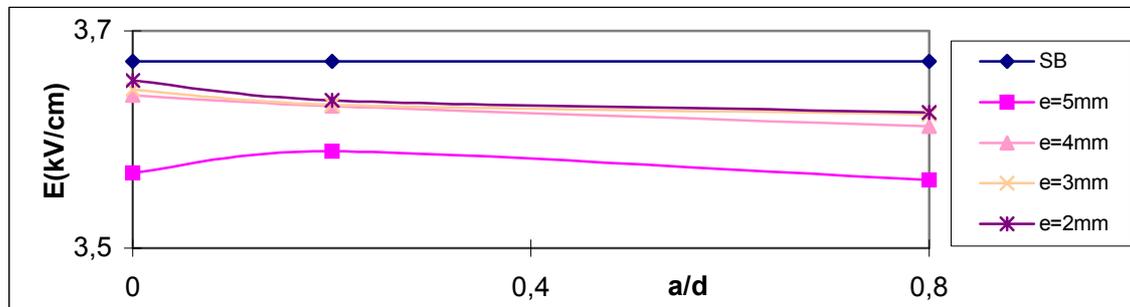


(b)

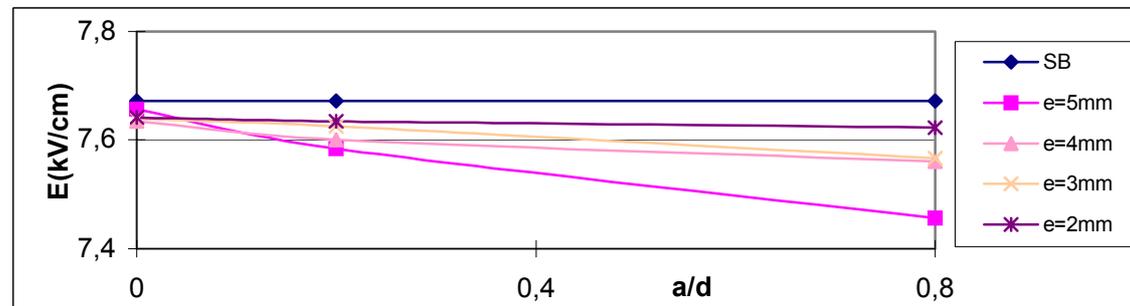
Figure III. 32 – Variation du champ électrique à l’axe du plan dans le cas de la polarité positive, d=12cm, 2L=40 cm

(a) - $U=0,5U_{0\%}$

(b) - $U=0,8U_{0\%}$



(a)



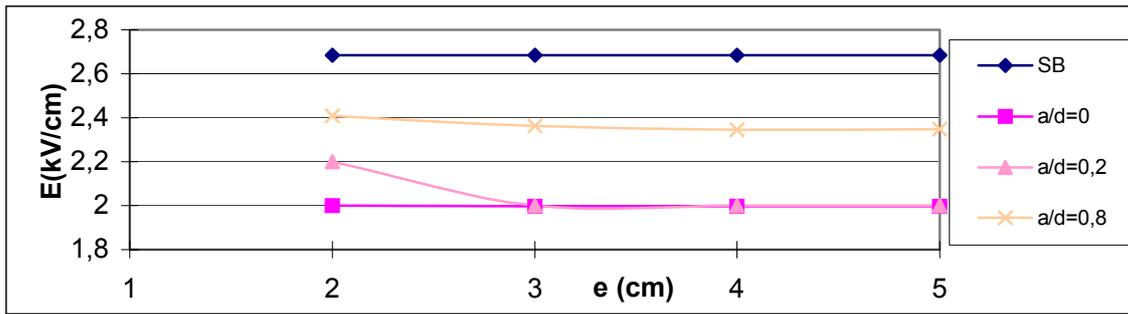
(b)

Figure III. 33–b – Variation du champ électrique à l’axe du plan dans le cas de la polarité négative, d=12cm, 2L=40 cm

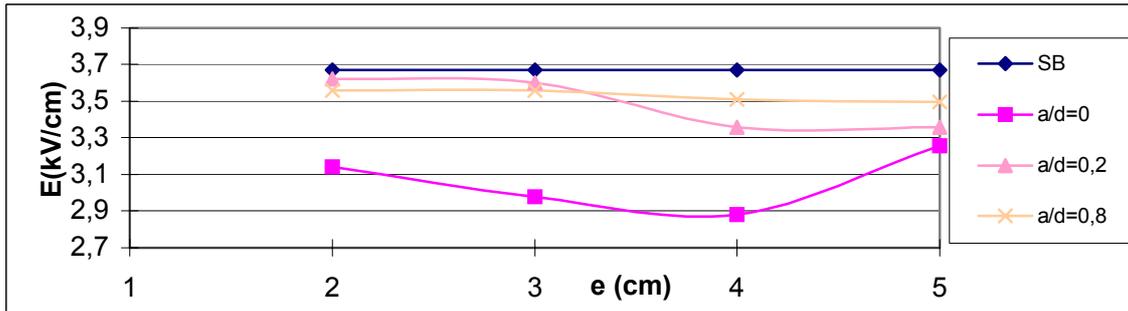
(a) - $U=0,2U_{0\%}$

(b) - $U=0,5U_{0\%}$

Influence de la position de la barrière



(a)

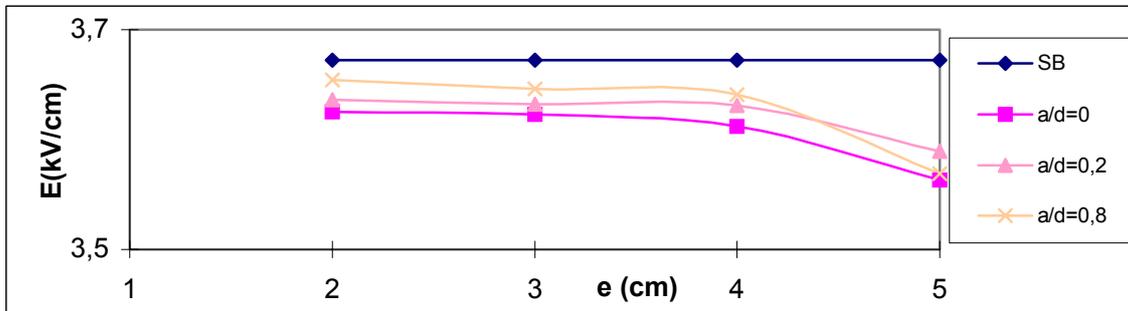


(b)

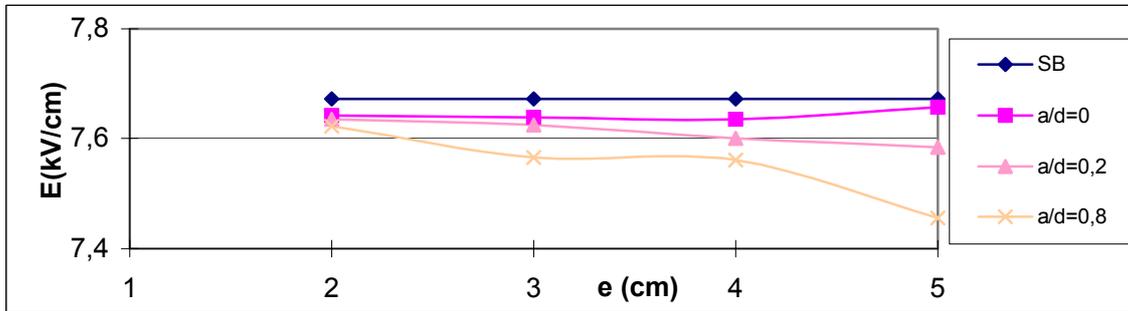
Figure III. 34 – Variation du champ électrique à l’axe du plan dans le cas de la polarité positive, d=12cm, 2L=40 cm

(a) - U=0,5U_{0%}

(b) - U=0,8U_{0%}



(a)



(b)

Figure III. 35 – Variation du champ électrique à l’axe du plan dans le cas de la polarité négative, d=12cm, 2L=40 cm

(a) - U=0,2U_{0%}

(b) - U=0,5U_{0%}

III.3.4 INFLUENCE DE LA BARRIÈRE TROUÉE

Pour étudier l'effet d'une barrière trouée sur la distribution du champ électrique au plan, nous prenons une plaque de largeur $2L=40\text{cm}$ d'épaisseur $e=5\text{ mm}$, en conservant la distance entre la pointe et le plan $d=12\text{ cm}$. Les diamètres de trou utilisés sont $\phi= 2, 4, 6, 8, 10, 11\text{ mm}$.

Aux figures III.36, III.37, nous présentons les distributions du champ électrique au plan. Aux figures III.38 à III.41, nous présentons les variations du champ électrique à l'axe O du plan. Ces courbes prennent une allure croissante pour les deux niveaux de tension dans le cas des deux polarités.

Aux figures III.42, III.43 nous présentons les distributions du champ électrique au plan pour chaque diamètre du trou.

Le champ prend une allure linéaire pour les petits diamètres de trou de 2, 4, et 6 mm presque identique avec l'allure de champ avec barrière non trouée. Ce résultat pourrait être interprété par le fait que la charge électrique qui traverse le trou est faible (et même nulle), les courbes dans ce cas sont pratiquement confondues.

Pour un diamètre du trou plus grand, une grande partie de la charge d'espace traverse le trou et ainsi le champ électrique dans l'intervalle barrière-plan devient assez élevé. Le trou de barrière de 08 mm de diamètre constitue la limite supérieure où la charge d'espace joue le rôle d'obstacle électrostatique. Ceci peut être interprété par le fait qu'en augmentant le diamètre du trou, nous permettons ainsi à la charge d'espace d'y passer à travers.

Pour les plus grands diamètres du trou ($\phi=11\text{ mm}$), nous pouvons dire que la barrière ne constitue plus un obstacle car la quasi totalité de la charge d'espace traverse le trou, quelle que soit la distance pointe-barrière. Dans ce cas, nous sommes pratiquement en présence d'un système pointe-plan.

Sur le plan, pour les grands diamètres du trou de la barrière, le champ électrique diminue au voisinage de $r/L=0.4$ et augmente en s'approchant du bord de la barrière (vu la présence d'une concentration de la charge d'espace à ce niveau), puis il diminue de nouveau au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ce dernier.

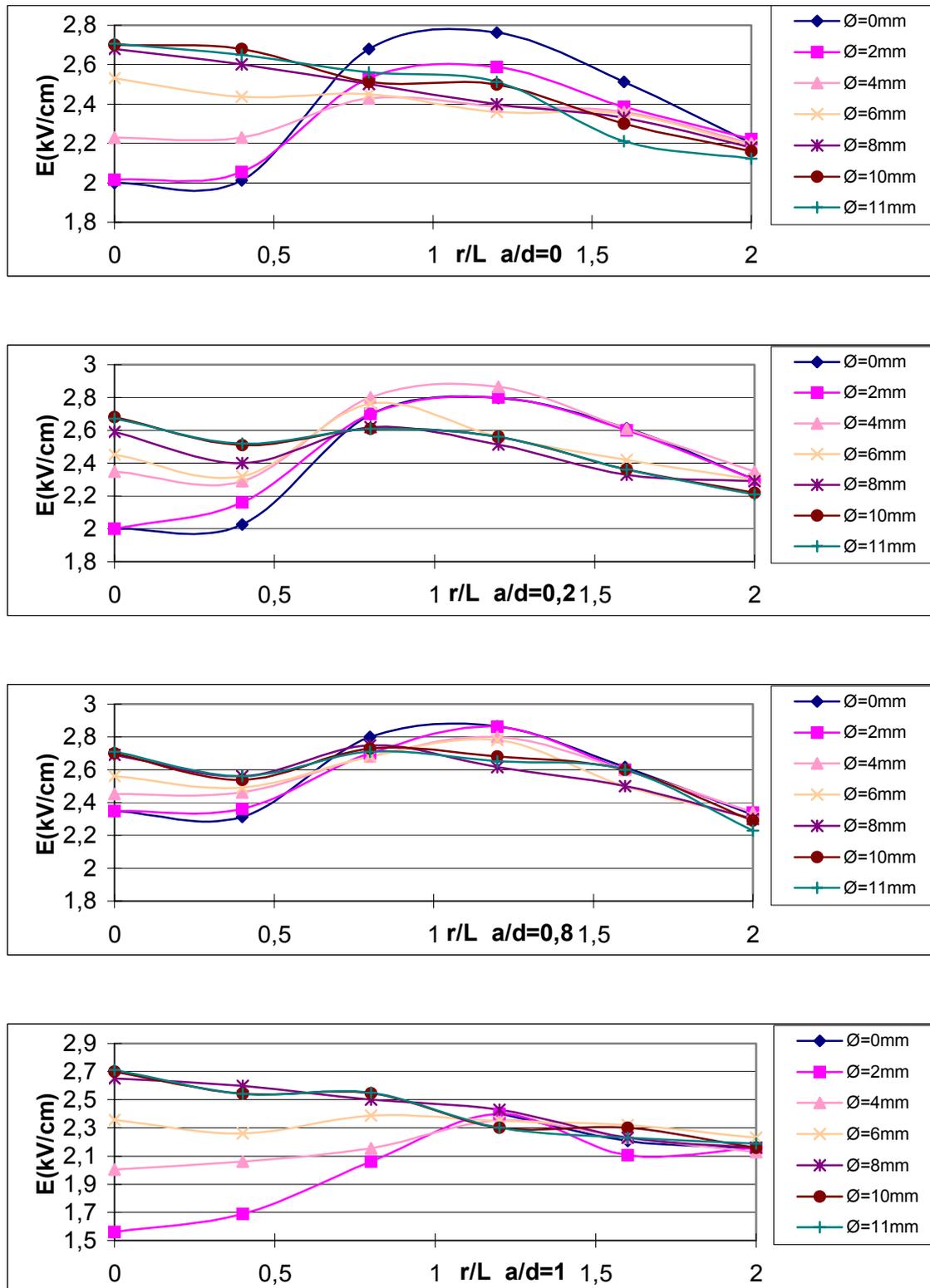


Figure III. 36-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

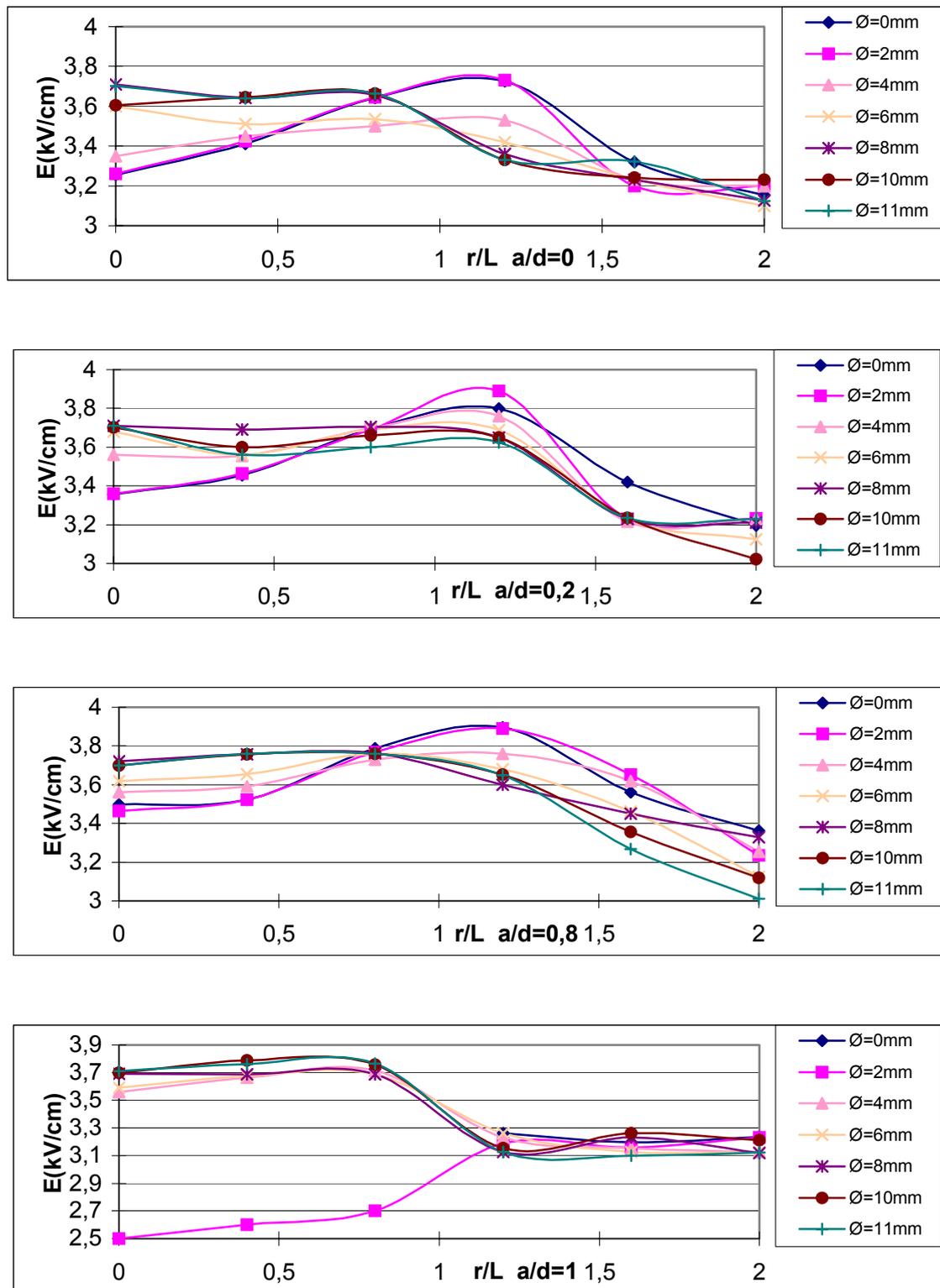


Figure III. 36-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12\text{cm}$, $U=0,8U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

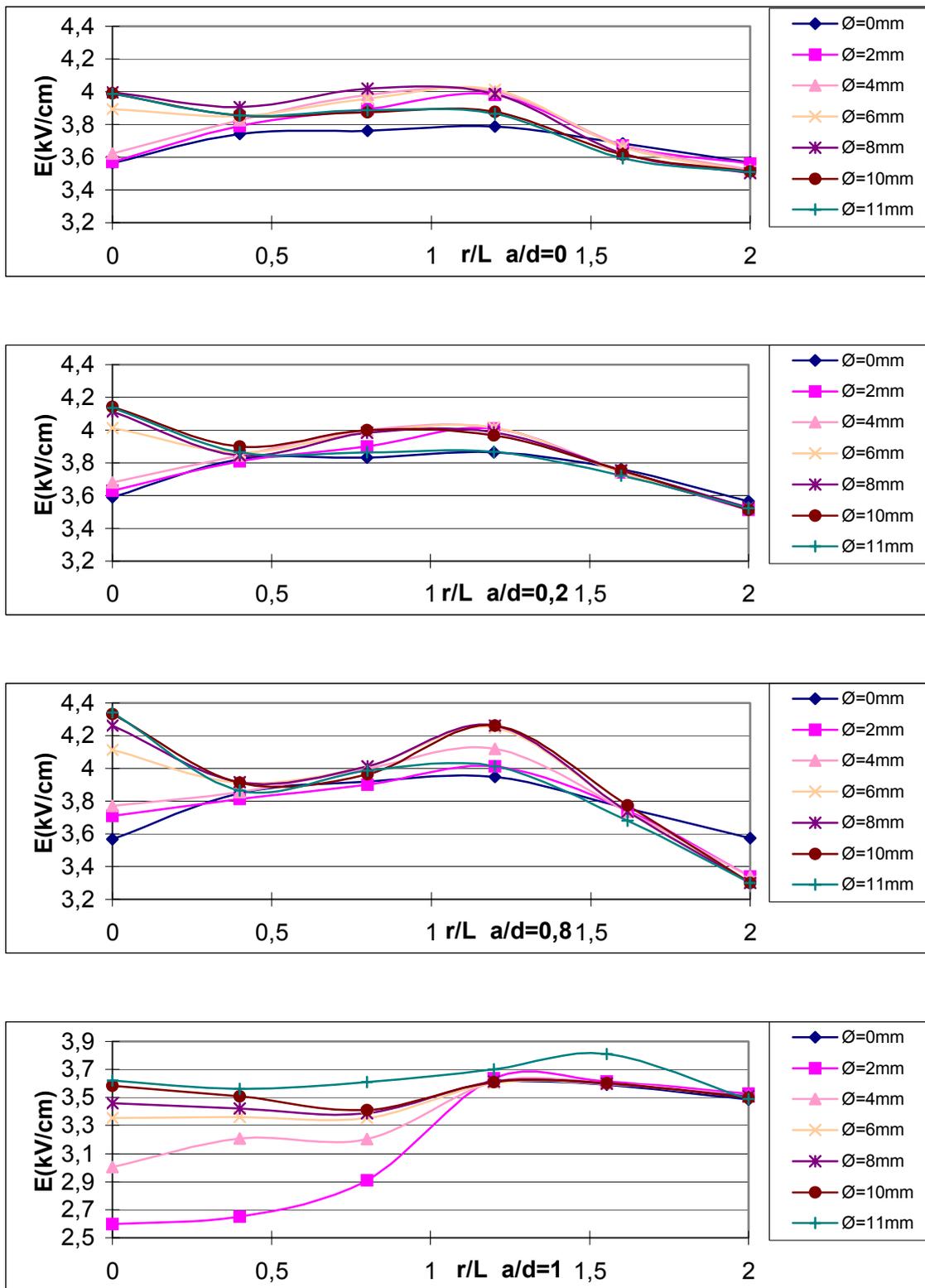


Figure III. 37-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12\text{cm}$, $U=0,2U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

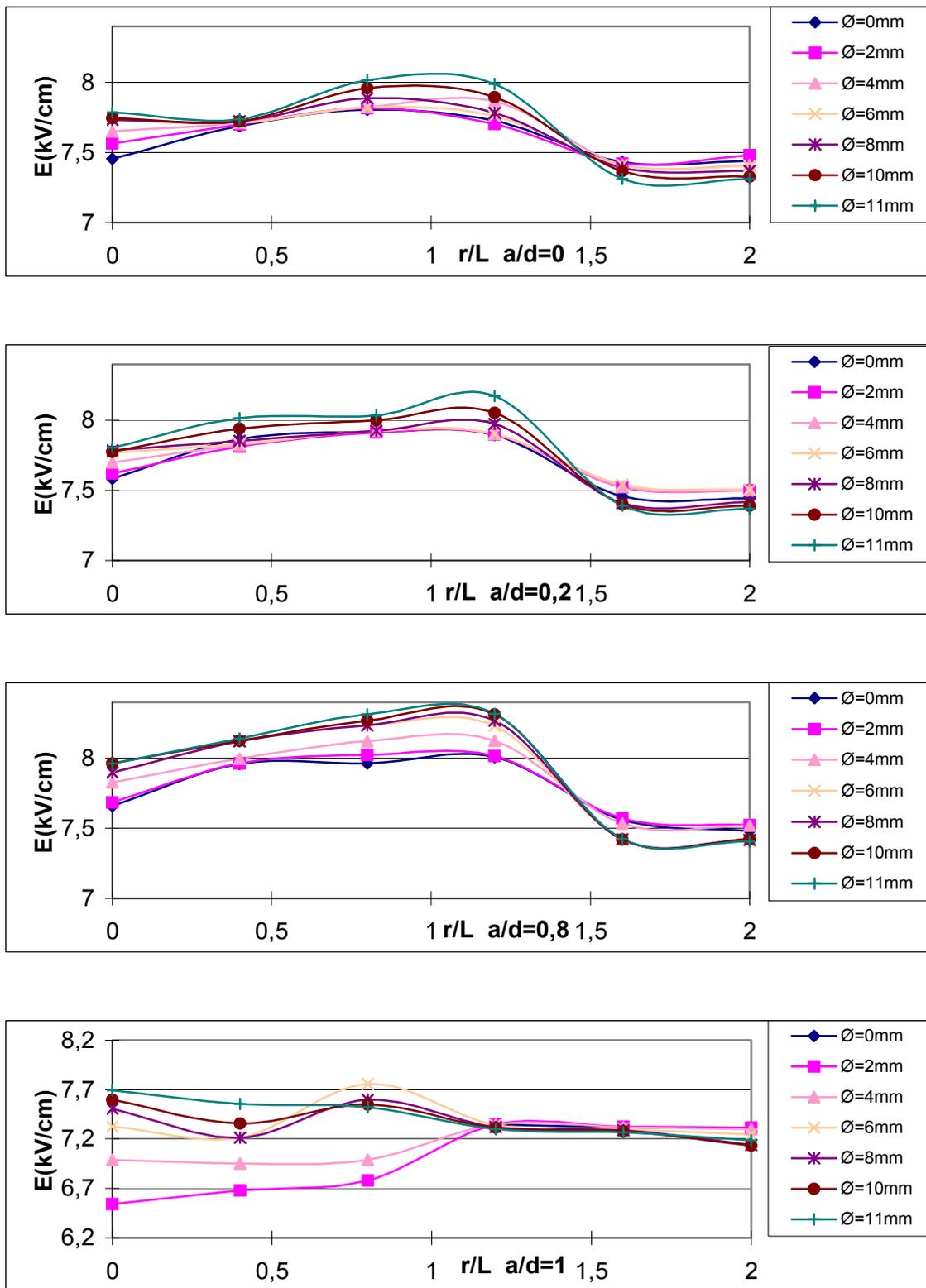


Figure III. 37-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité négative ($d=12\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)

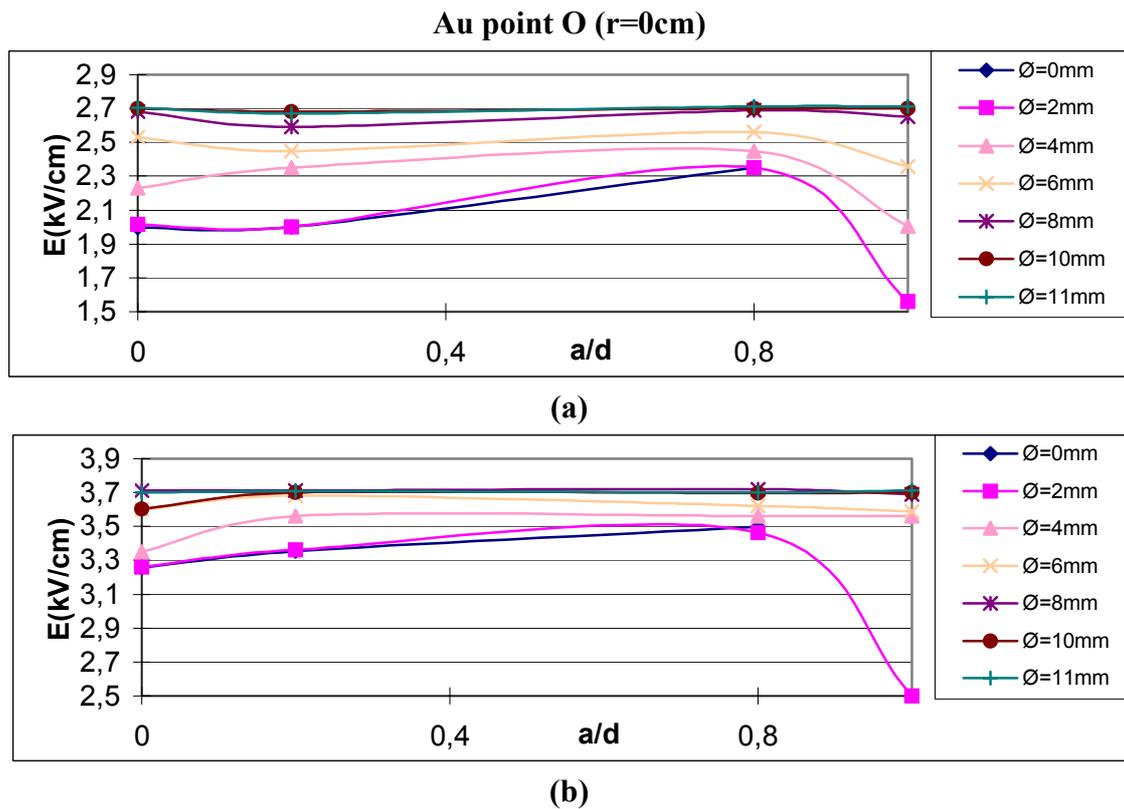


Figure III. 38 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, $d=12\text{cm}$, $2L=40\text{ cm}$

(a) - $U=0,5U_{0\%}$

(b) - $U=0,8U_{0\%}$

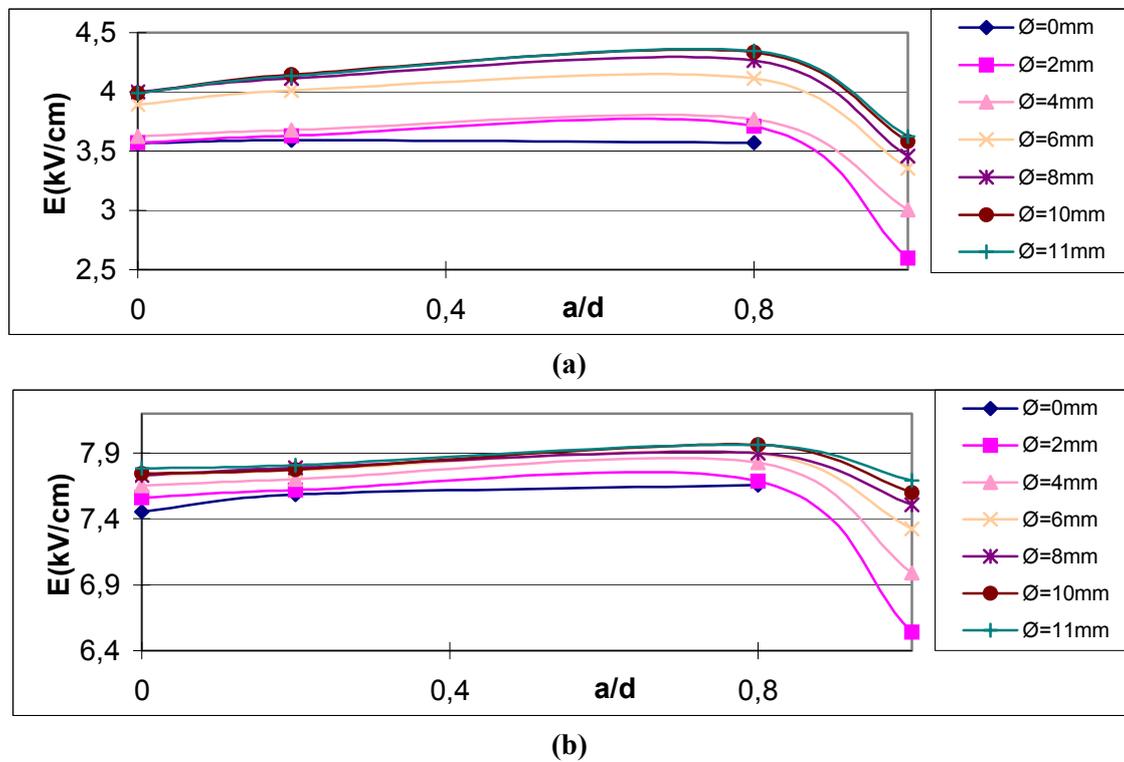
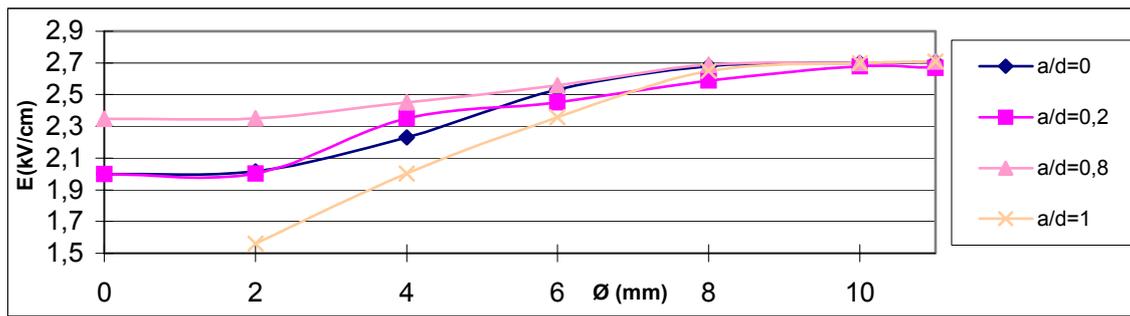


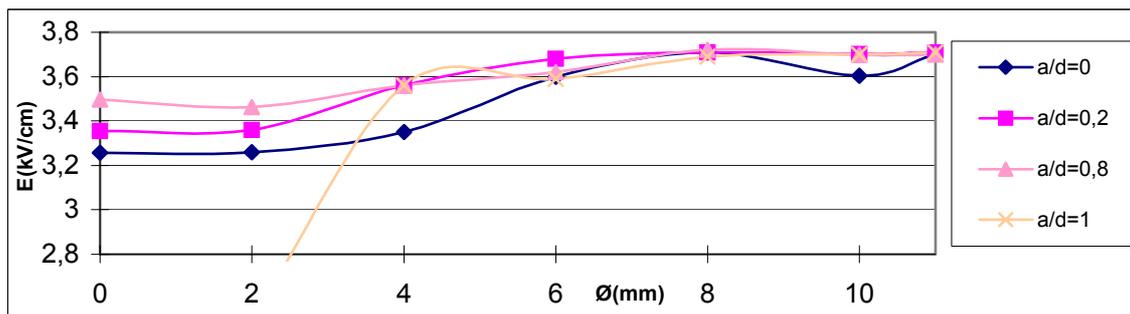
Figure III. 39 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=12\text{cm}$, $2L=40\text{ cm}$

(a) - $U=0,2U_{0\%}$

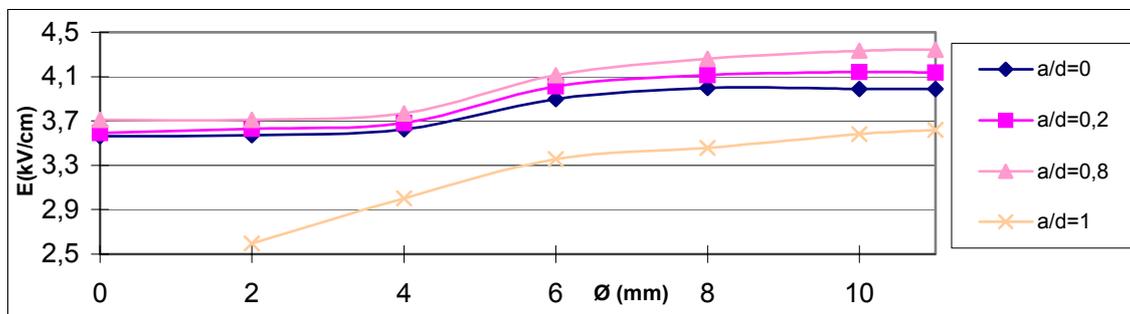
(b) - $U=0,5U_{0\%}$

Influence du diamètre du trou au point O ($r=0\text{cm}$)

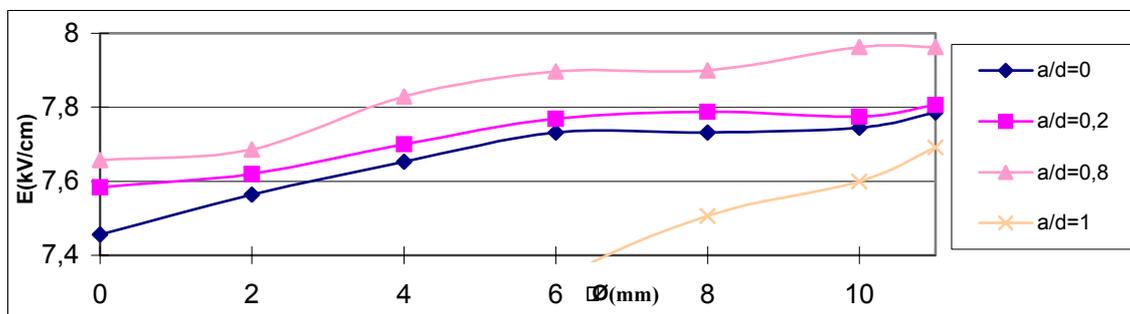
(a)



(b)

Figure III. 40 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité positive, $d=12\text{cm}$, $2L=40\text{ cm}$ (a) - $U=0,5U_{0\%}$ (b) - $U=0,8U_{0\%}$ 

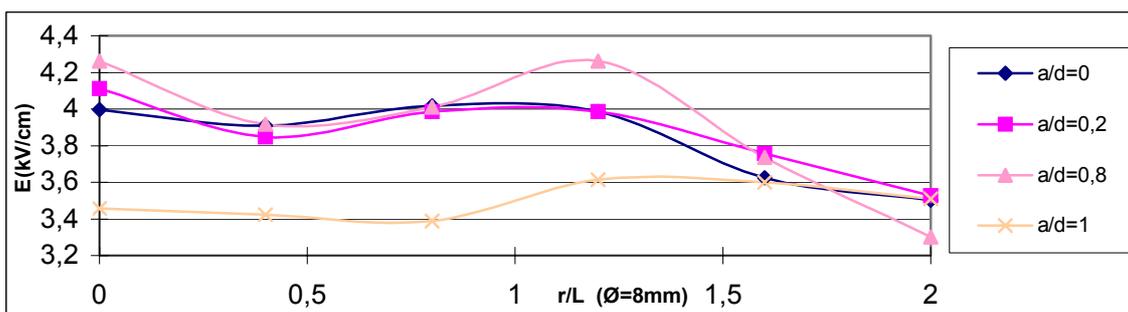
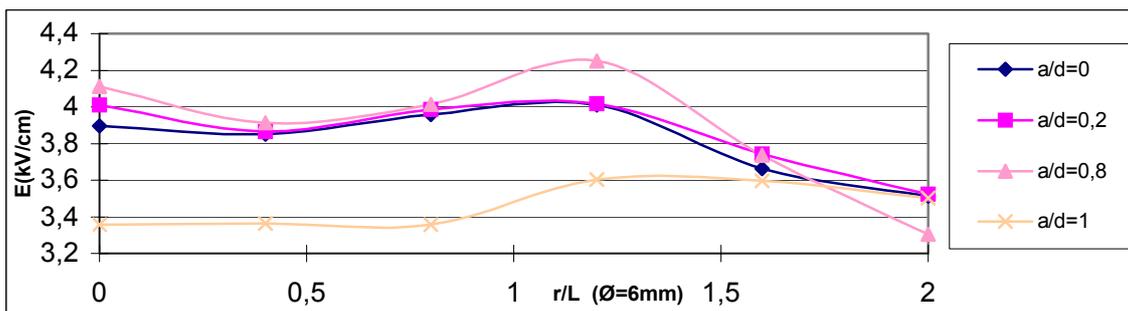
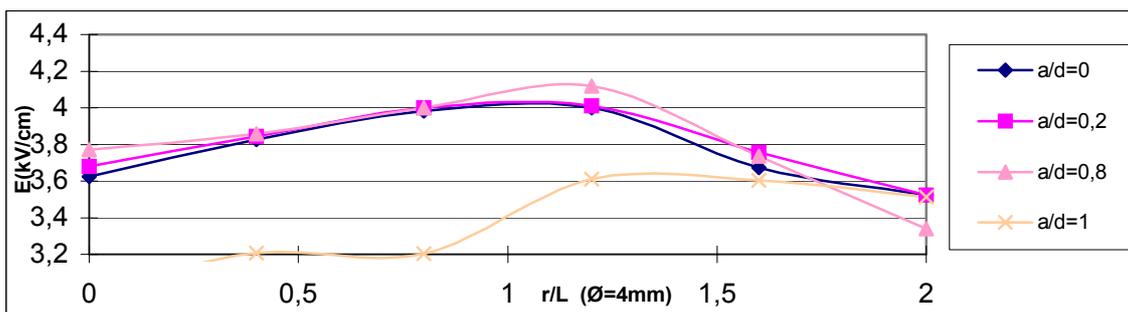
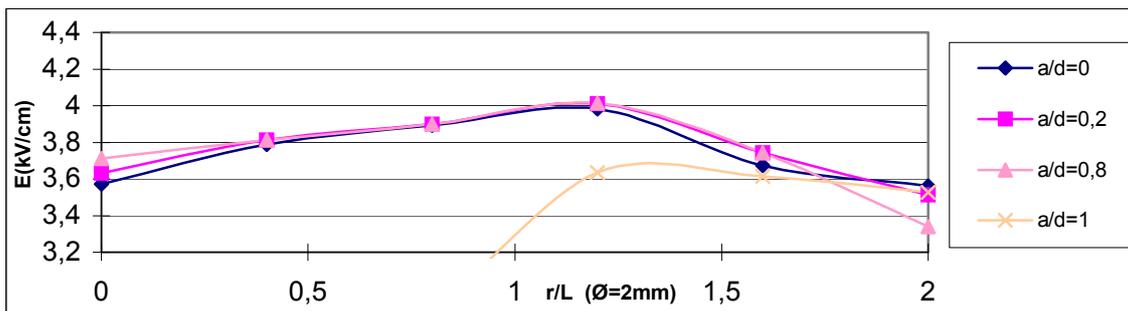
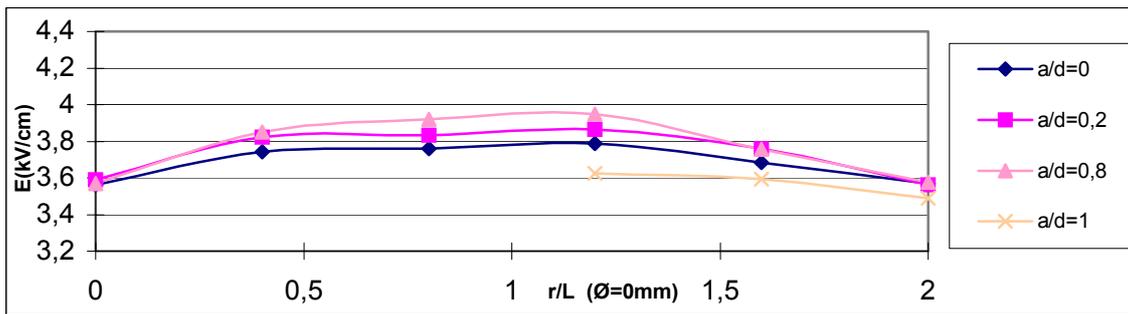
(a)



(b)

Figure III. 41 – Variation du champ électrique à l'axe du plan dans le cas de la polarité négative, $d=12\text{cm}$, $2L=40\text{ cm}$ (a) - $U=0,2U_{0\%}$ (b) - $U=0,5U_{0\%}$

Influence du diamètre du trou



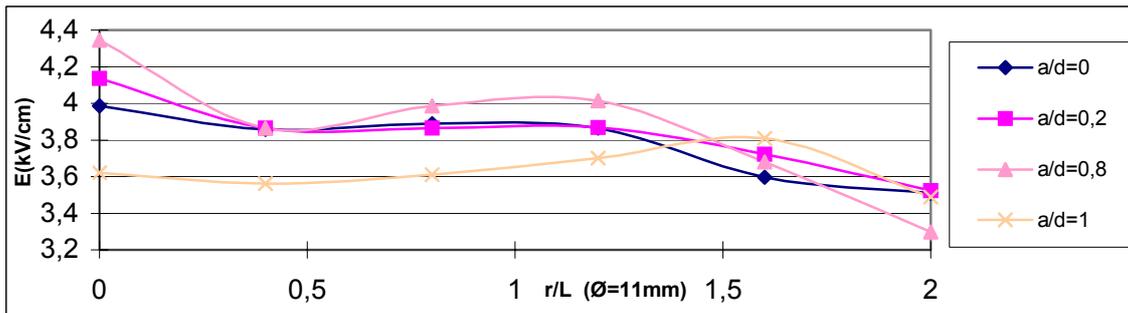
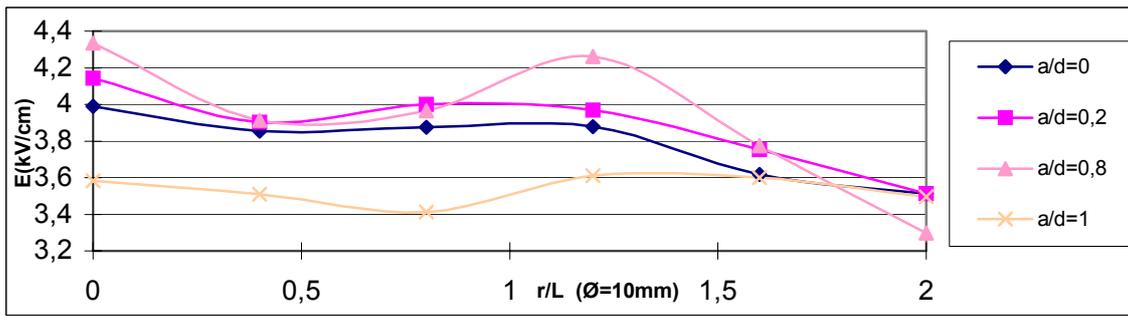
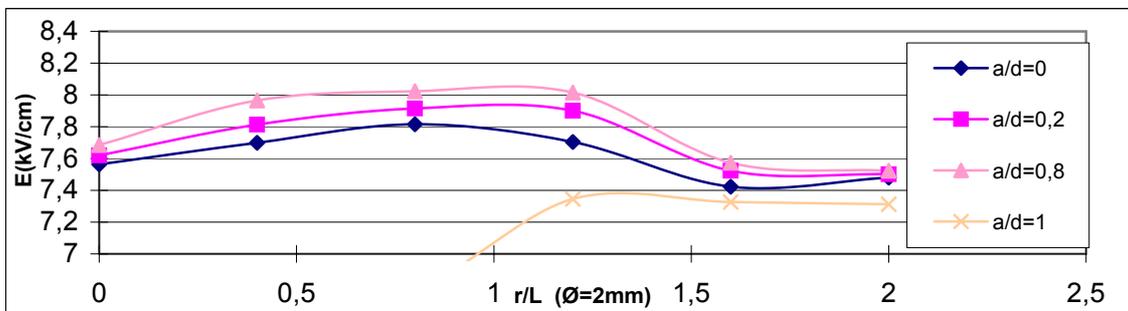
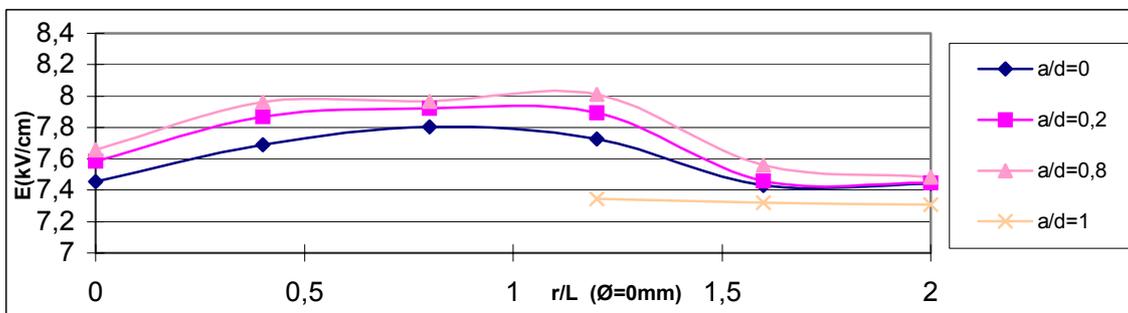


Figure III. 42-a – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12\text{cm}$, $U=0,5U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$)



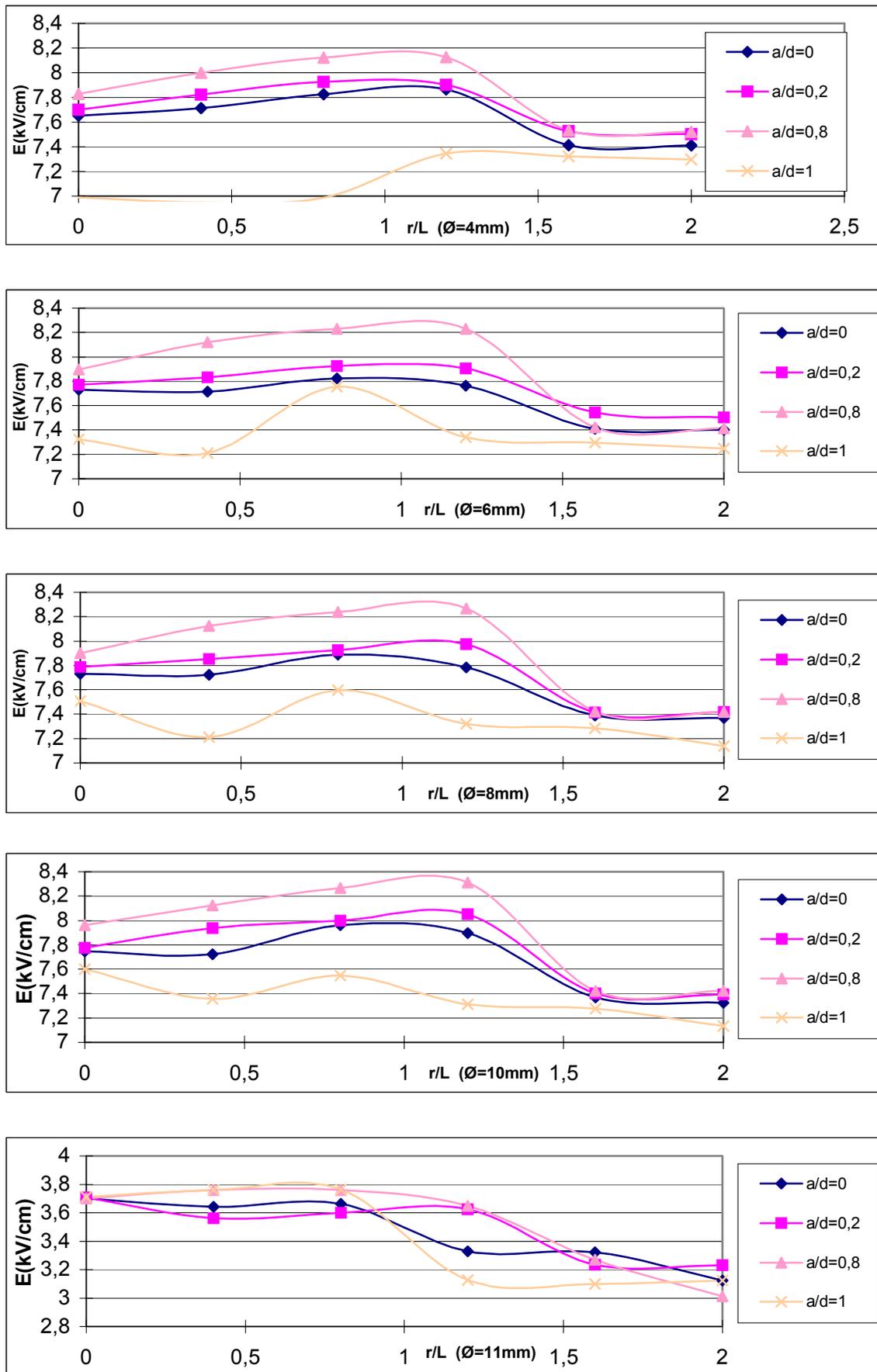


Figure III. 42-b – Distribution du champ électrique sur le plan dans le cas de la polarité positive ($d=12\text{cm}$, $U=0,8U_{0\%}$, $2L=40\text{ cm}$, $P+$)

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous avons réalisé a porté sur la distribution du champ électrique sur le plan dans un système pointe-plan avec et sans barrière sous tension de choc de foudre. Les principales conclusions auxquelles nous sommes arrivés sont les suivantes:

➤ Dans un système pointe – plan sans barrière, l'intensité du champ électrique prend une valeur maximale au dessous de la pointe et diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe de la pointe.

➤ En présence d'une barrière isolante, la distribution du champ électrique en polarité positive est presque uniforme aux petites valeurs de r (quand la sonde est proche de l'axe de la pointe au dessous de la barrière), elle est inférieure au champ électrique sans barrière. Cela peut être interprété par le fait que la barrière joue un rôle d'obstacle électrostatique pour la distribution du champ électrique. Ce qui n'est pas le cas en polarité négative, car le champ électrique atteint pour quelques configurations des valeurs supérieures à la valeur du champ électrique sans barrière. Ceci confirme la diminution observée par d'autres auteurs de la tension de claquage des intervalles d'air pointe négative – plan en présence d'une barrière.

➤ Le champ augmente au fur et à mesure qu'on s'approche du bord de la barrière ($0.6 < r/l < 1.4$) et l'augmentation maximale est obtenue quand la sonde est au dessous du bord de la barrière. Ceci peut être expliqué par la présence d'une forte concentration de charges d'espace à ce niveau. Puis il diminue et tend vers une valeur constante presque égale à la valeur du champ électrique sans barrière quand r est très loin du bord de la barrière ($r/l=2$).

➤ La position de la barrière ne manque pas d'influer sur le champ électrique au plan. En effet le déplacement de la barrière de la pointe vers le plan influe sur le champ électrique selon que la barrière se situe dans une zone à fort champ (prés de la pointe) ou dans une zone à champ électrique relativement faible.

➤ Le champ électrique est très faible pour les grandes largeurs de la barrière ($2L=30, 35, 40\text{cm}$). Il augmente avec la diminution de la largeur de la barrière (petites largeurs $2L=10, 20\text{cm}$). Ceci peut être expliqué par le fait que l'écran joue le rôle d'un obstacle géométrique empêchant les ions positifs de gagner la cathode. Quand la largeur de la barrière augmente, le champ diminue. Cette diminution est due à l'uniformisation du champ électrique.

➤ Ainsi, Le champ est pratiquement uniforme dans l'intervalle barrière-plan pour les grandes largeurs.

➤ Concernant l'épaisseur de la barrière, l'influence du champ électrique est très minime et semble être secondaire par rapport aux autres facteurs telles que la position et la largeur.

➤ Pour les barrières trouées en leur milieu, le champ prend une allure linéaire pour les diamètres de trou de 2, 4, et 6 mm (petits diamètres) presque identique à l'allure du champ avec barrière non trouée, vu que la charge électrique qui traverse le trou est faible. Au fur et à mesure que le diamètre du trou augmente, une grande partie de la charge d'espace traverse le trou et ainsi le champ électrique dans l'intervalle barrière-plan devient assez élevé. Le trou de la barrière de 08 mm de diamètre constitue la limite supérieure où la charge d'espace joue le rôle d'obstacle électrostatique. Car en augmentant le diamètre du trou, nous permettons à la charge d'y passer à travers.

❖ Pour les travaux de recherche futurs et en perspective à notre travail, nous suggérons de prendre en considération la pollution de la barrière (d'un seul et des deux côtés), de sa forme (circulaires pour étudier l'effet des bords), sa nature (conductrice ou semi conductrice) et en utilisant plusieurs barrières isolantes. Aussi le calcul du champ électrique avec des méthodes numériques serait de première importance pour permettre de comparer les résultats théoriques avec les résultats pratiques.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [1] **A. ROTH**, «Hochspannungstechnik». Berlin, 1927, p118.
- [2] **E. MARX**, «Der elektrisch Durchschlag von Luft im unhomogenen Felde». Arch. Elek. Bd 24. 1930. p61.
- [3] **H. ROSER**, «Schirme zur Erhöhung der Durchschlagspannung in Luft». E. T. Z. H17, Bd53, 1932, p411.
- [4] **N. F. WOLOCHTENKO**, «Influence des écrans sur la rigidité électrique des différents intervalles d'amorçage d'air » (en russe). Elecktritchestvo, nr3, 1946, p21.
- [5] **M. P. VERMA**, «Durchschlagspannung und Durchschlagvorgang für die anordnungs-pitze-plate mit schirm». Dissertation, T. U. Dresden, 1961.
- [6] **J. M. MEEK et M. M. C. COLLINS**, «Measurement of field changes preceding impulse breakdown of rod-plane gaps». Procedures Of the 7th.conference On phenomena in Ionized Gases, Vol1, Beograd 1966, p581.
- [7] **N. N. TEEKHODEEV**, «on the theory of barrier effect in the electrode system with an incomplet barrier». Journal of technology and physics. Vol 28, 1958, p412.
- [8] **M. ABOU ALIA**, «Ein Beitrag zum Stossdurchschlag einer Spitze-Platte-Funkenstrecke mit Isolierschirm». Dissertation, TH Stuttgart. 1966.
- [9] **H. REMDE et H. BOOCKER**, «Voltage-current characteristics during propagation of a surge breakdown of a point-toplate gap with insulating barrier». IEEE trans. Vol. PAS 91. 1992, p271.
- [10] **J. PILLING**, «Luftisolierrung mit Isolierstoffbarrieren und Verkleidungen bei Wechselspannung». Dissertation, TU Dresden, 1968.
- [11] **A. BOUBAKEUR**, «Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe –plan». Thèse de doctorat, EP Varsovie, Pologne, 1979.
- [12] **M. AWAD**, «Durchschlag von Luftfunkenstrecken mit Verschmutzten Isolierstoff Barrieren». Elektrie 29, H10, 1975, p559.
- [13] **K. NOWACKI**, «Isolierstoffschirme Parallel zur Elektrodenachse in Inhomogenen Funkenstrecken». Dissertation, TH Aachen, 1975.
- [14] **S. MOUHOUBI et Y. ZEBBOUDJ**, «Mesure du champ électrique par la sonde polarisée lors de la décharge couronne en géométrie fil-plan». 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension Tizi – Ouzou, 1997, pp180-184, Algérie.
- [15] **A. BOUBAKEUR, S. MOUHOUBI**, «Measurement of electric field strength in pointe- barrier with a hole plane arrangement ». 4th conference on electric charges in non conduction materials, Vide Tours 1-6 July 2001, France. pp 318-321.

-
-
- [16] **Li. MING, Mats LEIJON and TORD BENGTSSON**, «factors influencing barrier effects in air gaps». Ninth international symposium on high voltage engineering. 9th ISH 1995 Graz Convention Center, Austria, 1995, paper 2168.
- [17] **Y. ZEBBOUDJ. R. IKEN**, «Sonde linéaire de mesure de champ électrique et application à la distribution du champ lors de décharge couronne positive en géométrie fil-plan». 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension Tizi-Ouzou, Algérie, 1997, pp 125-131.
- [18] **Y. ZEBBOUDJ, S. GHERBI**, «Mesure du champ électrique avec la sonde polarisée circulaire lors de la décharge couronne positive en fil-plan». 1^{ère} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Bejaia, 1995, pp13-18.
- [19] **L. MOKHNACHE**, «Contribution à l'étude de l'influence des barrières isolantes d'air pointe-plan par le calcul numériques du champ à l'aide de la méthode des éléments finis avec et sans charge d'espace». Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie, 1994.
- [20] **A. BOUBAKEUR, L. MOKHNACHE**, «Potentiel d'une barrière conductrice flottante dans un intervalle d'air pointe-plan», 1^{ère} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Bejaia, Algérie, 1995, pp.27-31.
- [21] **L. MOKHNACHE, A. BOUBAKEUR et S. BOUKHTECHE**, «Modèle de calcul de la rigidité diélectrique de l'air dans un arrangement pointe-barrière-plan en présence de la charge d'espace par la méthode des éléments finis». 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension Tizi – Ouzou, Algérie, 1997, pp24-29.
- [22] **L. MOKHNACHE, A. BOUBAKEUR, S. BOUKHTACHE**, «Calcul numérique du champ et du potentiel dans un intervalle d'air pointe-barrière-plan en présence de la charge d'espace». Proceedings of the IEEE International conference, Vol. Electrical Engineering, 1997, Batna University, Algeria, pp 244-248.
- [23] **K. NACERDDINE**, «Protection contre la foudre sous un sol hétérogène Simulation numérique». Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 1992.
- [24] **M. KHERCHOUC**, «Calcul numérique du champ électrique dans les intervalles d'air pointe-barrière-plan». Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 1995.
- [25] **H. MUHSINI et A. A. AZIRANI**, «The field of rod-plane electrodes and partial discharges inception voltage in air». Ninth international symposium on high voltage engineering, 9th ISH Graz Convention Center, Austria, 1995, paper 2148.
- [26] **K. PETCHARAKS et W. S. ZAENGL**, «Numerical calculation of breakdown voltages of standard air gaps (IEC52) based on streamer breakdown criteria». Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, 9th ISH, Graz Convention Center, Austria, 1995. paper 2173.
- [27] **G. LEROY, C. GARY...**«Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tension». Éditions Eyrolles, 1984.
- [28] **M. N. SLOSIAR**: «Matériaux de l'électrotechnique», Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 1966.
-
-

-
-
- [29] **A. BOUBAKEUR**, « Discharge phenomena in long air gaps with insulation screen », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, 4th ISH, paper 44-05, Athens, Greece, 1983.
- [30] **J. L. JAKUBOWSKI, A. BOUBAKEUR**, «Rigidité diélectrique des moyens intervalles d'air dans les systèmes isolants pointe-plan avec barrière». Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, 10 série des sciences, volume 28, N°9-10, 1980, pp.141-146.
- [31] **I. FOFANA, A. BEROUAL et A. BOUBAKEUR**, «Influence of insulating barriers on positive long air gaps in divergent field». 11th International Symposium on High Voltage Engineering ISH99. IEE Conference Publication N°467, Vol 3, September 1999, London, U.K, pp321-324.
- [32] **A. BEROUAL et A. BOUBAKEUR**, «Influence of barriers on the lightning and impulse strength of mean air gaps in point/plane arrangements». IEEE Transaction on Electrical Insulation. Vol. 26 N° 6, December 1991, pp1130-1139.
- [33] **A. BOUBAKEUR**, «Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe –plan». Rozprawy Electrotechniczne (Académie Polonaise des Sciences), Vol.27, N°3, Varsovie, Pologne, 1981, pp 729-744.
- [34] **M. V. SOKOLOVA, A. N. ZHUKOV**, «Influence of barrier surface properties on the discharge in a narrow gas gap». Ninth international symposium on high voltage engineering. 9th ISH 1995 Graz convention center Austria, paper 2899.
- [35] **M. A. HANDALLA, M. MOUDOUD**, «Courant de préclaquage d'une isolation air-barrière en tension alternative». 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension Tizi-Ouzou, Algérie, 1997, pp 170-175.
- [36] **R. OURNIER**, «Les isolants en électrotechnique concepts et théories». Editions Eyrolles, 1986.
- [37] **A. BOUBAKEUR, J. L. JAKUBOWSKI**, «Influence of insulating screens covered by conducting layers on the breakdown voltage of Pointe/plane air gaps». Algerian Journal of Technology AJOT, Série B, vol. 11 N°1, 1995, pp.159-162.
- [38] **J. S. TOWNSEND**: «Electricity in gases». Oxford University Press, 1914.
- [39] **H. RAETHER**: «Electron avalanches and breakdown in gases». Butterworths, London, 1964.
- [40] **E. DURANT**, «Electrostatique». Tome II, Massons et Cie Editeurs, 1966.
- [41] **E. KUFFEL, W. ZAENGLE**, «High Voltage Engineering». Pergamon press, 1984.
- [42] **L. MOKHNACHE, A. BOUBAKEUR, S. BOUKHTACHE**, «Numerical Model Describing the effect (s) of a barrier and the Space Charges Fields on the Electrical Strength of a point-Plane Air Gaps using the finite elements». IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria (BC) Canada, October, 2000. pp 466-469.
- [43] **L. MOKHNACHE, A. BOUBAKEUR, S. BOUKHTACHE**, «Numerical Model of Electrostatic Barrier Effect in a point-Plane Air Gap in presence of positive Space Charge». Archives of Electrical Engineering, Polish Academy of Science, Polish Scientific Publishers PWN, Vol.XLVIII, N°189-3/99, 1999.
-
-

-
-
- [44] **A. BOUBAKEUR, L. MOKHNACHE, S. BOUKHTACHE, A. FELIACHI**, «Theoretical investigation on Barrier Effect in a point-Plane Air Gap breakdown voltage based on streamer criterion». IEE-Proceedings Science, Measurement and Technology, Vol.151, N° 3, 2004, pp 167-174.
- [45] **A. BOUBAKEUR, L. MOKHNACHE, S. BOUKHTACHE**, «Theoretical investigation on Barrier Effect in a point-Plane Air Gap Using Finite Elements Method in Presence of Space Charge». IEEE International conference on power system Technology, Beijing, China, 1998, pp 116-121.
- [46] **F. V. TOPALIS, I. A. STATHOPOULOS**, «Barrier effect on electrical breakdown in air gaps: a theoretical approach». Ninth international symposium on high voltage engineering. 9th ISH, Graz Convention Center, Austria, 1995, paper 2147.
- [47] **M. DOBARDZIC** : « Station d'essais au choc à haute tension». Rapport interne, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 1972.
- [48] **C. E. I.60** : Commission Electrotechnique Internationale «Techniques d'essais de haute tension». 1973, (60-01/02).
- [49] **R. BELAICHA** : «Contribution à l'étude de la protection contre la foudre dans les cas des terres mauvaises conductrices». Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri Tizi - Ouzou, 1994.
- [50] **A. LABED et A. KAHLA**, «Influences des barrières isolantes sur la tension d'amorçage aux tensions de choc de foudre positives des intervalles d'air pointe-plan». Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 1985.
- [51] **M. GUENFOUD et D. MIDA**, «Influence de largeur des écrans isolants sur l'amorçage des intervalles d'air pointe-plan». Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 1996.
- [52] **M. BOUTLENDJ**, «Influences des écrans isolants sur le tension de décharge disruptive à 50hz des intervalles d'air pointe-plan». Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 1984.
- [53] **M. MOUDOUD**, « Contribution à l'étude d'une isolation solide – air soumise à une tension alternative 50Hz». Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi - Ouzou (UMMTO), Algérie.