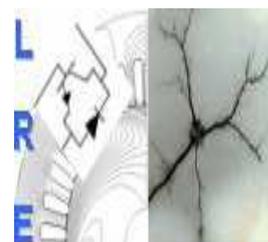


République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



LABORATOIRE DE RECHERCHE EN ELECTROTECHNIQUE

LABORATOIRE DE HAUTE TENSION

Mémoire du projet de fin d'études  
pour l'obtention du  
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème:

**Etude de l'effet d'une barrière  
isolante sur la charge apparente de  
préclaquage dans les intervalles d'huile  
de transformateur sous tension  
alternative**

Proposé par :

Pr. A. BOUBAKEUR, ENP  
Mme. F. GUERBAS, USTHB

Etudié par :

BOUMAHRA Fethi  
OMRANI Ilies

Promotion 2010  
ENP 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, ALGER



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À Celle à qui mon cœur depuis sa naissance n'a pu éprouver qu'amour et reconnaissance, à celle qui a donné un sens à mon existence en m'offrant une éducation digne de confiance*

*À ma chère Mère*

*À mon père, pour son amour et son soutien moral depuis mon enfance.*

*Père merci.*

*À tout les membres de ma famille : Mon frère, mes sœurs et mes deux nièces*

*À mes amis : Aziz, Azzedine, Aoun, Moussa, Walid, Farouk, Nasro...*

*À mes amis de la cité universitaire*

*Et à tous qui m'ont connu et aidé de près et de loin dans la réalisation de ce travail.*

*À toute la promo ENP 2010*

*Ilies*



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents pour les sacrifices et les encouragements  
qu'ils n'ont cessé de me Conférer. Que dieu les gardera  
éternellement heureux.*

*A mes grands-mères pour leurs prières.*

*A mon frère, mes sœurs.*

*A mes oncles et mes tantes.*

*A tous mes amis en particulier Sami, Fouzi, Massi, et à toute  
la promo d'électrotechnique 2010.*

*A tous mes professeurs de L'École Nationale Polytechnique  
qui ont contribué à ma formation d'ingénieur.*

*A toute ma grande famille.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*Fethi*

## Remerciement

*Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement Monsieur Ahmed BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, et Madame F.GUERBAS, Chargée de cours à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène, de nous avoir confié ce sujet et pour l'aide précieuse qu'ils nous ont toujours apportée jusqu'à l'achèvement de ce travail. Leurs insignes observations et suggestions ont été d'un grand apport pour son aboutissement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur A. MEKHALDI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, et à Monsieur M. TEGUAR Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir toujours été agréables avec nous et d'avoir bien voulu examiner notre Projet de Fin d'Études.*

*C'est avec un énorme plaisir que nous formulons notre gratitude, et nos remerciements à Monsieur M. ZITOUNI, et Mr. MOULA pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée durant notre travail.*

*Enfin, nos chaleureux remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

## ملخص:

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير الحواجز العازلة على الشحنة الظاهرية في مرحلة ما قبل الإنفصام والطاقة المتوسطة لمجالات زيوت المحولات ( بوراق 22 ) تحت تأثير توتر متناوب ذو تردد صناعي 50 هرتز في نظام نتوء-مستوي. قمنا بدراسة تأثير عدة عوامل منها: التوتر المطبق , المسافة الفاصلة بين الأقطاب , الموضع النسبي للحاجز العازل, طبيعته, قطره وسمكه.

النتائج المتحصل عليها في عملنا تساهم في تحسين تفسير الأعمال السابقة التي أجريت في مخبر التوتر العالي للمدرسة الوطنية متعددة التقنيات في مجال صلابة مجالات الزيوت لأنظمة نتوء-مستوي.

**الكلمات المفتاحية:** زيت المحول, حاجز عازل, نظام نتوء-مستوي, الشحنة, ما قبل الإنفصام, الطاقة المتوسطة.

## Résumé:

Dans le présent travail, nous avons étudié l'influence des barrières isolantes sur la charge apparente de préclaquage et l'énergie moyenne mise en jeu dans les intervalles d'huiles de transformateur (Borak 22) sous tension alternative à fréquence industrielle 50 Hz dans un système d'électrodes pointe-plan. Nous avons étudié l'influence de différents paramètres tels que : la tension appliquée, la distance inter-électrodes, la position relative de l'écran isolant, sa nature, son diamètre et son épaisseur.

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'Ecole Nationale Polytechnique dans le domaine de la rigidité des intervalles d'huiles pointe-plan.

**Mots-clés:** Huile de transformateur, barrière isolante, système d'électrodes pointe-plan, charge apparente, le préclaquage, énergie moyenne.

## **Abstract:**

In this work, we have studied the influence of the insulating barriers on the pre-breakdown apparent charge and the average energy of the transformer oil gaps (Borak 22) under alternative applied voltage at industrial frequency 50 Hz in a point-plane electrode system. We have studied the influence of different parameters such as: the applied voltage, the inter-electrodes distance, the relative position of the insulating barrier, its nature, its diameter and its thickness.

The results of our work contribute to the improvement of the interpretation of investigations results previously made at the Laboratory of High Voltage of the ENP in the field of the rigidity of the point- plane oil gaps.

**Key-words:** Transformer oil, insulating barrier, system of electrodes point-plane, apparent charge, pre-breakdown, average energy

# *Liste des figures*

<b>Figure II.1:</b> Décharges a l'interface liquide/solide dans un système pointe-plan.....	20
<b>Figure II.2:</b> Schéma de la double couche.....	21
<b>Figure II.3. (a):</b> Décharge directe à 50Hz (intervalle de 1m).....	28
<b>Figure II.3 (b):</b> Décharge glissante sous tension de choc de foudre, photographie de contact .....	28
<b>Figure II.3 (c):</b> Décharge par étapes .....	28
<b>Figure II.3 (d):</b> Décharge par étapes dans le cas de la pointe sous tension de choc négatif.....	28
<b>Figure III.1 :</b> Schéma du circuit d'essais .....	30
<b>Figure III.2 :</b> Cellule d'essais .....	33
<b>Figure III.3 :</b> Schéma de la cellule d'essais .....	34
<b>Figure III.4 :</b> Forme de la barrière utilisée .....	35
<b>Figure III.5:</b> Formes des signaux de tension appliquée (en bleu foncée) et de la charge (en bleu clair) pour un système sans barrière, $d=8\text{cm}$ et $U=10\text{kV}$ .....	36
<b>Figure III.6:</b> Formes des signaux de tension appliquée (en bleu foncée) et de la charge (en bleu clair) pour une barrière en bakélite $D=10\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=12\text{cm}$ , $U=10\text{kV}$ et $a/d=0.4$ .....	37
<b>Figure IV.1:</b> Formes des signaux de la tension appliquée (en bleu foncée) et de la charge (en bleu clair) pour $d=8\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$ .....	39
<b>Figure IV.2:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour $d=8\text{cm}$ et $U=10\text{kV}$ .....	40
<b>Figure IV.3:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour $d=8\text{cm}$ et $U=15\text{kV}$ .....	40
<b>Figure IV.4:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour $d=8\text{cm}$ et $U=20\text{kV}$ .....	41
<b>Figure IV.5:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour $d=8\text{cm}$ et $U=25\text{kV}$ .....	41
<b>Figure IV.6:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour $d=8\text{cm}$ et $U=30\text{kV}$ .....	42
<b>Figure IV.7:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour $d=8\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$ .....	42

<b>Figure IV.8:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan sans barrière pour différentes distances inter-électrodes.....	43
<b>Figure IV.9:</b> Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan sans barrière pour différents niveaux de tension.....	44
<b>Figure IV.10:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $U=40\text{kV}$ et $a/d=1$ .....	45
<b>Figure IV.11:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $U=40\text{kV}$ et $a/d=0.8$ .....	46
<b>Figure IV.12:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $U=40\text{kV}$ et $a/d=0.6$ .....	46
<b>Figure IV.13:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $U=40\text{kV}$ et $a/d=0.4$ .....	47
<b>Figure IV.14:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $U=40\text{kV}$ et $a/d=0.2$ .....	47
<b>Figure IV.15:</b> Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $U=40\text{kV}$ et $a/d=0$ .....	48
<b>Figure IV.16:</b> Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$ .....	49
<b>Figure IV.17:</b> Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$ .....	49
<b>Figure IV.18:</b> Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$ .....	50
<b>Figure IV.19:</b> Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$ .....	50
<b>Figure IV.20:</b> Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$ .....	50
<b>Figure IV.21:</b> Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$ .....	51
<b>Figure IV.22:</b> Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de sa position: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$ .....	52
<b>Figure IV.23:</b> Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de sa position: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$ .....	53

<b>Figure IV.24:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite : $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=12\text{cm}$ pour différentes positions.....	52
<b>Figure IV.25:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite : $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=12\text{cm}$ pour différentes positions.....	52
<b>Figure IV.26:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=12\text{cm}$ pour différentes positions.....	53
<b>Figure IV.27:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=12\text{cm}$ pour différentes positions.....	53
<b>Figure IV.28:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $a/d = 0.6$ pour différentes distances inter-électrodes.....	53
<b>Figure IV.29:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $a/d = 0.6$ pour différentes distances inter-électrodes .....	54
<b>Figure IV.30:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $a/d = 0.6$ pour différentes distances inter-électrodes .....	54
<b>Figure IV.31:</b> Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $a/d = 0.6$ pour différentes distances inter-électrodes.....	54
<b>Figure IV.32:</b> Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $a/d = 0$ pour différents niveaux de tension. ....	55
<b>Figure IV.33:</b> Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $a/d = 0.2$ pour différents niveaux de tension. ....	56

<b>Figure IV.34:</b> Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite: $D=10\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $a/d = 0.4$ pour différents niveaux de tension. ....	56
<b>Figure IV.35:</b> Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $a/d = 0.6$ pour différents niveaux de tension. ....	56
<b>Figure IV.36:</b> Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn: $d=10\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $a/d = 0.8$ pour différents niveaux de tension. ....	57
<b>Figure IV.37:</b> Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn: $d=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $a/d = 1$ pour différents niveaux de tension. ....	57
<b>Figure IV.38:</b> Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite : $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ pour différents niveaux de tension .....	58
<b>Figure IV.39:</b> Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite : $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ pour différents niveaux de tension .....	58
<b>Figure IV.40:</b> Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn : $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ pour différents niveaux de tension .....	59
<b>Figure IV.41:</b> Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn : $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ pour différents niveaux de tension .....	59
<b>Figure IV.42:</b> Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ et $U=30\text{kV}$ .....	59
<b>Figure IV.43:</b> Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ et $U=30\text{kV}$ .....	60

<b>Figure IV.44:</b> Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ et $U=30\text{kV}$ .....	60
<b>Figure IV.45:</b> Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ et $U=30\text{kV}$ .....	60
<b>Figure IV.46:</b> Efficacité en fonction la distance inter-électrode de deux barrière l'une en bakélite l'autre en presspahn : $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $U=30\text{kV}$ , $a/d = 0.6$ . .....	61
<b>Figure IV.47:</b> Efficacité en fonction la distance inter-électrode de deux barrière l'une en bakélite l'autre en presspahn : $D=20\text{cm}$ ; $e=4\text{mm}$ ; $U=30\text{kV}$ , $a/d = 0.6$ .....	62
<b>Figure IV.48:</b> Efficacité de la barrière en fonction de la position de deux barrière l'une en bakélite et l'autre en presspahn: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=12\text{cm}$ et $U=40\text{kV}$ .....	62
<b>Figure IV.49:</b> Efficacité de la barrière en fonction de la position de deux barrière l'une en bakélite et l'autre en presspahn: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=12\text{cm}$ et $U=40\text{kV}$ .....	62
<b>Figure IV.50:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn; $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=4\text{cm}$ ; $a/d = 1$ .....	63
<b>Figure IV.51:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn; $D=20\text{cm}$ ; $e=4\text{mm}$ ; $d=6\text{cm}$ ; $a/d = 0.8$ .....	63
<b>Figure IV.52:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn; $D=10\text{cm}$ ; $e=2\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $a/d = 0$ .....	63
<b>Figure IV.53:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn; $D=20\text{cm}$ ; $e=4\text{mm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $a/d = 0$ .....	64
<b>Figure IV.54:</b> Efficacité en fonction de la position de deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=10\text{cm}$ ; $U=15\text{kV}$ ; $d=10\text{cm}$ .....	65
<b>Figure IV.55:</b> Efficacité en fonction de la position de deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}$ ; $U=15\text{kV}$ ; $d=10\text{cm}$ .....	65

- Figure IV.56:** Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  $d=10\text{cm}$ ,  $U=30\text{kV}$ ;  $a/d=0.4$ ;..... 65
- Figure IV.57:** Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ,  $U=30\text{kV}$ ;  $a/d = 0.4$ ;..... 66
- Figure IV.58:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=10\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d = 0.6$  ..... 66
- Figure IV.59:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 0$  ..... 66
- Figure IV.60:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0.2$ ..... 67
- Figure IV.61:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm)  $D=10\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d = 1$ ..... 67
- Figure IV.62:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=10\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 0$ ..... 67
- Figure IV.63:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=10\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d = 0.4$ ..... 68
- Figure IV.64:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0.4$ ..... 68
- Figure IV.65:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d=0$ ..... 68
- Figure IV.66:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d=0$ ..... 69
- Figure IV.67:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d=0.2$ ..... 69
- Figure IV.68:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d=1$ ..... 69
- Figure IV.69:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=10\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d=0.6$ ..... 70
- Figure IV.70:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d=0.4$ ..... 70

<b>Figure IV.71:</b> Efficacité en fonction de la position pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm), $e=2\text{mm}$ , $U=35\text{kV}$ , $d=12\text{cm}$ .....	71
<b>Figure IV.72:</b> Efficacité en fonction de la position pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm), $e=4\text{mm}$ , $U=40\text{kV}$ , $d=12\text{cm}$ .....	71
<b>Figure IV.73:</b> Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm), $e=4\text{mm}$ , $U=30\text{kV}$ , $a/d=0.8$ ....	71
<b>Figure IV.74:</b> Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm), $e=2\text{mm}$ , $U=30\text{kV}$ , $a/d=0.2$ .....	72
<b>Figure IV.75:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$ ; $d=12\text{cm}$ ; $a/d=0.8$ ....	72
<b>Figure IV.76:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$ ; $d=8\text{cm}$ ; $a/d=1$ .....	73
<b>Figure IV.77:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm); $e=4\text{mm}$ ; $d=12\text{cm}$ ; $a/d=0$ .....	73
<b>Figure IV.78:</b> Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$ ; $d=12\text{cm}$ ; $a/d=0$ .....	73
<b>Figure IV.79:</b> Energie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes.....	75
<b>Figure IV.80:</b> Energie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension .....	76
<b>Figure IV.81:</b> Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes position; barrière utilisée : bakélite ; $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=10\text{cm}$ .....	77
<b>Figure IV.82:</b> Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes position; barrière utilisée : presspahn ; $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=10\text{cm}$ .....	77
<b>Figure IV.83:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en bakélite en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ .....	78
<b>Figure IV.84:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en bakélite en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ .....	79
<b>Figure IV.85:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en presspahn en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=10\text{cm}$ , $e=2\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ .....	79
<b>Figure IV.86:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en presspahn en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=20\text{cm}$ , $e=4\text{mm}$ , $d=8\text{cm}$ .....	80

<b>Figure IV.87:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn; $D=10\text{cm}; e=2\text{mm}; d=4\text{cm}; a/d=1$ .....	81
<b>Figure IV.88:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn; $D=20\text{cm}; e=4\text{mm}; d=6\text{cm}; a/d=0.8$ .....	81
<b>Figure IV.89:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'un en bakélite et l'autre en presspahn; $D=10\text{cm}; e=2\text{mm}; d=10\text{cm}; a/d=0$ .....	82
<b>Figure IV.90 :</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn; $D=20\text{cm}; e=4\text{mm}; d=8\text{cm}; a/d=0$ .....	82
<b>Figure IV.91:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=10\text{cm}; d=4\text{cm}; a/d=0.6$ .....	83
<b>Figure IV.92:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}; d=6\text{cm}; a/d=0$ .....	84
<b>Figure IV.93 :</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}; d=10\text{cm}; a/d=0.2$ .....	84
<b>Figure IV.94:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=10\text{cm}; d=8\text{cm}; a/d=1$ .....	85
<b>Figure IV.95:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=10\text{cm}; d=6\text{cm}; a/d=0$ .....	85
<b>Figure IV.96:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=10\text{cm}; d=8\text{cm}; a/d=0.4$ .....	86

<b>Figure IV.97:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $a/d=0.4$ .....	86
<b>Figure IV.98:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}$ ; $d=10\text{cm}$ ; $a/d=0$ .....	87
<b>Figure IV.99:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}$ ; $d=8\text{cm}$ ; $a/d=0$ .....	87
<b>Figure IV.100:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}$ ; $d=6\text{cm}$ ; $a/d=0.2$ .....	88
<b>Figure IV.101:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=20\text{cm}$ ; $d=6\text{cm}$ ; $a/d=1$ .....	88
<b>Figure IV.102:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=10\text{cm}$ ; $d=4\text{cm}$ ; $a/d=0.6$ .....	89
<b>Figure IV.103:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); $D=10\text{cm}$ ; $d=4\text{cm}$ ; $a/d=0.4$ .....	89
<b>Figure IV.104:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm); $D=20\text{cm}$ ; $d=12\text{cm}$ ; $a/d=0.8$ .....	90
<b>Figure IV.105:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$ ; $d=8\text{cm}$ ; $a/d=1$ .....	91
<b>Figure IV.106:</b> Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm); $e=4\text{mm}$ ; $d=12\text{cm}$ ; $a/d=0$ .....	91

**Figure IV.107** : Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm);  $e=2\text{mm}$ ;  $d=12\text{cm}$ ;  $a/d=0$  ..... 92

**Figure IV.108** : Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm);  $e=4\text{mm}$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d=0$  ..... 92

# *Sommaire*

**Introduction générale** ..... 1

**Chapitre I : LES HUILES ISOLANTES POUR TRANSFORMATEURS**

**I.1 Introduction** ..... 3

**I.2 Historique**..... 3

**I.3 Caractéristique des huiles isolantes** ..... 4

**I.3.1 Rôle des huiles isolantes** ..... 4

**I.3.2 Différentes catégories d’huiles isolantes** ..... 5

**I.3.2.1. Les huiles synthétiques** ..... 5

**I.3.2.1.1. Hydrocarbures halogènes** ..... 5

**I.3.2.1.2. Hydrocarbures aromatiques et aliphatiques** ..... 5

**I.3.2.1.3. Les esters** ..... 5

**I.3.2.1.4. Les huiles silicones** ..... 6

**I.3.2.2. Les huiles d’origine végétale**..... 6

**I.3.2.3. Les huiles minérales** ..... 7

**I.3.2.3.1. Origine** ..... 7

**I.3.2.3.2. Présentation des huiles minérales** ..... 7

**I.3.2.3.2.1. Tendance paraffinique** ..... 7

**I.3.2.3.2.2. Tendance naphtéinique** ..... 8

**I.3.2.3.2.3. Tendance aromatique** ..... 8

**I.3.2.3.3. Usages** ..... 9

**I.4 Rappels sur la régénération des huiles minérales isolantes usagées**..... 9

**I.4.1 Principe général de la régénération** ..... 9

**I.4.1.1 La décantation**..... 9

**I.4.1.2 La séparation des impuretés**..... 9

**I.4.1.3 La déshydratation** ..... 10

**I.4.1.4 Le traitement à l’acide** ..... 10

**I.4.1.5 La neutralisation** ..... 10

1.4.1.6 Le passage a la terre.....	10
<b>1.5 Les propriétés d'une huile minérale isolante.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5.1 Les propriétés électriques .....</b>	<b>11</b>
1.5.1.1 La permittivité ou la constante diélectrique .....	11
1.5.1.2 La rigidité diélectrique .....	11
1.5.1.3 Le facteur de dissipation diélectrique ( $\text{tg } \delta$ ).....	12
<b>1.5.2 Les propriétés physiques.....</b>	<b>12</b>
1.5.2.1 La viscosité .....	12
1.5.2.2 Le point d'écoulement.....	13
1.5.2.3 Le point de feu.....	13
1.5.2.4 Le point d'éclairer .....	13
1.5.2.5 La capacité thermique.....	14
1.5.2.6 La conductivité thermique .....	14
1.5.2.7 Aspect et couleur .....	14
<b>1.5.3 Les propriétés chimiques.....</b>	<b>14</b>
1.5.3.1 L'acidité totale .....	14
1.5.3.2 Oxydation des huiles minérales isolantes .....	15
1.5.3.3 La teneur en soufre .....	15
<b>1.6 Pourquoi des transformateurs remplis d'huile isolante ? .....</b>	<b>16</b>
1.6.1 Fonction diélectrique .....	16
1.6.2 Fonction transfert de chaleur.....	17
1.6.3 Autres fonctions.....	17
<b>1.7 Conclusion .....</b>	<b>18</b>

**Chapitre II: INFLUENCE DES BARRIERES ISOLANTES SUR LA RIGIDITE  
DIELECTRIQUE DANS LES INTERVALLES D'HUILE**

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>19</b>
<b>II.2 Phénomènes de décharges électriques à l'interface solide/liquide.....</b>	<b>19</b>
11.2.1 Mise en évidence d'un effet d'interface .....	20
11.2.2 Double couche et conductivité superficielle .....	20

<i>II.3 Paramétrées définissant la nature de la barrière.....</i>	<i>22</i>
<i>II.3.1 la Résistivité transversale .....</i>	<i>22</i>
<i>II.3.2 La résistivité superficielle .....</i>	<i>23</i>
<i>II.3.3 Constante diélectrique ou permittivité relative( <math>\epsilon_r</math>): .....</i>	<i>23</i>
<i>II.4 Influence des paramètres liés à l'effet de la barrière .....</i>	<i>23</i>
<i>II.4.1 Influence du type de tension .....</i>	<i>24</i>
<i>II.4.2 Influence de la polarité de l'électrode pointe .....</i>	<i>24</i>
<i>II.4.3 Influence de la position de la barrière .....</i>	<i>24</i>
<i>II.4.4 Influence des dimensions et du nombre de barrières.....</i>	<i>25</i>
<i>II.4.5 Influence de la perforation de la barrière .....</i>	<i>25</i>
<i>II.4.6 Influence du matériau de la barrière.....</i>	<i>26</i>
<i>II.4.7 Influence de l'accumulation de la charge d'espace.....</i>	<i>26</i>
<i>II.5 Formes des décharges observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante....</i>	<i>26</i>
<i>II.5.1 Décharge directe .....</i>	<i>27</i>
<i>II.5.1.1 Cas ou la décharge perfore la barrière .....</i>	<i>27</i>
<i>II.5.1.2 Cas ou la décharge contourne la barrière.....</i>	<i>27</i>
<i>II.5.2 Décharge par étapes .....</i>	<i>27</i>
<i>II.6 Conclusion.....</i>	<i>29</i>

### **Chapitre III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

<i>III.1 Introduction .....</i>	<i>30</i>
<i>III.2 Techniques expérimentales .....</i>	<i>30</i>
<i>III.2.1. Station d'essai .....</i>	<i>31</i>
<i>III.2.2. Cellule d'essais .....</i>	<i>32</i>
<i>III.2.3 Les paramètres utilisés .....</i>	<i>33</i>
<i>III.2.4 Présentation de l'huile .....</i>	<i>35</i>
<i>III.2.5 Circuits de mesure .....</i>	<i>35</i>
<i>III.2.6 Forme des signaux obtenus:.....</i>	<i>36</i>

## **Chapitre IV: RESULTATS ET INTERPRÉTATIONS**

<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>38</b>
<b>IV.2 Essais sans barrière.....</b>	<b>39</b>
<b>IV.2.1 Effet de la tension appliquée sur la charge apparente de préclaquage .....</b>	<b>44</b>
<b>IV.2.2 Effet de la distance inter-électrodes sur la charge apparente de préclaquage .....</b>	<b>45</b>
<b>IV.3 Essais avec barrière.....</b>	<b>46</b>
<b>IV.3.1 Effet de l'insertion de la barrière.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.3.2 Effet de la tension appliquée .....</b>	<b>53</b>
<b>IV.3.3 Effet de la distance inter-électrodes.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.2.4 Effet de la position de la barrière .....</b>	<b>58</b>
<b>IV.2.5 Effet de la nature de la barrière .....</b>	<b>62</b>
<b>IV.2.6 Effet de l'épaisseur de la barrière.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.2.7 Effet du diamètre de la barrière: .....</b>	<b>71</b>
<b>IV.3 Energie du système.....</b>	<b>75</b>
<b>IV.3.1 Energie pour un système pointe-plan sans barrière.....</b>	<b>75</b>
<b>IV.3.1.1 Influence de la tension appliquée.....</b>	<b>75</b>
<b>IV.3.1.2 Influence de la distance inter-électrodes .....</b>	<b>76</b>
<b>IV.3.2 Energie pour un système pointe-plan avec barrière.....</b>	<b>76</b>
<b>IV.3.2.1 Effet de l'insertion de la barrière .....</b>	<b>76</b>
<b>IV.3.2.2 Effet de la position de la barrière.....</b>	<b>78</b>
<b>IV.3.2.3 Effet de la nature de la barrière.....</b>	<b>80</b>
<b>IV.3.2.4 Effet de l'épaisseur.....</b>	<b>83</b>
<b>IV.3.2.4 Effet du diamètre .....</b>	<b>90</b>
<b>IV.4 CONCLUSION.....</b>	<b>93</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>94</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>96</b>

*Introduction*

*Générale*

Les transformateurs de puissance sont des composants essentiels des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils constituent l'un des éléments les plus chers et il est donc fondamental qu'ils fonctionnent correctement durant de nombreuses années. La plupart des transformateurs de puissance à travers le monde sont remplis avec des liquides isolants. Ces liquides permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique (par imprégnation des isolants solides, cellulosiques en particulier) que le transfert de chaleur. En effet, en plus de leurs propriétés diélectriques, ils ont de bonnes propriétés de dissipation de chaleur comparés aux isolants solides et gazeux.

L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût [1].

Les liquides isolants sont très rarement employés seul, mais généralement en association avec des solides isolants. En effet, il est connu depuis longtemps que l'insertion de barrières isolantes dans les intervalles d'huile augmente significativement la rigidité diélectrique du système. Cet effet bénéfique est largement utilisé lors du dimensionnement des structures isolantes, particulièrement les transformateurs de puissance [2].

Les avantages techniques inhérents à l'utilisation des diélectriques liquides ne se font pas sans entraîner un certain nombre de problèmes. En effet, les termes de comportement diélectrique et de rigidité diélectrique riment avec le claquage (ou rupture) électrique.

Le claquage des diélectriques liquides est loin d'être instantané. Il est précédé d'une période dite de préclaquage qui comprend elle-même deux phases [3]:

-Une phase de génération pendant laquelle se créent les circonstances favorables (injection et multiplication localisées de charges dans le liquide) à l'apparition de l'étape suivante, en règle générale, celle d'un « streamer » (canal conducteur lumineux et ramifié);

-Une phase de propagation de la perturbation précédemment créée (le streamer).

Ainsi l'analyse des phénomènes de préclaquage est très utile pour une meilleure compréhension des mécanismes conduisant au claquage dans le système d'isolation soumis à des fortes surtensions.

Notre travail fait suite à des travaux déjà entamés au niveau du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ces travaux ont porté sur l'étude de l'effet de l'insertion d'une barrière isolante dans les intervalles d'huile sur la rigidité diélectrique [4] et sur le courant de préclaquage [5].

L'objectif de ce travail consiste en l'étude de l'effet d'une barrière isolante sur la charge apparente de préclaquage et l'énergie moyenne mise en jeu dans l'huile de transformateur "Borak 22" pour un système pointe- plan auquel une contrainte alternative de fréquence industrielle (50Hz) est appliquée.

Le présent manuscrit est scindé en quatre chapitres distincts:

Le premier chapitre constitue un aperçu sur les huiles isolantes pour les transformateurs en présentant leurs rôles, leurs différentes catégories et leurs propriétés physiques, électriques et chimiques.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur l'influence des barrières sur la rigidité diélectrique des intervalles d'huiles et les phénomènes qui se produisent au niveau de l'interface liquide/solide.

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

Dans le quatrième 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 I*

*Les huiles isolantes  
pour transformateurs*

## **I.1 Introduction**

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers: transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc...

Les volumes d'huiles employés varient de quelques litres pour les condensateurs, à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance [6]. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation solide, sachant que la rigidité diélectrique des liquides est nettement supérieure à celle des gaz.

Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à assurer l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas des transformateurs.

## **I.2 Historique**

A l'origine, l'isolation électrique des transformateurs était assurée par des produits naturels non imprégnés en contact direct avec l'air. Cette dernière provoquait leur oxydation rapidement.

En 1854, l'immersion d'enroulements dans l'essence de térébenthine [1] a permis d'augmenter leur tenue diélectrique et leur durée de fonctionnement, et de montrer que l'on peut soustraire l'isolation solide à l'oxydation directe. En 1891, l'huile de pétrole fut utilisée à titre expérimental dans l'isolation de transformateur [6] pour remplacer l'air.

C'est seulement au début du XX<sup>ème</sup> siècle, devant la multiplication des réseaux de distribution d'énergie électrique et l'accroissement des puissances installées, que les transformateurs isolés à l'air (dit « secs ») sont devenus énormes (du point de vue taille). Pour réduire leurs dimensions, ils ont été alors peu à peu remplacés par les transformateurs remplis d'huile minérale (dit « immergés ») ; l'huile minérale servant d'isolant électrique et de fluide caloporteur assurant le transfert de chaleur.

L'un des inconvénients de l'huile minérale réside dans le fait que sa résistance au feu est faible et c'est pourquoi des liquides de synthèse tels que les PCB ont été mis au point dans les années 30. Dans les années 70, leur usage fut interdit de part leur toxicité et de nouveaux liquides de synthèse à basse inflammabilité, telles que les huiles silicones ou esters synthétiques ont été développés. Cependant, l'usage de ces derniers reste limité aux petits transformateurs (distribution et traction) à cause de leur coût bien plus élevé [1].

### **I.3 Caractéristiques des huiles isolantes**

#### **I.3.1 Rôle des huiles isolantes**

Les huiles et liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolants solides et produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs, condensateurs, câbles, disjoncteurs, etc....

Ces appareils présentent des pertes d'énergie qui, aussi faibles soient-elles (0,1 à 1% de la puissance nominale), provoquent une élévation de la température. Celle-ci peut être limitée par l'emploi d'huile ou de liquide ou par refroidissement naturel (convection) ou forcé (circulation).

90 à 95% des liquides isolants sont représentés par les huiles minérales, dont l'importance commerciale s'explique par la facilité de les obtenir (à partir des coupes pétrolières) et par leur prix, le plus bas de tous les isolants. Cette masse d'huile ne représente cependant qu'une infime partie (2%) de l'ensemble des lubrifiants [7].

Les trois fonctions principales d'une huile isolante sont :

- évacuer les pertes d'énergie;
- isoler au sens strict (c'est-à-dire ralentir l'oxydation de l'isolation solide),
- isoler au sens électrique.

A côté de ces trois fonctions fondamentales, il y a lieu d'ajouter la fonction de résistance à l'incendie, dont le pouvoir d'extinction des arcs électriques, et le pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement [8].

### **I.3.2 Différentes catégories d'huiles isolantes**

On distingue trois classes d'huiles utilisées à l'échelle industrielle [6] :

#### **I.3.2.1 Les huiles synthétiques**

Les liquides de synthèse sont utilisés lorsque des propriétés particulières sont recherchées (résistance au feu, tenue aux décharges partielles, gassing négatif,...). Ces produits de synthèse ont été différenciés par leur type de structures chimiques.

##### **I.3.2.1.1 Hydrocarbures halogénés**

La nécessité de réduire les risques d'incendie de matériels électriques est à l'origine de la synthèse des hydrocarbures halogénés. L'industrie électrotechnique a essentiellement employé des produits chlorés qui présentaient l'avantage de ne pas donner de gaz inflammables ou explosibles sous décharges partielles ou dans un claquage électrique. Le principe est de remplacer une partie des atomes d'hydrogène de la molécule par des atomes de chlore. Sous ionisation ou arc électrique, il se forme des molécules HCl au lieu d'hydrogène gazeux.

Les premières fabrications industrielles de polychlorobiphényles (PCB) datent de 1929. Ils sont désignés sous le nom générique d'askarel. Ils étaient employés essentiellement dans les transformateurs pour leur résistance au feu et les condensateurs (pour leur tenue aux décharges partielles) jusqu'à ce que leur persistance dans l'environnement conduise à leur interdiction progressive dans tous les pays [9].

##### **I.3.2.1.2 Hydrocarbures aromatiques et aliphatiques**

Ils sont caractérisés par un fort pouvoir d'absorption gazeux sous ionisation (les alkybenzènes), utilisés dans les câbles à haute tension et notamment pour le remplissage des diviseurs capacitifs. Les polybutènes utilisés essentiellement dans les câbles « imprégnés masse » se caractérisent par une haute viscosité [9].

##### **I.3.2.1.3 Les esters**

Il existe plusieurs types d'ester en électrotechnique. Les phtalates ont été utilisés dès le début de la remise en question des PCB, pour l'imprégnation de condensateurs basse et moyenne tension, actuellement seul le dioctylphtalate (DOP) est encore utilisé

pour l'imprégnation de condensateurs basse tension. Les tétraesters sont utilisés pour le remplissage de transformateurs de distribution « résistants au feu », leur point de feu élevé (> 300°C) étant la caractéristique primordiale de ces produits [9].

#### **I.3.2.1.4 Les huiles silicones**

Les huiles silicones les plus couramment utilisées sont des diméthyl-polysiloxanes. Elles se présentent sous la forme de liquides non toxiques ayant la consistance d'une huile, caractérisées par les propriétés suivantes [10]:

- Leur viscosité peut aller de 10 à 100 centistokes. Celle-ci variant beaucoup moins avec la température que celle des huiles minérales ou des diphényles chlorés.
- Leur point de congélation est exceptionnellement bas (-60°C).
- Leur bonne stabilité thermique (température d'utilisation jusqu'à 200°C).

Compte tenu de leur prix élevé, les huiles silicones sont utilisées dans l'isolation de petits matériels travaillant à haute température.

L'inconvénient des diméthylsiloxanes est que leur rigidité diélectrique diminue considérablement à la suite d'une rupture diélectrique, et que la présence d'un arc dégage une grande quantité de gaz [10].

#### **I.3.2.2 Les huiles d'origine végétale**

Les huiles végétales ont fait partie des premiers liquides isolants utilisés pour la fabrication d'appareils électriques. Il existe une grande variété d'huiles végétales. Seule l'huile de ricin est utilisée depuis de longues années. Elle sert à l'imprégnation des condensateurs de stockage d'énergie.

Elles sont généralement peu toxiques et biodégradables. Ces qualités sont dues notamment à une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Ces deux caractéristiques, qui sont favorables pour l'aspect écotoxicologique, représentent un inconvénient important pour les applications électrotechniques. Par ailleurs, leur tenue diélectrique n'est pas très élevée. Pour ces raisons, les huiles végétales sont relativement peu utilisées (essentiellement dans certains types de condensateurs pour courant continu), bien que leur emploi dans les transformateurs ait été proposé récemment [6].

### **I.3.2.3 Les huiles minérales**

#### **I.3.2.3.1 Origine**

Ce sont des produits naturels obtenus de la distillation fractionnée de bruts de pétrole sélectionnés, soumis ensuite à un raffinage poussé. Leur composition chimique est extrêmement compliqué (plusieurs milliers de molécules différentes) d'hydrocarbures, de composés soufrés, oxygénés, azotés et de traces de composés organométalliques [6].

Pour obtenir des huiles minérales de qualité diélectrique, les bruts pétroliers doivent être raffinés suivant un procédé qui inclut habituellement une distillation, suivie d'une opération de déparaffinage, d'une extraction par solvant et d'une hydrogénation catalytique [10].

Les huiles ainsi obtenues sont des diélectriques non polaires, dont la permittivité relative reste voisine de 2.2 dans un large domaine de fréquence et de température.

#### **I.3.2.3.2 Présentation des huiles minérales**

Une huile minérale isolante ou diélectrique est une huile qui présente une faible conductivité électrique du fait d'une densité de charges peu importante. Elle se compose principalement [10] :

- D'une huile dite de base (ou d'un mélange d'huiles de base) obtenue selon des procédés traditionnels de raffinage du pétrole brut ;
- De composés chimiques appelés additifs, en teneur très variable, qui permettent d'atteindre les spécifications d'emploi des huiles finies.

La composition d'une huile minérale reflète, en général, celle du distillat d'origine. Les huiles de base en électrotechnique réparent à trois grandes classes de tendances chimiques. Elles sont définies par leur teneur en carbone paraffinique (C<sub>P</sub>), en carbone naphthénique (C<sub>N</sub>) et en carbone aromatique (C<sub>A</sub>).

##### **I.3.2.3.2.1 Tendance paraffinique**

Dans ce type d'huile, la tendance paraffinique ou la présence d'hydrocarbures paraffiniques prédomine. Ces hydrocarbures sont des molécules complexes à structure saturée et à chaîne droite ramifiée ou non, mais non cycliques.

Les caractères de cette famille d'huiles riches en hydrocarbures paraffiniques sont :

- Une faible densité pour une viscosité donnée ;
- Une variation relativement faible de la viscosité en fonction de la température ;
- Une faible volatilité pour une viscosité donnée ;
- Un faible pouvoir solvant.

#### **I.3.2.3.2.2 Tendance naphténique**

C'est une huile riche en hydrocarbures naphténiques, c'est à dire, il y a présence d'hydrocarbures cycliques à liaisons saturées. Les caractéristiques physiques et chimiques de ces hydrocarbures se traduisent en particulier par :

- Une densité relativement élevée pour une viscosité donnée ;
- Des variations assez rapides de viscosité en fonction de la température
- Une plus grande volatilité que les fonctions paraffiniques correspondantes de même viscosité.
- Un pouvoir solvant relativement élevé.

Ce type d'hydrocarbures renferme les propriétés les plus recherchées pour les huiles de graissages.

#### **I.3.2.3.2.3 Tendance aromatique**

Ce sont des huiles composées de fonctions à noyau benzéniques se caractérisant par une densité très élevée, un indice de viscosité très faible, une très faible résistance à l'oxydation, un point d'aniline très bas (soit un pouvoir solvant très élevé) et une facilité d'émulsion avec l'eau. L'utilisation de ces hydrocarbures dans la fabrication des huiles est très limitée en raison de leur altérabilité. Ils sont facilement oxydables et provoquent la formation des dépôts résineux ou asphaltiques accompagnés de dérivées corrosifs. La fabrication d'huiles finies lubrifiantes, isolantes ou autres, est orientée par les tendances des huiles de base [10].

Le point d'aniline de l'huile, qui est défini comme la température minimale pour laquelle des volumes égaux d'huile et d'aniline sont miscibles en toute proportion, mesure le pouvoir solvant de l'huile. Sa vapeur est en relation avec la teneur en hydrocarbures aromatiques de l'huile, mais est influencée également par d'autres facteurs chimiques : ramifications, insaturations et masse moléculaire.

#### I.3.4.3.4 Usages

L'emploi d'une huile minérale comme liquide isolant dans un transformateur a été breveté pour la première fois aux USA en 1887. La première utilisation date de 1892 [11]. Au départ, les huiles étaient obtenues à partir de bases paraffiniques. Vers 1925, des huiles minérales naphthéniques ont également été mises sur le marché. Puis des additifs ont progressivement été ajoutés (antioxydants, améliorant du point d'écoulement, ...). Les procédés de raffinage ont également beaucoup progressé au fil des années. Les huiles actuelles n'ont donc plus beaucoup de ressemblance avec les premières huiles utilisées.

Compte tenu de leur large disponibilité et de leur faible coût, les huiles minérales sont utilisées dans pratiquement tous les types de matériels électriques. La consommation annuelle est estimée à 1 million de tonnes. Environ 90% sont utilisées dans les transformateurs. Les huiles sont également employées dans les diviseurs capacitifs, les traversées, les changeurs de prise, les répartiteurs, les disjoncteurs et les câbles [11].

### I.4 Rappels sur la régénération des huiles minérales isolantes usagées

La régénération est un ensemble de procédés permettant la production à partir d'une charge d'huile usagée, une ou plusieurs huiles de base. Le recyclage des huiles usagées permet l'économie de recourir à la consommation de nouvelles quantités d'huiles neuves. Par conséquent, la régénération se présente comme étant une autre forme d'économie d'énergie et de lutte contre la pollution de l'environnement.

#### I.4.1 Principe général de la régénération

Les opérations successives pour l'obtention d'un produit de haute qualité, constituent une nouvelle forme de raffinage de l'huile usagée. Ce cycle comprend habituellement les phases successives dans l'ordre suivant [10] :

**I.4.1.1 La décantation** qui a pour but d'éliminer les corps solides, les grosses impuretés et l'eau libre.

**I.4.1.2 La séparation des impuretés** en suspension dans l'huile. Cette opération représente à l'heure actuelle la phase la plus difficile de la régénération. En effet, les particules très fines qui sont en suspension dans l'huile, demeurent insensibles par rapport aux anciens procédés de précipitation des sédiments par rupture de la suspension colloïdale ou par électrolyte tel que le silicate de soude.

**I.4.1.3 La déshydratation** qui a pour but d'éliminer l'eau par chauffage à une température de 150°C. On peut aussi utiliser un desséchant à savoir le CaCl<sub>2</sub>

**I.4.1.4 Le traitement à l'acide** conduit à la floculation des suspensions carbonées et la sulfonation des produits oxydés, mais sans qu'il en résulte une attaque sur l'huile même. Ce traitement s'opère sur l'huile chauffée à une température de l'ordre de 30°C, à laquelle est ajoutée 4% en volume d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 90-92%. Ces produits sont mélangés soit au préalable, soit directement dans un bac de décantation à fond conique. Les boues acides sont précipitées au fond du bac et séparées de l'huile épurée. L'huile épurée fera l'objet de traitements ultérieurs. Ces traitements permettent la réduction des teneurs en métaux provenant des additifs et de l'usure mécanique à quelques PPM (parties par millions) dans l'huile régénérée.

**I.4.1.5 La neutralisation** de l'huile intervient après le traitement à l'acide. En effet, l'huile épurée contient encore des acides de différentes sortes, en particulier sulfonique et petites particules d'acide sulfurique. La neutralisation a pour but de transformer les restes acides dans l'huile épurée en sels. A cet effet, la soude et le carbonate de chaux à 1% en poids sont généralement utilisés.

**I.4.1.6 Le passage à la terre** est une opération qui se fait dans une cuve conique munie d'un agitateur. Elle précède directement le mélange de l'huile à la terre activée. Après neutralisation l'huile est malaxée avec 1 à 10% de terre activée durant 15 à 20 minutes, à une température variable entre 80 et 100°C. Enfin l'huile mélangée est filtrée à travers des filtres presse. Ce traitement permet d'améliorer leurs qualités par décoloration et élimination des produits aisément oxydables.

## **I.5 Les propriétés d'une huile minérale isolante**

On distingue trois types de propriétés essentiels :

- **Les propriétés électriques ;**
- **Les propriétés physiques;**
- **Les propriétés chimiques.**

### **I.5.1 Les propriétés électriques**

Les caractéristiques électriques des liquides dépendent de leur formation. L'étude des propriétés électriques est un domaine qui se caractérise par sa pluridisciplinarité puisqu'il touche à la chimie, à l'électronique et à la mécanique des fluides.

#### ✓ **La permittivité ou la constante diélectrique**

Les huiles minérales isolantes sont constituées en majeure partie par des hydrocarbures saturés dont les molécules ne sont pas polaires [12]. La permittivité d'une huile minérale pure est, surtout, due aux phénomènes de polarisation électronique et atomique. C'est une caractéristique électrique liée à la formation du liquide. La permittivité absolue s'exprime en Farad par mètre. Elle définit la possibilité, sous l'action du champ électronique, à libérer des charges.

**La constante diélectrique** ( $\epsilon_r$ ) est définie comme étant le rapport de la capacité (C) d'une cellule remplie de liquide à la capacité ( $C_v$ ) de la même cellule ayant le vide comme diélectrique:  $\epsilon_r = C/C_v$ .

Elle est influencée par la température ainsi que la fréquence appliquée à ce liquide isolant, elle donne donc une idée sur la charge électrique qu'elle contient. Elle est comprise entre 2.0 et 2.2 pour les huiles minérales isolantes [12].

#### ✓ **La rigidité diélectrique**

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans décharge [8].

Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans des conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, distance et nature sont spécifiées, d'où son nom de « tension de claquage ».

La rigidité diélectrique n'est pas un critère de la qualité de fabrication des huiles isolantes, mais une grandeur conventionnelle destinée à déceler leur état plus ou moins grand de pollution physique par l'eau et d'autres matières en suspension et à conclure ou non de l'opportunité de faire un traitement de décharge et filtration avant introduction dans les appareils auxquels, elles sont destinées.

✓ **Le facteur de dissipation diélectrique ( $tg \delta$ )**

Le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau isolant est la tangente de l'angle de perte qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte.

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes diélectriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est la présence d'un courant de fuite qui traverse le liquide sous un champ électrique [12].

Cette caractéristique est très sensible à la présence de produits de vieillissement de l'huile. Il existe une relation entre le facteur de dissipation et l'acidité de l'huile. Une acidité élevée est accompagnée par une valeur élevée de  $tg\delta$ , mais l'inverse n'est pas vérifié. Une valeur défavorable de  $tg\delta$  peut être due à la dissolution dans l'huile des produits qui n'ont pas pour origine l'altération de l'huile.

Une huile neuve possède un facteur de dissipation diélectrique inférieur ou égale à  $5.10^{-3}$  [8].

### **I.5.2 Les propriétés physiques**

✓ **La viscosité**

Elle traduit les forces qu'opposent les molécules d'huile à une force tendant à les déplacer. En d'autres termes, elle mesure les frottements dus aux mouvements internes entre les molécules du fluide.

Il existe deux types de viscosité : la viscosité dynamique qui visualise l'aspect microscopique et la viscosité cinématique exprimé en centistokes (cst) qui est la plus importante car elle traduit l'aspect macroscopique.

Le choix d'une huile dépend essentiellement de la valeur de la viscosité, c'est un critère particulièrement important pour apprécier la qualité de l'huile.

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$\text{CST} = \text{Ct} \cdot \text{B/t}$$

*CST* : Viscosité en centistokes.

*C* : Constante de viscosité.

*t* : Durée de l'écoulement en secondes.

*B* : Coefficient du viscosimètre.

L'indice de viscosité est une caractéristique donnant la variation de la viscosité d'une huile en fonction de la température.

Une huile est d'autant meilleure que la variation de sa viscosité en fonction de la température est faible.

### ✓ Le point d'écoulement

L'utilisation de matériels électriques extérieurs nécessite de connaître la viscosité des liquides à basse température correspondant au fonctionnement en hiver (-25°C) ou dans des conditions climatiques extrêmes (-60°C).

Les liquides utilisés se figent généralement à des températures pouvant aller de -60°C (polybutènes, huiles silicones) à -30°C (huile minérale).

Le point d'écoulement, température à laquelle les liquides se figent, est défini comme la température la plus basse pour laquelle un liquide peut couler lorsqu'il est refroidi à des conditions fixées. Lorsqu'un liquide est refroidi, il acquiert une certaine consistance qui n'est pas la congélation, correspondant à l'état solide d'un corps pur à température fixe. Cette consistance est liée à la masse moléculaire, à la composition du liquide en mélange de différentes molécules (isomères et additifs).

### ✓ Le point de feu

Le point de feu est la température minimale pour laquelle la combustion des vapeurs d'un liquide sera entretenue.

### ✓ Le point d'éclair

C'est la température minimale à laquelle les vapeurs d'un produit s'enflamment à l'approche d'une flamme nue.

Le point d'éclair et le point de feu servent ainsi à caractériser l'inflammabilité d'une huile.

### ✓ Capacité thermique

La capacité thermique massique et la masse volumique permettent de définir en partie la constante de temps thermique des matériels à pleine charge, suivant le type de refroidissement, naturel ou forcé.

La capacité thermique des huiles isolantes exprimée en Joules par kilogramme Kelvin croît avec la température et est généralement d'autant plus élevée que la masse volumique est plus faible [8].

### ✓ Conductivité thermique

La conductivité thermique ( $\lambda$ ), mesurée en watts par mètre.Kelvin [W/m.K] exprime le flux thermique s'écoulant, en régime permanent sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent. Les valeurs usuelles sont de l'ordre de 0,14 W/(m.K) .

### ✓ Aspect et couleur

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, humidité) et d'évaluer la couleur et la viscosité. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide.

La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve, elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile. Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service. Elle renseigne également sur le vieillissement de l'huile.

L'aspect, la couleur et l'odeur, nous renseignent sur l'état général de l'huile, en effet ; une mauvaise odeur renseigne sur la présence d'amorçages d'arcs électriques dans l'huile, une couleur sombre indique une dégradation de l'huile et l'aspect trouble signifie la présence d'eau et d'impuretés [12].

## **I.5.3 Les propriétés chimiques**

### ✓ L'acidité totale

L'acidité représente les dérivés acides formés au cours du vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de

l'huile. Elle est exprimée par la mesure de l'indice d'acidité qui est le nombre de mg de KOH normale nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile.

L'acidité d'une huile neuve est très faible en service. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile en service [8]. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante. Cette stabilité s'explique par les dépôts qui précipitent.

#### ✓ Oxydation des huiles minérales isolantes

On désigne par oxydation, un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène. Il se produit tout d'abord des produits de décomposition solubles : aldéhydes, cétones, acides organiques, puis par condensation et polymérisation, des dépôts insolubles.

Les conséquences de l'oxydation de l'huile pour les isolations sont :

- Une mauvaise évacuation de la chaleur par suite de l'accroissement de la viscosité et de la présence de dépôts
- Une détérioration des propriétés électriques de l'huile ; sa conductivité et sa tangente de l'angle de pertes augmente,
- Une augmentation des pertes dans les isolations imprégnées qui peuvent entraîner le claquage thermique,
- L'apparition de l'acidité dans l'huile.

#### ✓ La teneur en soufre :

Une huile minérale peut contenir des traces de soufre, soit sous la forme de soufre libre, soit sous forme de composés sulfurés; les premiers sont très corrosifs, les seconds le sont beaucoup moins, tant que la température ne dépasse pas 100°C environ.

La présence de soufre est détectée par la corrosion d'une lame de cuivre électronique immergée dans une huile à 140 °C pendant 19 heures [8], la coloration qu'elle prend permet de juger si les composés sulfurés sont corrosifs ou non.

## **I.6 Pourquoi des transformateurs remplis d'huile isolante ?**

Les transformateurs remplis d'huile (« immergés ») ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée, dans les transformateurs de puissance. Contrairement aux transformateurs de distribution, qui peuvent être « secs » aussi, différentes raisons expliquent cette préférence :

Par rapport aux solides, les liquides refroidissent et isolent à la fois le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compact que les transformateurs secs de même puissance.

Les solides permettent d'obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides, mais à des coûts beaucoup plus élevés.

Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance. Les analyses d'huiles (teneur en eau, analyse de gaz, etc). Permettent de diagnostiquer l'état du transformateur, à moindre coût.

Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

### **I.6.1 Fonction diélectrique**

Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée :

- Soit par le diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple).
- Soit par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide ; c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement.
- Soit par une isolation mixte : combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides ; c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.

Les principales propriétés qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction de diélectrique sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou le facteur de perte ( $tg \delta$ ), la permittivité et la résistivité. Ces quatre caractéristiques, qui dépendent de la température et de la fréquence pour une tension donnée, sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur.

### **I.6.2 Fonction transfert de chaleur**

Bien que son rendement soit exceptionnellement élevé (99 à 99,9%), un transformateur ne peut échapper à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur nécessitant ainsi le refroidissement de l'appareil. En raison des pertes, les températures de chacun des éléments s'élèvent jusqu'à établissement d'un équilibre entre les vitesses de production et d'évacuation de la chaleur. La chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile, vers les radiateurs extérieurs. Un dispositif de refroidissement bien dimensionné permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée de l'huile. Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique [1], et les principales caractéristiques qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

### **I.6.3 Autres fonctions**

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arc électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées), et, dans certains cas, pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, il ne faut pas oublier la fonction d'isolant du matériel solide au sens strict du terme, c'est à dire, qui est celle de ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique.

## **I.7 Conclusion**

Pour assurer une meilleure isolation et fonctionnement du système électrique, il faut bien choisir l'huile isolante utilisée. En effet, il faut prendre en considération certains facteurs, à savoir :

- La toxicité du produit (pollution froide): la toxicité du produit est à prendre en compte dans tous les cas d'éclatement de transformateur sans incendie.
- Le vieillissement: le liquide a-t-il tendance à vieillir et s'altérer très vite en fonction du temps ?
- L'embrassement du diélectrique dépend de son point d'ébullition et de la résistance mécanique du transformateur. Les huiles minérales isolantes remplissent ces conditions; pour cela elles sont très utilisées.
- L'opacité des fumées : de toute évidence, un diélectrique ne dégage de fumées qu'à partir du moment où il a pris feu; l'opacité des fumées peut gêner gravement les secours.

Ce choix d'huile isolante n'est pas suffisant pour avoir une meilleure rigidité électrique, puisque il y'aura le risque de claquage de cette huile causant souvent des dégâts catastrophiques soit sur l'être humain, soit sur le matériel.

Cet obstacle a fait beaucoup de problèmes au niveau de l'industrie (isolation du système électrique), jusqu'à l'arrivée de l'idée de l'insertion des barrières isolantes.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter le rôle des barrières isolantes et leur influence sur la rigidité diélectrique d'intervalle huile en tension alternative.

## *Chapitre II*

*Influence des barrières isolantes  
sur la rigidité diélectrique dans  
les intervalles d'huile*

## **II.1 Introduction**

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 . 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 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 [13].

Ces résultats ont été confirmés par H. Roser [13] 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 et M. P. Verma.

Selon J. M. Meek et M. M. C. Collins la barrière entraîne une modification de l'intensité du champ électrique [13].

## **II.2 Phénomènes de décharges électriques à l'interface solide/liquide**

La tension de claquage d'une isolation mixte solide/fluide est inférieure à celle des diélectriques pris séparément. Dans la plupart des cas, le claquage a lieu le long de l'interface entre les deux diélectriques. Les expériences sur les isolants solide/fluide ont montré que l'interface entre deux diélectriques qui présentent un grand rapport des permittivités (le rapport de la permittivité du solide sur celle du liquide) tend à abaisser la tension de génération des décharges surfaciques. La figure II.1 montre des décharges streamers à l'interface liquide/solide [14].

Dans la disposition parallèle des diélectriques solide et liquide, la tension dans chacun des matériaux est indépendante de la permittivité de l'un ou de l'autre des matériaux [14]. Cependant, l'interface introduit une erreur dans cette appréciation. En effet, les irrégularités de surface (du solide) de quelques microns, se présentent en série avec les deux diélectriques et la différence entre leur permittivité provoque une élévation de l'intensité de champ qui dépend à la fois du degré d'inégalité des permittivités, de la forme et des dimensions de l'irrégularité de surface.



**Figure II.1:** décharges à l'interface liquide/solide dans un système pointe-plan [14]

### **II.2.1 Mise en évidence d'un effet d'interface**

La mesure des pertes diélectriques ( $\text{tg}\delta$ ) sur les échantillons imprégnés montre que celles-ci sont généralement supérieures à celles des composants seuls (solide non imprégné et liquide) [14], alors que ( $\text{tg}\delta$ ) devrait être compris entre ( $\text{tg}\delta_s$ ) (pertes diélectriques du solide) et ( $\text{tg}\delta_l$ ) (pertes diélectriques du liquide). Par conséquent, il existe des pertes supplémentaires dues à l'interaction entre les deux milieux hétérogènes.

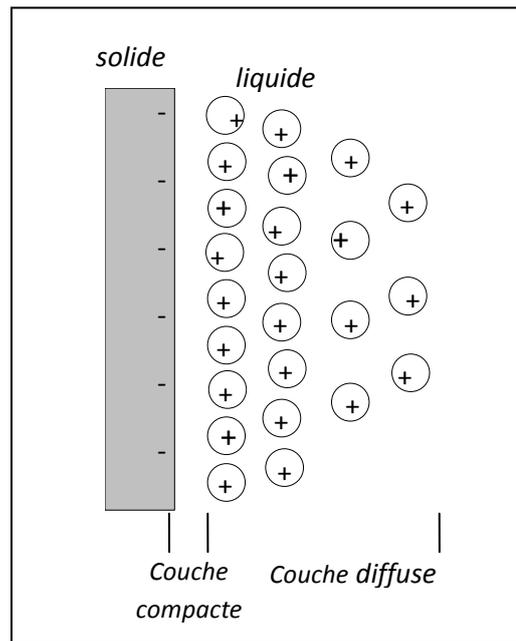
Nous avons lié ces pertes et cette conduction supplémentaire à la double couche électrique aux interfaces liquide/solide; par conséquent, les charges de la double couche participent à la conduction du matériau.

### **II.2.2 Double couche et conductivité superficielle**

En mettant deux phases quelconques en contact, elles développent une différence de potentiel à l'interface, en particulier lorsqu'il s'agit de deux surfaces hétérogènes (solide- fluide).

Ainsi, la surface du solide acquiert une charge électrique d'un signe, celle du fluide acquiert une charge de signe opposé en vertu du principe de l'électroneutralité. D'où le nom de la double couche électrique.

Plusieurs modèles décrivant la répartition des charges dans la double couche ont été avancés. Le premier fut celui de Helmholtz en 1853 et amélioré par Gouy et Chapman en 1910 [14]. Ils supposent qu'une partie des ions de charges opposées présents dans le liquide est située à la surface du solide pour compenser la charge de ce dernier (figure II.2).



**Figure II.2:** Schéma de la double couche

Cependant, ce modèle considère les ions comme des charges ponctuelles qui peuvent s'approcher indéfiniment de la surface du solide, sans prendre en compte leur diamètre ionique. Partant de ce constat, Stern a supposé qu'il existe un plan de moindre approche dans la couche diffuse dû à la taille finie de l'ion, et que ce dernier ne peut s'approcher du solide qu'à une distance minimale égale à son rayon ionique [14]. Par conséquent, il existe au voisinage du solide, deux couches distinctes, dont la première, entre le solide et le plan de moindre approche, appelée couche compacte, et une deuxième couche entre le plan de moindre approche et le liquide, appelée la couche diffuse.

La distribution de la densité de charges positives dans le liquide suit une loi exponentielle décroissante, suivant l'axe perpendiculaire à la surface, de la forme [14] :

$$\rho = \left( \frac{\sigma_0}{\delta} \right) \cdot \exp \left[ - \frac{(x - s)}{\delta} \right]$$

où  $s$  et  $\sigma_0$  représentent respectivement l'épaisseur et la densité de charge surfacique de la couche compacte.  $\delta$  est la longueur de Debye, qui détermine l'épaisseur de la couche diffuse.

$$\delta = \sqrt{D \cdot \tau}$$

Avec  $D$ : coefficient de diffusion des ions positifs.

$\tau$ : Temps de relaxation ( $\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma}$ ), où  $\varepsilon$  est la permittivité et  $\sigma$  la conductivité.

Notons que lorsque le liquide est au repos, la double couche se forme et se stabilise de façon à ce que l'interface reste électriquement neutre sur l'épaisseur de cette couche. Les ions positifs de la double couche sont compensés par les ions négatifs de la couche compacte.

Cependant, les charges accumulées sur la surface des solides, peuvent produire des champs électriques suffisamment élevés pour donner naissance à des décharges [15].

### **II.3 Paramètres définissant la nature de la barrière**

Les barrières isolantes 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.

#### **II.3.1 La résistivité transversale**

La résistivité transversale d'un matériau isolant est la résistance d'un élément de ce matériau de  $1\text{cm}^2$  de section et  $1\text{cm}$  de long [13]. Elle s'exprime généralement en  $(\Omega \cdot \text{cm})$ . 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.

### **II.3.2 La résistivité 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) [13].

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.

### **II.3.3 Constante diélectrique ou permittivité relative ( $\epsilon_r$ )**

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 :  $\epsilon_r = \frac{C}{C_v}$

## **II.4 Influence des paramètres liés à l'effet de la barrière**

L'amélioration de la rigidité diélectrique d'un intervalle d'huile 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'huile initial en un système stratifié (huile-barrière). Les ions positifs créant la charge spatiale sont alors freinés par la barrière et se répartissent sur sa surface.

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.

A. Zouaghi a montré qu'une barrière montée perpendiculairement aux lignes du champ augmente significativement la rigidité du système. Cependant, il est autrement lorsque la barrière est montée en parallèle avec les lignes du champ. Dans le cas des interfaces parallèles, la barrière facilite le déplacement de la décharge et implique ainsi des claquages à des tensions plus basses inférieures à celles du système sans barrière [2].

A. Boubakeur a montré que dans l'air la barrière est à la fois un obstacle électrostatique et géométrique. Pour justifier l'obstacle électrostatique, l'auteur a utilisé une barrière trouée au centre pour vérifier si la charge électrique déposée sur la barrière aurait un rôle important, ainsi il a étudié jusqu'à quel diamètre des trous, la barrière n'entraîne aucun effet améliorateur. Il a remarqué que quand la barrière est percée, la tension disruptive de l'arrangement pointe-barrière-plan tend à diminuer, quand le diamètre du trou augmente. Il est intéressant de noter que même avec un trou de 10 mm de diamètre, le chemin suivi par la décharge disruptive passe généralement par le bord de la barrière, il passe par le trou quand son diamètre est supérieur à 10 mm, pour une distance pointe-plan supérieur à un mètre et une barrière de largeur 1.2 m [10].

#### **II.4.1 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 [13].

#### **II.4.2 Influence de la polarité de l'électrode 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 [13].

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

#### **II.4.3 Influence de la position de la barrière**

L'influence de la position de la barrière dépend également des paramètres électro géométriques du système à savoir la distance inter-électrodes, la configuration des électrodes. Les niveaux de tensions de claquages supérieurs sont obtenus dans l'huile

minérale, quand la barrière est au voisinage de la pointe [2]. Dans un système pointe-plan, le maximum de la caractéristique tension de décharge en fonction de la position de la barrière, est obtenu dans l'air pour une position de la barrière à 20% de l'électrode pointe. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge [10].

#### **II.4.4 Influence des dimensions et du nombre de barrières**

L'influence de l'épaisseur de la barrière sur la tenue diélectrique du système dans l'huile est négligeable, aussi bien pour les petites distances inter-électrodes, que pour les grandes distances. Toutefois ce paramètre influe sur la distribution de porteurs de charges positifs à la surface de la barrière. Par conséquent, le champ devient de plus en plus uniforme entre la barrière et le plan [10].

La rigidité diélectrique de l'arrangement pointe-barrière-plan augmente significativement avec la largeur de la barrière. En effet, cette rigidité dépend de la longueur du canal de la décharge. Cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière et barrière plan.

Pour des petites largeurs, la décharge pourrait se faire de manière directe. Par contre, pour les grandes largeurs de la barrière devant la longueur de l'intervalle pointe-plan, la décharge se fait par étapes.

Dans l'huile minérale, le nombre de barrières n'a aucune influence apparente sur la tension de claquage d'une structure divergente, ceci peut être dû au fait que l'angle solide constitué par la pointe et la barrière dépend uniquement du rayon de la première barrière et de sa position. Cependant, l'intérêt de cette association peut apparaître lors d'un défaut sur la première [10].

#### **II.4.5 Influence de la perforation de la barrière**

La présence d'une perforation sur la barrière dans l'huile minérale diminue significativement son efficacité et par conséquent la tenue diélectrique du système. Cette diminution est fonction de la position de la barrière et du rayon de l'ouverture. En effet, plus la barrière s'approche de la pointe, plus l'effet de la perforation n'augmente. Lorsque la barrière est placée au voisinage du plan, l'influence de ce défaut dépend de la probabilité du passage de la décharge à travers le trou qui dépend à son tour de la distribution des charges sur la surface de la barrière.

#### **II.4.6 Influence du matériau de la barrière**

M. V. Sokolova 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 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 ( $\epsilon_r \text{ verre} > \epsilon_r \text{ plexiglas}$ ) [13].

#### **II.4.7 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. 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), comme étant un paramètre fondamental pour établir une isolation meilleure [13].

### **II.5 Formes des décharges observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante**

L'évolution et la forme des décharges [13,16] 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.

### **II.5.1 Décharge directe**

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

#### **II.5.1.1 Cas où la décharge perfore la barrière**

Ce cas est rencontré surtout quand la barrière est très large, assez mince et située à une distance proche de la pointe (électrode près de laquelle le champ est très intense) [16].

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

#### **II.5.1.2 Cas où la décharge contourne la barrière**

Pour un système pointe positive-plan avec barrière, les streamers [13] 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 [16], (Figure II.3-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) [13].

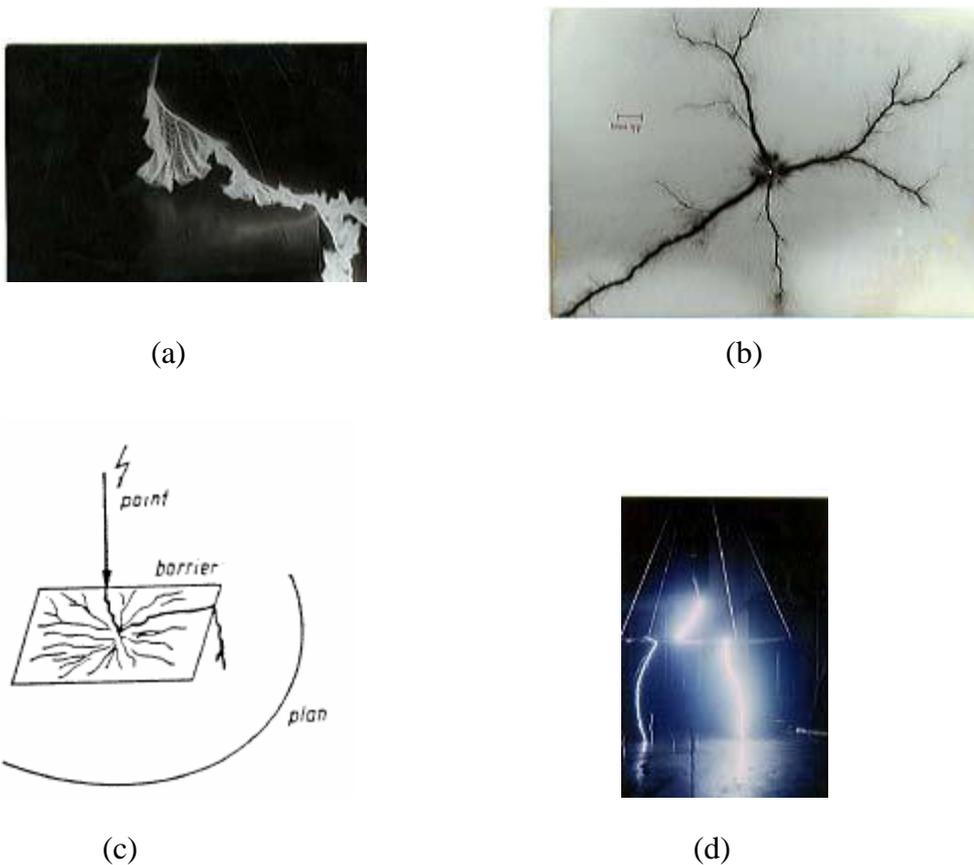
### **II.5.2 Décharge par étapes**

Cette forme de décharge se rencontre quand la barrière est très large et n'est pas trouée. L'amorçage s'effectue en trois étapes quand la pointe est positive [13].

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 II.3-b), et finalement, la troisième et dernière étape est atteinte quand la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan (figure II.3-c).

Pour une pointe négative, on a quatre étapes [13], 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 II.3-d).



**Figure II.3 :** Décharge directe et par étapes dans l'air [16].

(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.

## **II.6 Conclusion**

Il ressort de ce qui précède que l'insertion 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.

Il ressort aussi de cette analyse bibliographique que les phénomènes liés à l'introduction d'une barrière isolante dans un intervalle d'huile ne dépendent pas uniquement des propriétés intrinsèques des deux constituants (l'huile et la barrière) mais aussi des différents processus physico-chimiques apparaissant lors du contact des deux phases (double couche, charges et conduction superficielle,...).

Pour avoir plus d'information sur les phénomènes liés à l'insertion d'une barrière isolante, nous avons effectué des essais (à 50Hz) de mesure de la charge de préclaquage dans un système pointe-plan avec et sans barrière.

# *Chapitre III*

*Techniques Expérimentales*

### III.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les techniques expérimentales réalisées au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et les résultats obtenus concernant l'étude diélectrique de l'huile de transformateur sous tension alternative 50 Hz. Nous nous sommes intéressés durant nos essais à :

- L'influence de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée sur la charge injectée dans l'huile pour un système pointe-plan sans barrière.
- L'influence de la position, du diamètre, de l'épaisseur et de la nature de la barrière sur la charge injectée dans l'huile pour un système pointe-plan avec barrière.

### III.2 Techniques expérimentales

Le circuit d'essais (Figure III.1) comprend une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque HEAFELY, un modèle expérimental (objet d'essai), des circuits de mesures et de protection.

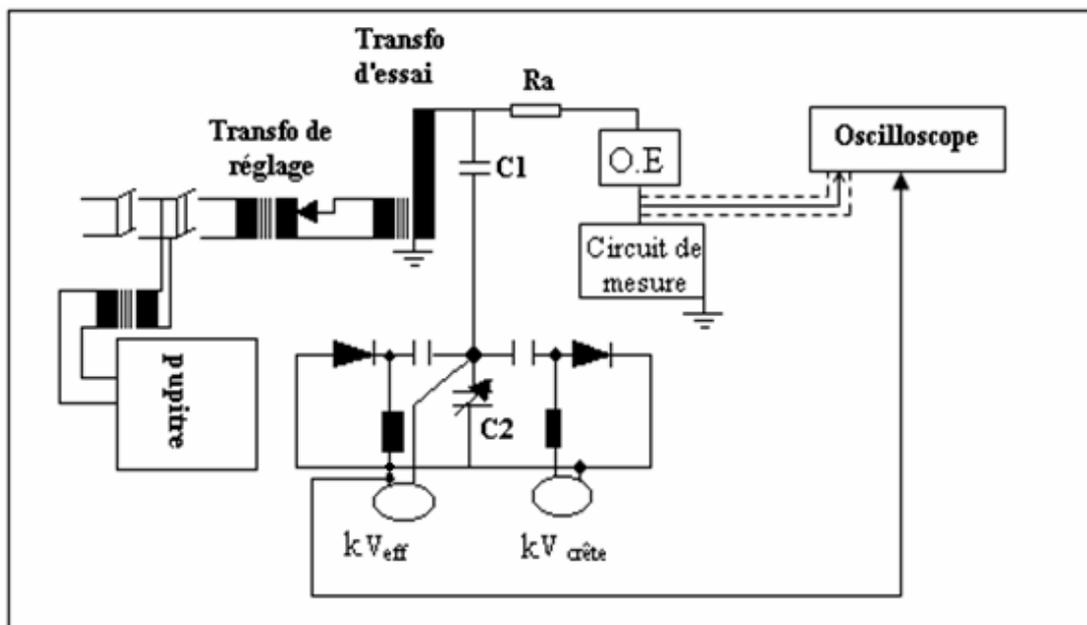


Figure III.1 : Schéma du circuit d'essais

### III.2.1 Station d'essai

La station d'essais comprend les organes suivants :

#### ❖ Un transformateur de réglage

Il permet le réglage de la tension à la sortie du transformateur d'essai de zéro à la pleine tension indépendamment de la charge et d'une façon continue. Le réglage peut se faire, soit manuellement (à l'aide d'un volant), soit à l'aide d'un moteur dont le fonctionnement est commandé à partir du pupitre. Ses caractéristiques sont :

- Tension primaire nominale :  $U_{1n} = 220 \text{ V}$  (50 Hz).
- Tension secondaire réglable de 0 à 500 V.
- Puissance apparente nominale :  $S_n = 50 \text{ kVA}$ .

#### ❖ Un transformateur d'essais

Il délivre la tension appliquée à l'objet d'essai. Il est du type monophasé, ces caractéristiques sont les suivantes :

- Tension primaire  $U_{1n} = 0.5 \text{ kV}$  (50Hz).
- Tension secondaire nominale :  $U_n = 300 \text{ kV}$ .
- Puissance apparente nominale :  $S_n = 50 \text{ kVA}$ .
- Tension de court-circuit :  $U_{cc} = 5.46 \%$ .
- Résistance d'amortissement :  $R_a \approx 30 \Omega/\text{kV}$  de tension d'essais, la résistance de l'enroulement B.T :  $r_1 = 0.0365 \Omega$ , celle de l'enroulement H.T :  $4893 \Omega$ .

#### ❖ Un diviseur capacitif de tension

Il est alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés sur le pupitre de commande. Le diviseur capacitif est formé d'une capacité H.T ( $C_1 = 400\text{pF}$ ), en série avec une capacité  $C_2$  variable permettant de réduire de 1/1000 la tension d'essai ( $U_{lue} = U(C_2) = U(C_1)/1000$ ). Ce branchement permet d'obtenir les calibres de mesures : 75 kV, 150 kV et 300 kV.

La tension recueillie aux bornes de la capacité variable est mesurée à l'aide d'un voltmètre électrostatique donnant la valeur efficace de la tension, et d'un galvanomètre échelonné en  $kV_{\max}$  permettant la lecture de la valeur de crête de tension.

#### ❖ Un pupitre de commande

Celui-ci est alimenté en 220 V indépendamment du régulateur de tension et du transformateur d'essai à travers un transformateur d'isolement. On y trouve les appareils de mesure permettant la lecture du courant au secondaire du transformateur de réglage, ainsi que des tensions de crête et efficace au secondaire du transformateur d'essai.

#### ❖ Des appareils annexes de protection

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essai (la cage de faraday). Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250 A. Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

### **III.2.2 Cellule d'essais**

La cellule d'essais (Figure III.2) est une cuve de 50 cm de longueur, 50 cm de largeur, 70 cm de hauteur. Ses parois sont en plexiglas d'épaisseur 1.5 cm. La cellule contient 175 L d'huile de transformateur et un système d'électrode pointe-plan, monté horizontalement dans la cuve. Cette dernière est posée sur une table en bois à 80.6 cm du sol.

Le système d'électrodes est constitué d'une pointe et d'un plan. L'électrode pointe de forme conique est en laiton de rayon de courbure égal à 6 mm. Elle est montée sur une tige mobile en acier. L'électrode plane est un disque en acier de 35 cm de diamètre. La distance inter-électrodes est ajustable et peut varier de 0 cm à 13 cm.



**Figure III.2** : Cellule d'essais

### **III.2.3 Les Paramètres utilisés**

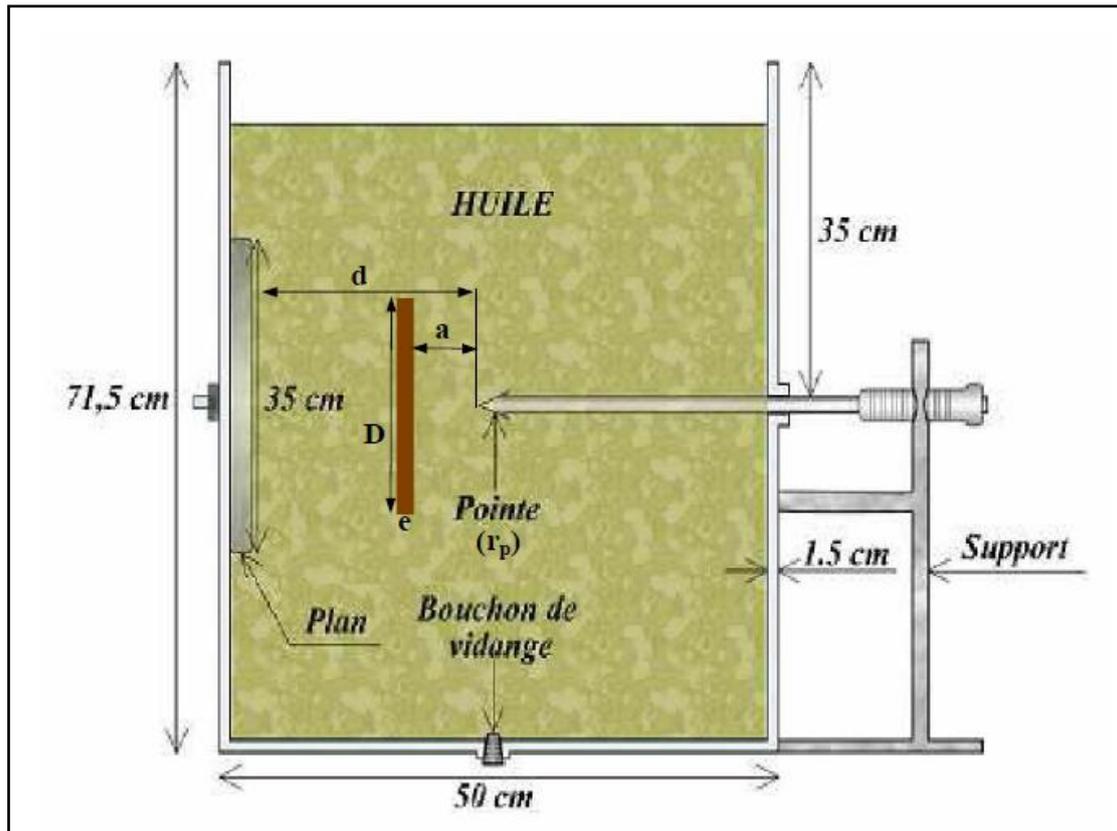
$d$  : la distance inter électrodes.

$a$  : la distance qui sépare la barrière de l'électrode pointe.

$D$  : le diamètre de la barrière

$a/d$  : la position relative de la barrière.

$e$  : l'épaisseur de la barrière.



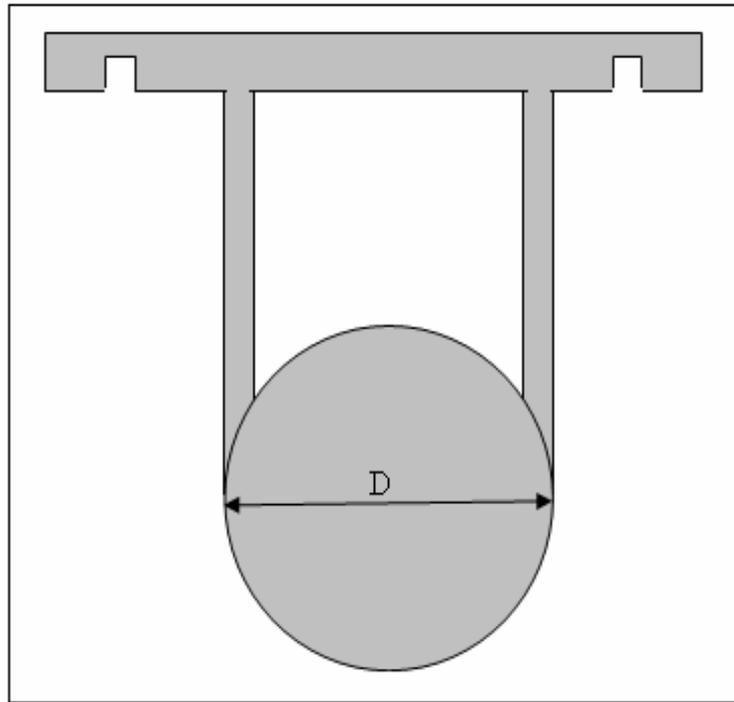
**Figure III.3** : Schéma de la cellule d'essais

La barrière (Figure III.4) est un isolant solide de forme circulaire, de différents diamètres (10 cm et 20 cm) et de différentes épaisseurs (2 mm et 4 mm). Elle est réalisée de telle sorte qu'elle soit maintenue verticalement et déplacée sur les parois du bac, pour obtenir les différentes positions de la barrière entre les deux électrodes.

Deux types de matériaux sont utilisés pour les barrières: la bakélite et le presspahn. Les caractéristiques de ces matériaux sont données dans le tableau **III.1**.

Matériau isolant	Permittivité relative	Rigidité diélectrique kV/mm
L'huile minérale	2.12	25
Bakélite	5	30
Presspahn	3	10

**Tableau III.1** Propriétés diélectriques des matériaux utilisés



**Figure III.4 :** Forme de la barrière utilisée

#### **III.2.4 Présentation de l'huile**

L'huile minérale dénommée « Borack 22 » est de type naphénique. Celle-ci obéit à des conditions de stockage rigoureuses dans des fûts étanches, en vu de sa protection de la dégradation et de l'humidité environnante.

#### **III.2.5 Circuits de mesure**

La mesure de la charge de préclaquage a été effectuée à travers une capacité de  $0.02 \mu\text{F}$  connectée en série avec l'objet d'essai grâce à un oscilloscope à mémoire (TECTRONIX TDS 3052 B) de fréquence d'échantillonnage de 500 MHz.

Afin de recueillir totalement le signal de la tension aux bornes de la capacité, nous avons utilisé un adaptateur à l'entrée de l'oscilloscope.

Pour éviter l'influence du champ électrique, qui peut introduire des parasites dans le signal recueilli, la capacité a été introduite dans une boîte métallique en aluminium mise à la terre, formant ainsi un écran (le champ à l'intérieur de la boîte étant nul).

La mesure des tensions de claquage a été effectuée dans les travaux antérieurs [4] à l'aide d'un voltmètre électrostatique. Cette mesure permet de déterminer les paliers de

tensions (inférieur à 50% de  $U_{\text{claquage}}$  ) à appliquer pour l'enregistrement de la charge de préclaquage.

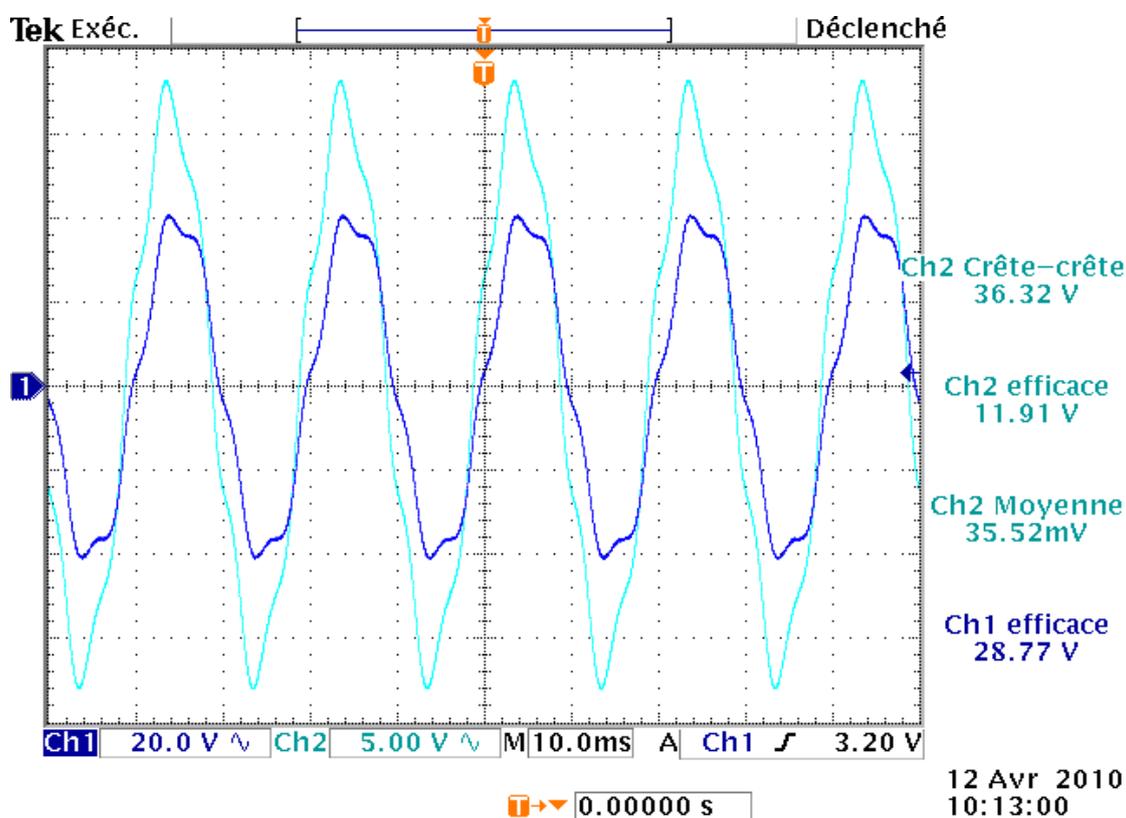
Avant d'effectuer les mesures, les barrières isolantes sont bien nettoyées par l'alcool puis insérées entre les deux électrodes pour différentes positions et distances inter-électrodes.

### III.2.6 Forme des signaux obtenus

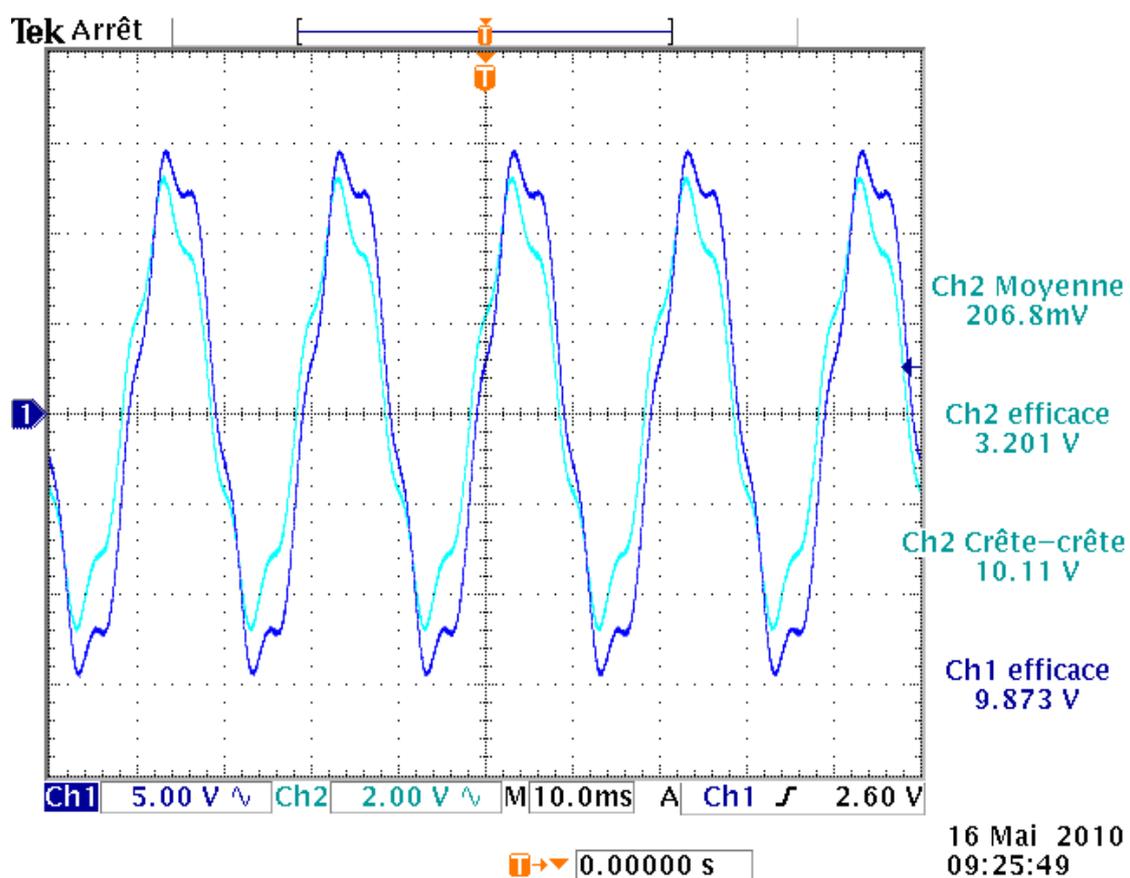
L'oscilloscope numérique de marque TECTRONIX TDS 3052 B 500MHz nous a permis d'obtenir les informations voulues sur le signal de la charge.

La démarche de mesure est de prendre pour chaque niveau de tension dans chaque essai six fois la valeur moyenne, la valeur efficace, la valeur crête-crête du signal de la charge et six fois la valeur efficace de la tension appliquée, après, nous enregistrons une seule fois l'image donnée par l'oscilloscope.

Dans les figures III.4 et III.5 nous donnons la forme des signaux obtenus pendant les essais.



**Figure III.5:** Formes des signaux de tension appliquée (en bleu foncée) et de la charge (en bleu clair) pour un système sans barrière,  $d=8\text{cm}$  et  $U=10\text{kV}$ .



**Figure III.4:** Formes des signaux de tension appliquée (en bleu foncée) et de la charge (en bleu clair) pour une barrière en bakélite  $D=10\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $d=12\text{cm}$ ,  $U=10\text{kV}$  et  $a/d=0.4$

# *Chapitre IV*

*Résultats et Interprétations*

## **IV.1 Introduction**

Le travail que nous présentons dans ce chapitre fait suite à un travail déjà entamé au niveau de notre laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique.

Les travaux antérieurs [4, 5, 10] ont porté essentiellement sur l'étude du comportement de l'huile de transformateur dans un système pointe-plan avec et sans barrière, ainsi que l'effet de l'insertion de la barrière sur la tension de claquage et sur le courant de préclaquage. Les caractéristiques de ces derniers ont permis d'établir la variation de l'impédance apparente du système.

Afin de mieux comprendre l'influence des barrières isolantes dans l'huile de transformateur et faire un choix judicieux, il est nécessaire d'analyser les phénomènes physiques liés à la phase de préclaquage et de claquage selon la géométrie du système et les paramètres liés à la barrière isolante.

Pour compléter les travaux antérieurs, nous avons effectué des essais expérimentaux pour la mesure de la charge apparente de préclaquage dans un système pointe-plan avec et sans barrière.

Nous présentons dans ce chapitre les résultats et les interprétations concernant l'influence de la barrière sur la charge apparente dans l'huile. Pour cela deux types de matériaux de barrières sont étudiés (la bakélite et le presspahn) et de nombreux paramètres électro-géométriques sont pris en considération.

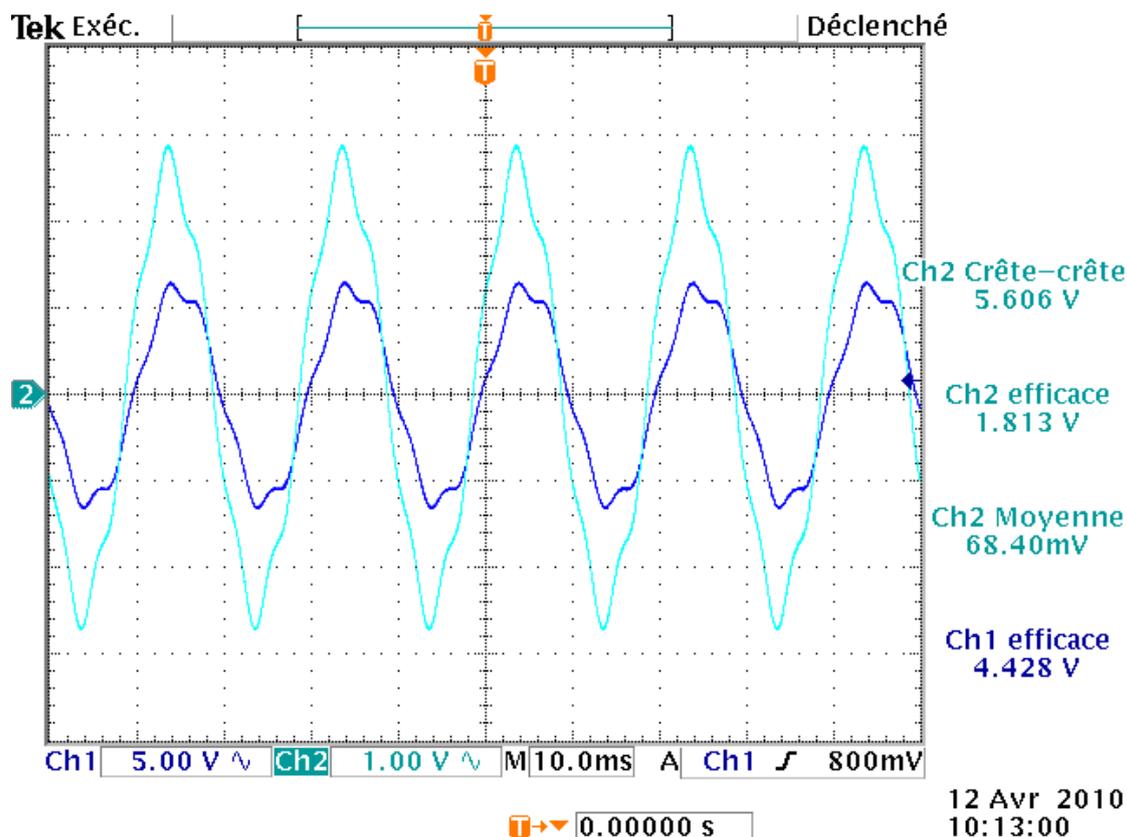
Nous commençons par la présentation des résultats concernant le système pointe-plan sans barrière isolante, ensuite nous abordons l'étude de l'influence des différents paramètres de l'écran isolant tels que sa position, son diamètre, son épaisseur et sa nature.

## IV.2 Essais sans barrière

Dans cette partie d'essais, nous nous sommes intéressés à déterminer la charge apparente dans l'huile pour un système pointe-plan sans l'existence d'une barrière isolante. Ces essais sont effectués pour différentes distances inter-électrodes (4, 6, 8, 10 et 12cm)

Pour la mesure de cette charge, nous avons appliqué 5 à 8 paliers de tension selon la distance inter-électrodes, de sorte que le maximum de la tension appliquée ne dépasse pas 50% de la tension de claquage.

Ensuite nous avons relevé la valeur de la charge pour les différentes tensions appliquées. nous remarquons alors que pour un même niveau de tension le signal de la charge est périodique et en phase avec le signal de la tension appliquée, ce qui confirme bien le caractère capacitif du système. Nous présentons donc sur les figures ci-dessous quelques images des signaux obtenus par l'intermédiaire de l'oscilloscope pour une distance inter-électrodes de 8 cm en faisant varier la tension appliquée.



**Figure IV.1:** Formes des signaux de la tension appliquée (en bleu foncée) et de la charge (en bleu clair) pour  $d=8\text{cm}$  et  $U=5\text{kV}$ .

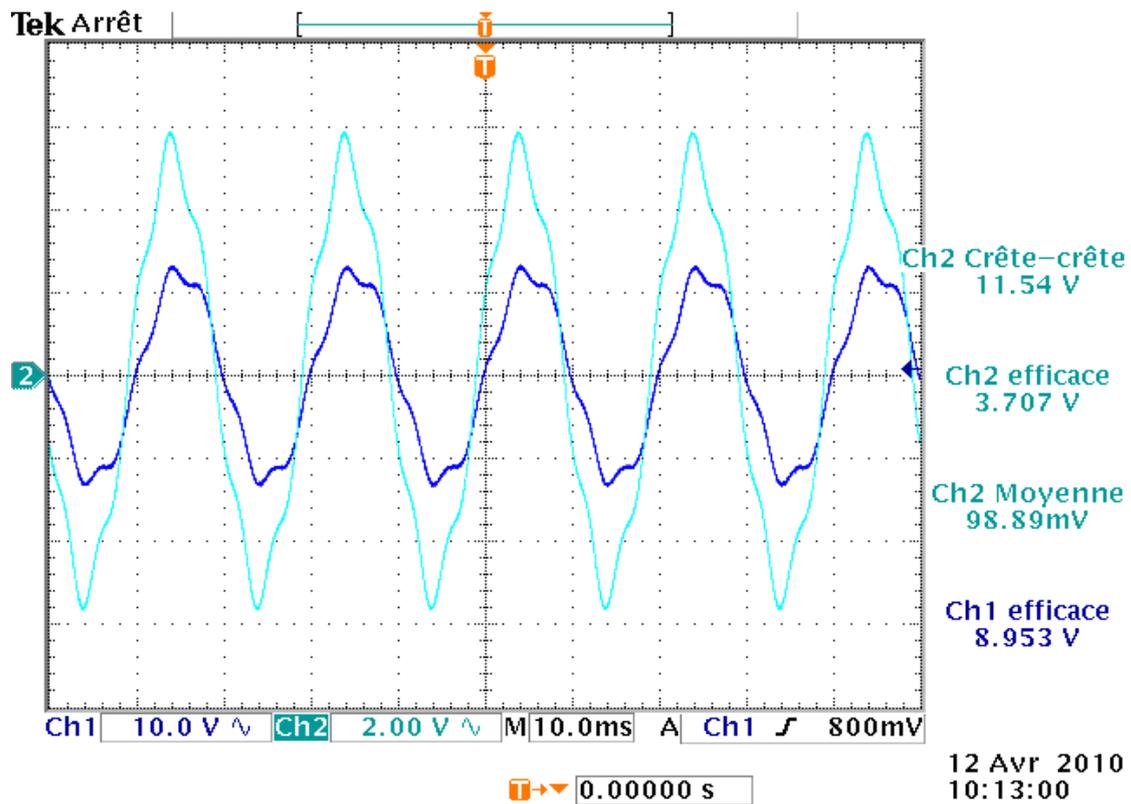


Figure IV.2: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour  $d=8\text{cm}$  et  $U=10\text{kV}$ .

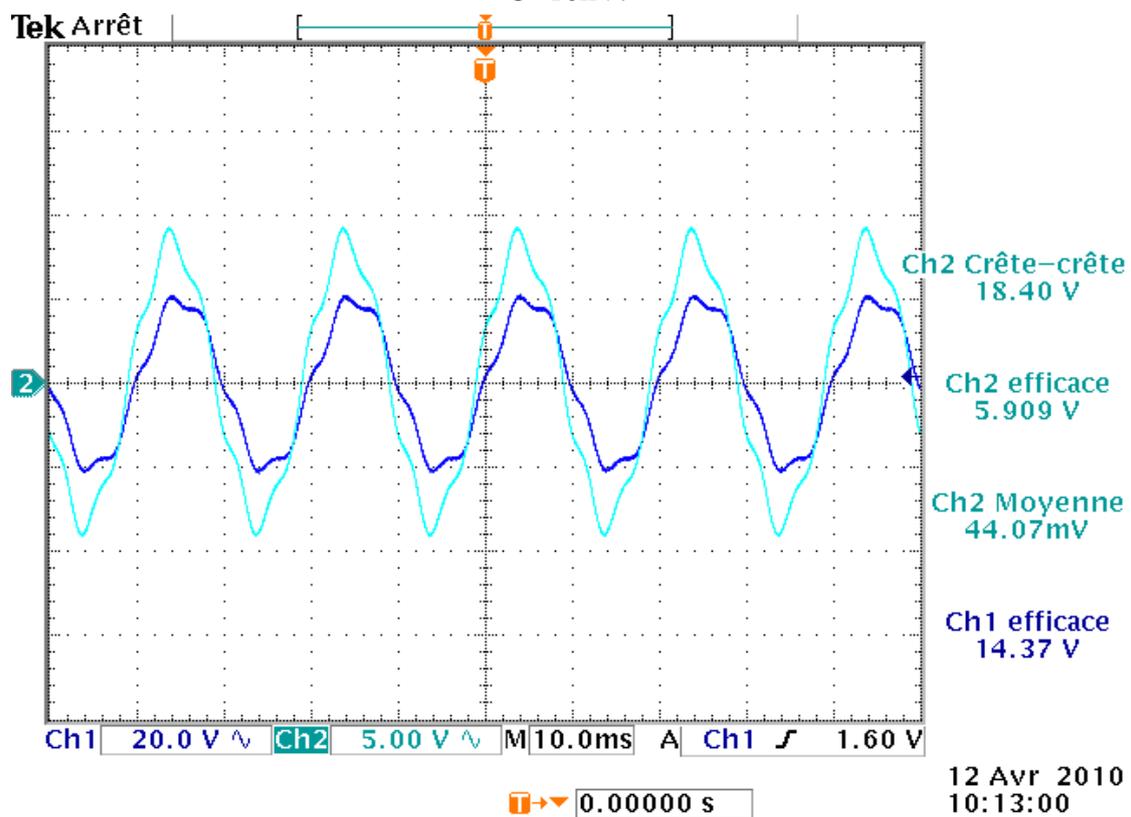


Figure IV.3: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour  $d=8\text{cm}$  et  $U=15\text{kV}$ .

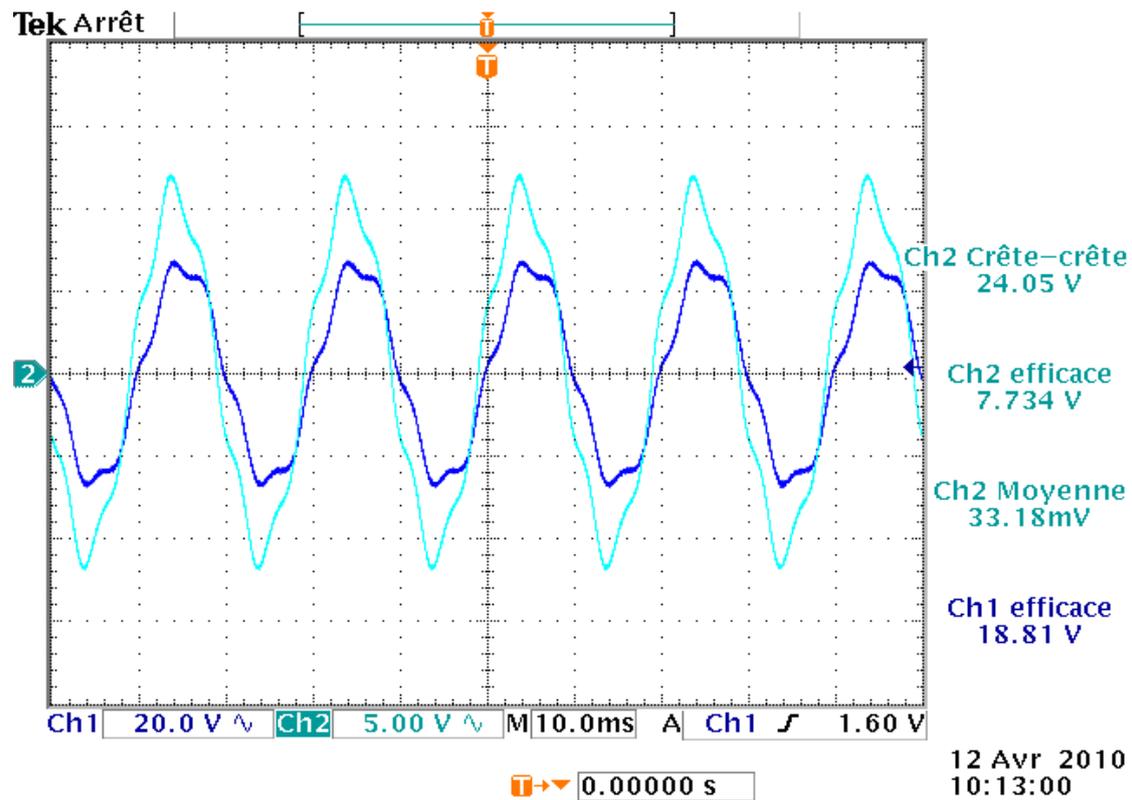


Figure IV.4: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour  $d=8\text{cm}$  et  $U=20\text{kV}$ .

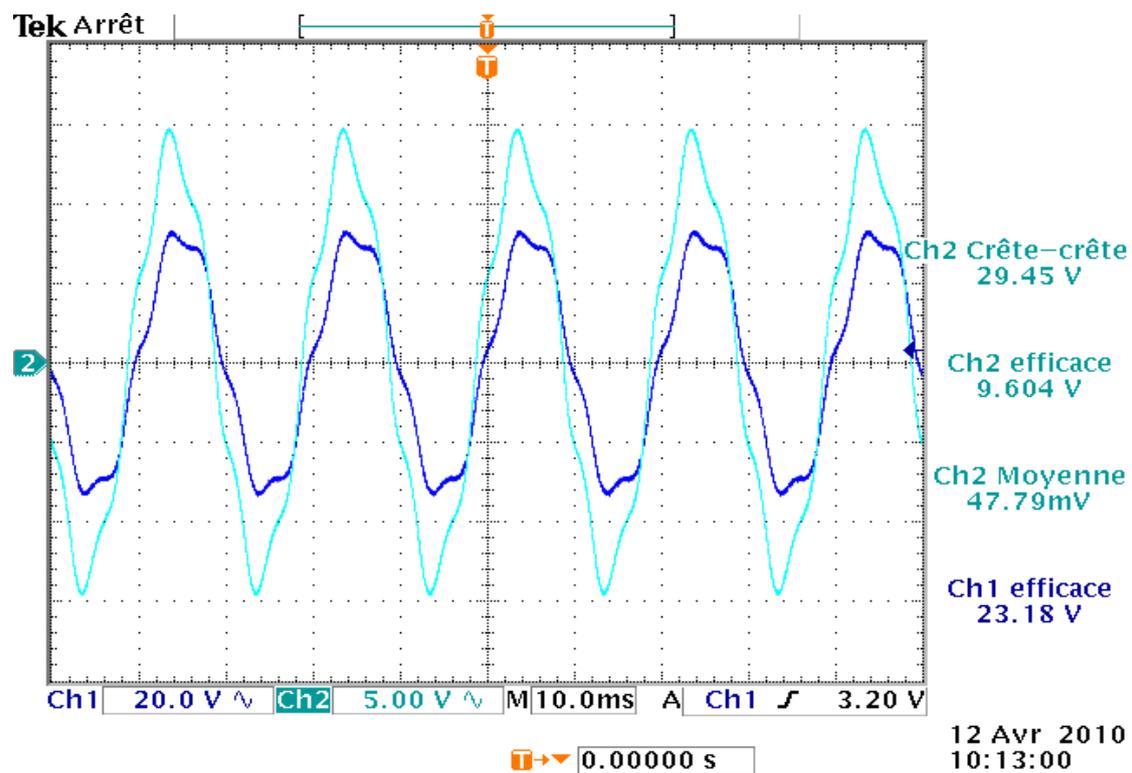


Figure IV.5: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour  $d=8\text{cm}$  et  $U=25\text{kV}$ .

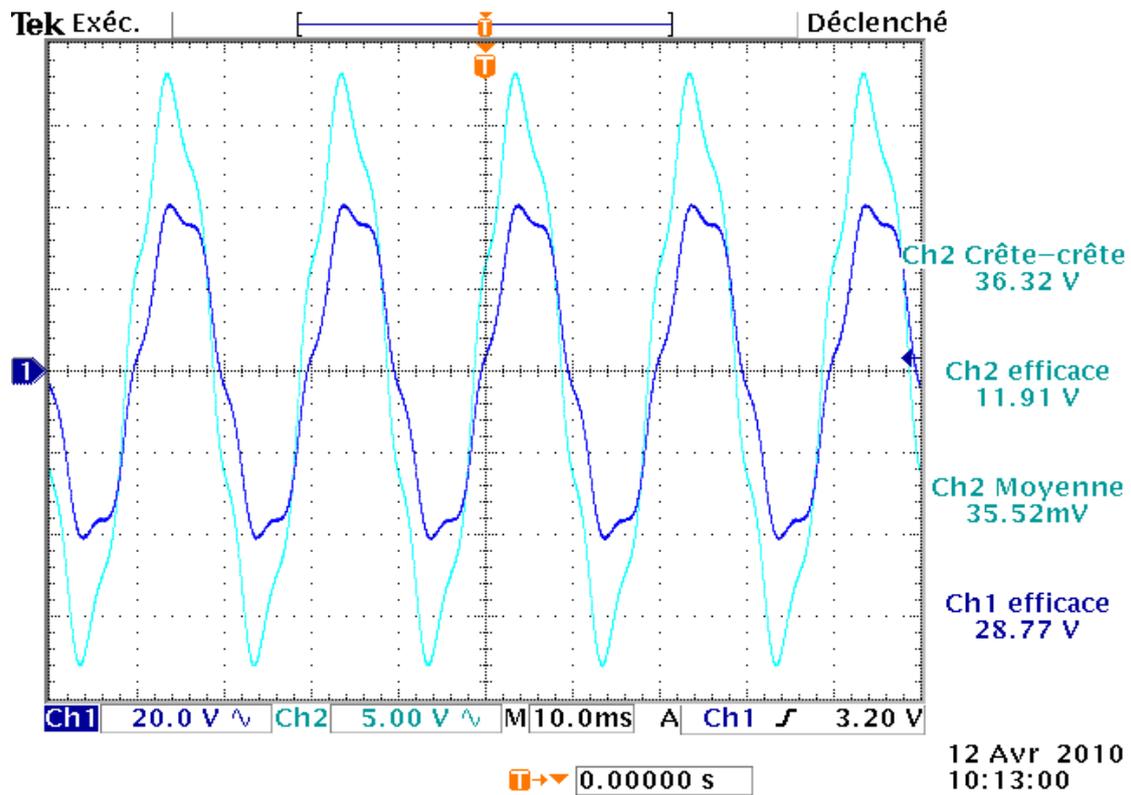


Figure IV.6: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour  $d=8\text{cm}$  et  $U=30\text{kV}$ .

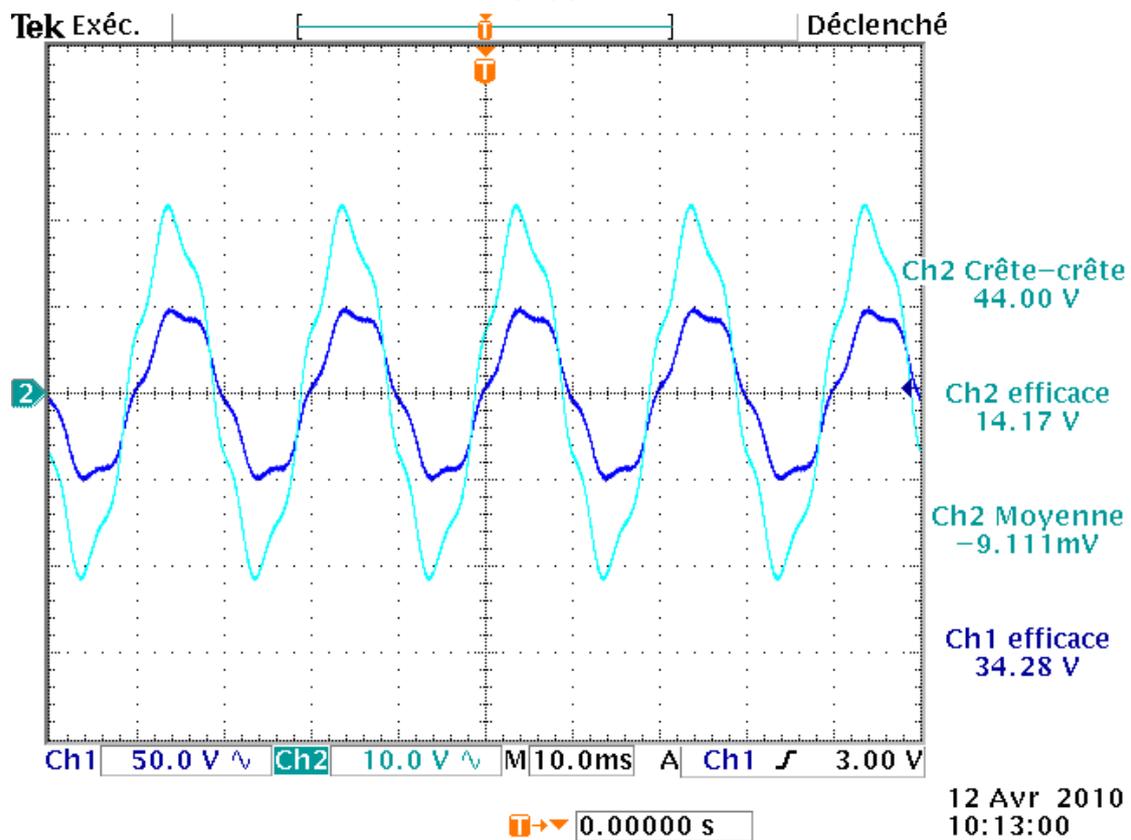


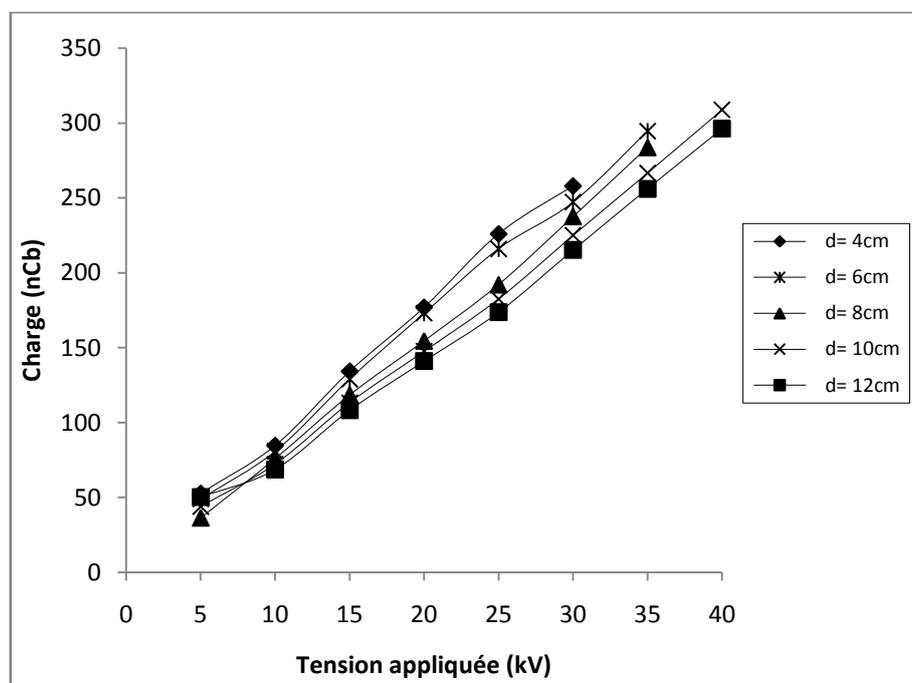
Figure IV.7: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour  $d=8\text{cm}$  et  $U=35\text{kV}$ .

Il ressort de ces figures que l'amplitude et la valeur efficace du signal de la charge augmente avec la tension appliquée, c'est ce que nous allons détaillé dans la partie suivante.

#### IV.2.1 Effet de la tension appliquée sur la charge apparente de préclaquage

Pour étudier l'effet de la tension appliquée sur la charge apparente de préclaquage du système pointe-plan sans barrière, nous avons effectué des essais pour différents niveaux de tension. Ces essais nous ont conduits à obtenir les courbes données sur la figure IV.8 qui représente la variation de la valeur efficace de la charge de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes (4, 6, 8, 10 et 12cm).

Nous constatons que l'augmentation de la tension appliquée entraîne un accroissement presque linéaire de la charge de préclaquage, donc, d'après la relation  $Q=C.U$  (tel que:  $Q$  représente la charge,  $C$  est la capacité du système et  $U$  est la tension appliquée) nous pouvons dire que la capacité du système, pour une distance inter-électrodes donnée, est presque constante.



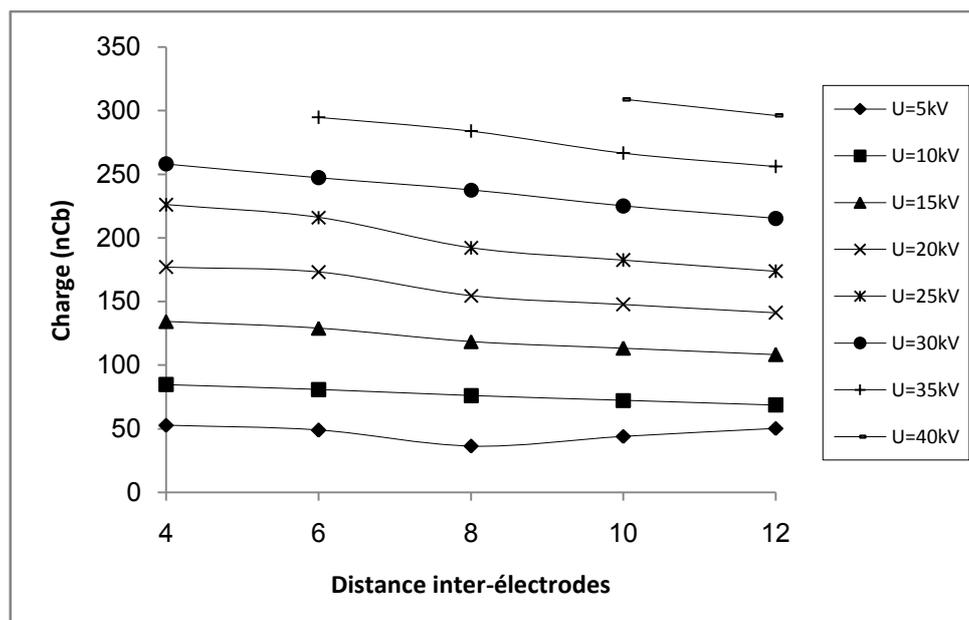
**Figure IV.8:** Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan sans barrière pour différentes distances inter-électrodes.

### IV.2.2 Effet de la distance inter-électrodes sur la charge apparente de préclaquage

En faisant varier la distance inter-électrodes de 4 à 12cm avec un pas de 2cm et en prenant la moyenne de six valeurs de la charge pour chaque niveau de tension et pour chaque distance inter-électrodes, nous avons obtenu les résultats illustrés dans la figure IV.9.

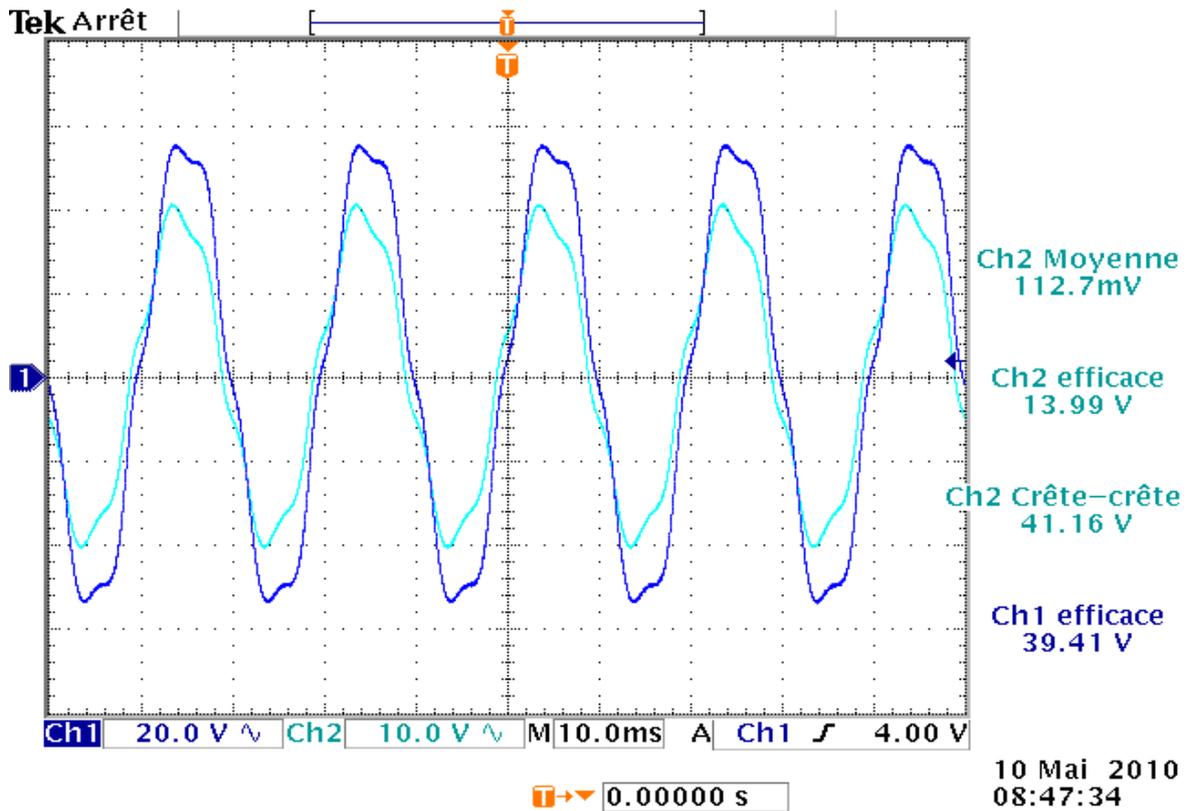
Nous constatons que la charge de préclaquage augmente légèrement avec la diminution de la distance inter-électrodes pour les différents niveaux de tensions, cela peut être dû à la réduction du champ appliqué à la pointe suite à l'augmentation de l'écart inter-électrodes. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [10].

Nous constatons aussi que l'effet de la distance inter-électrodes sur la charge de préclaquage devient plus visible pour les niveaux de tension relativement élevés.

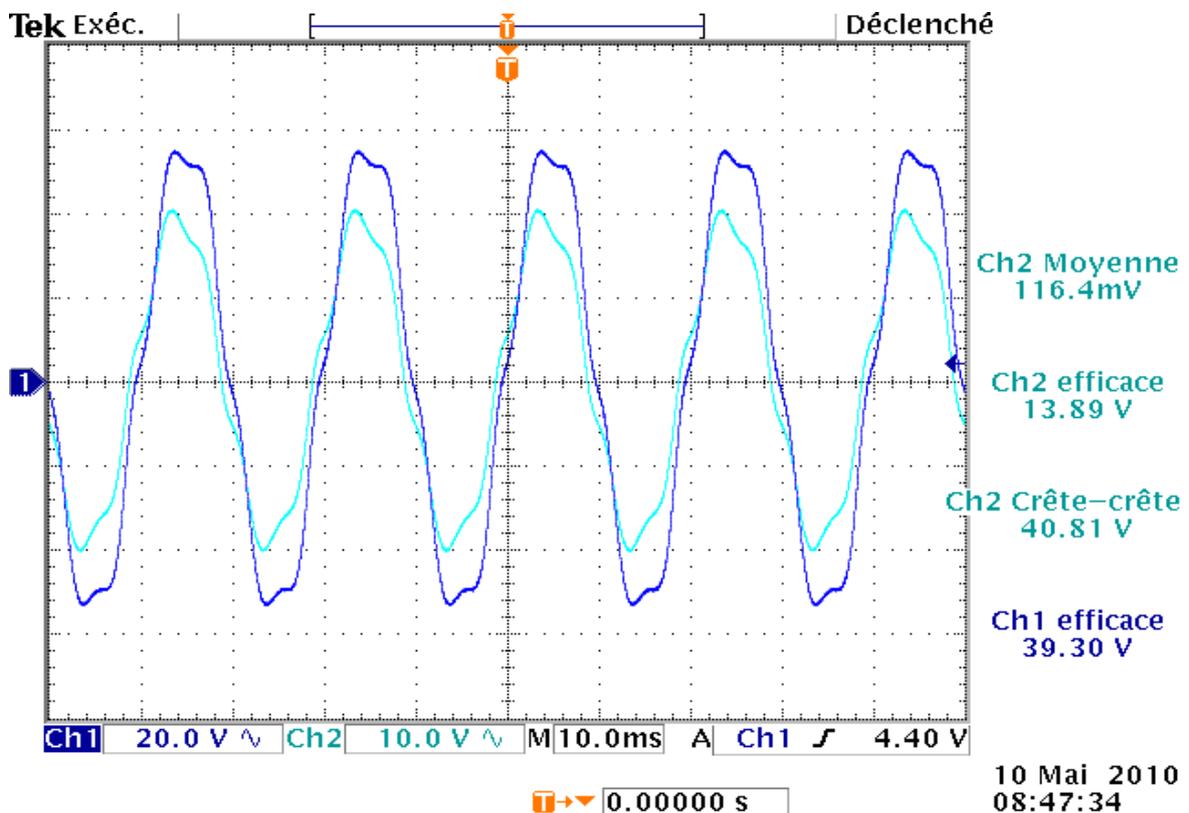


**Figure IV.9:** Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan sans barrière pour différents niveaux de tension





**Figure IV.11:** Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn:  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $U=40\text{kV}$  et  $a/d = 0,8$ .



**Figure IV.12:** Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn:  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $U=40\text{kV}$  et  $a/d = 0,6$ .

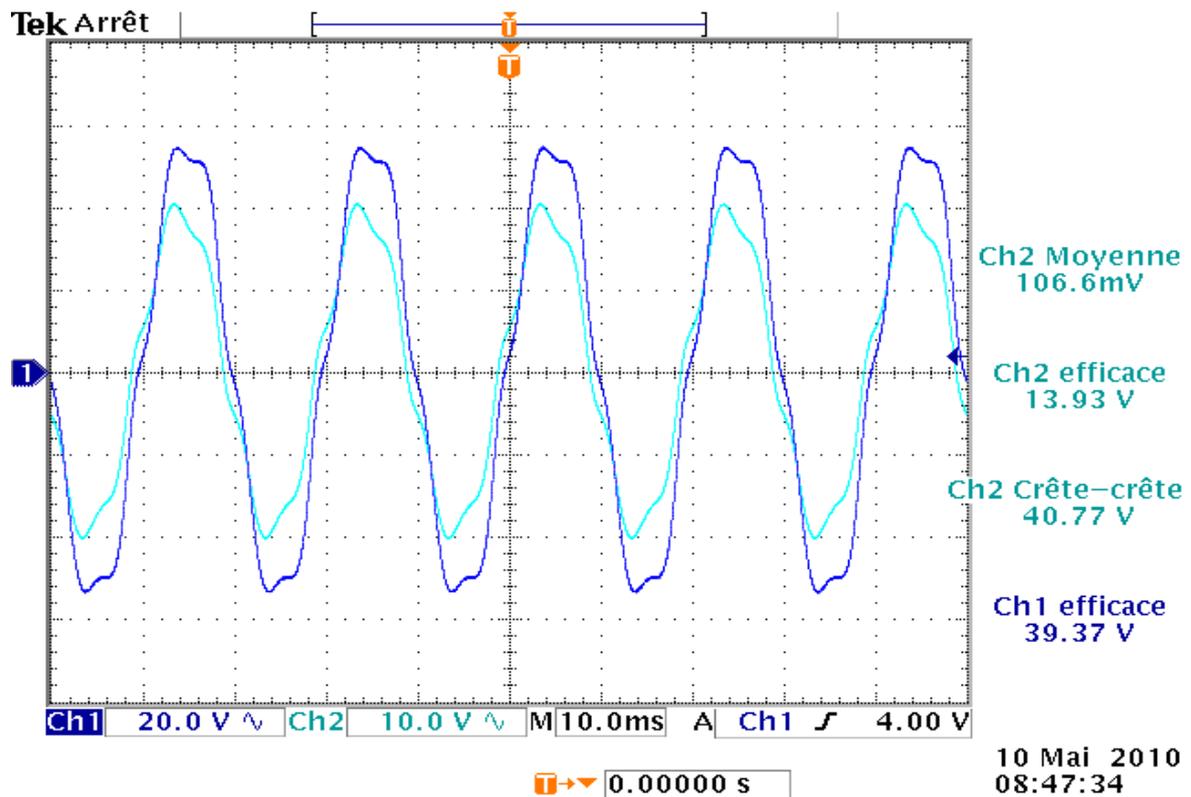


Figure IV.13: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn:  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $U=40\text{kV}$  et  $a/d$  0,4.

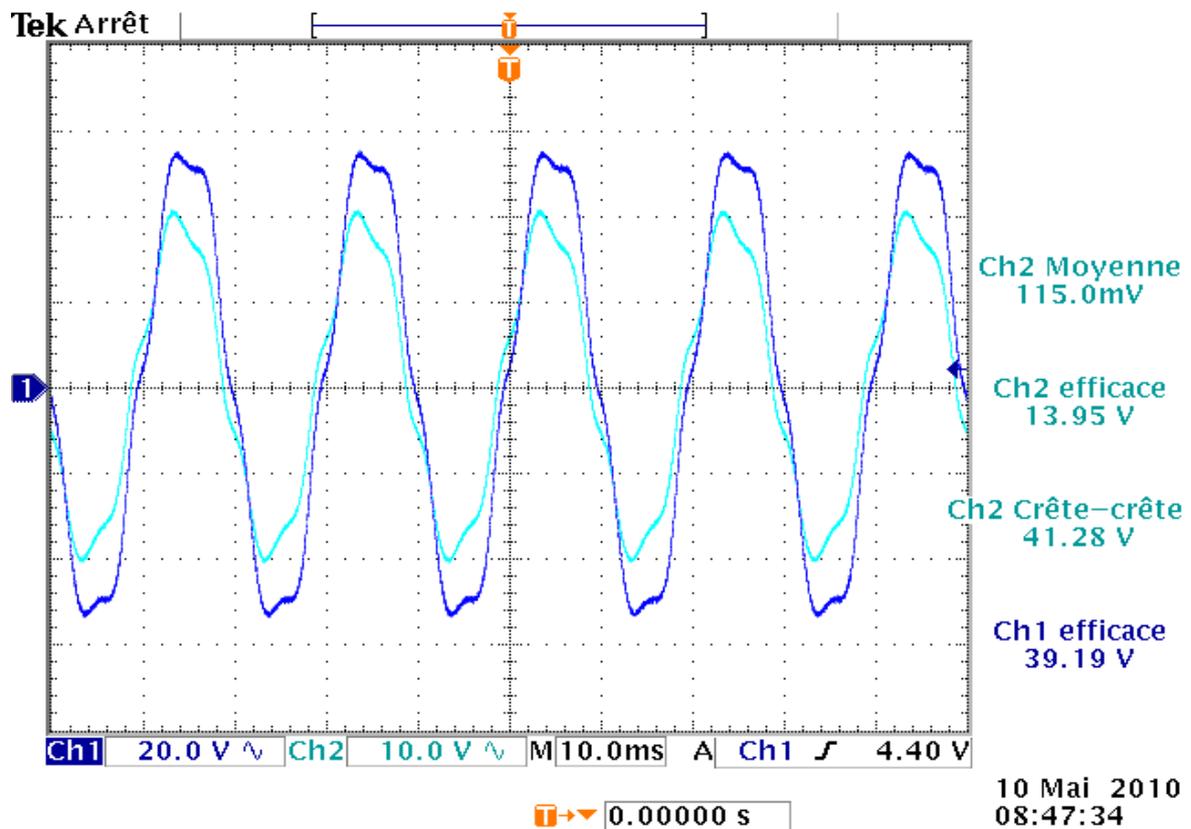
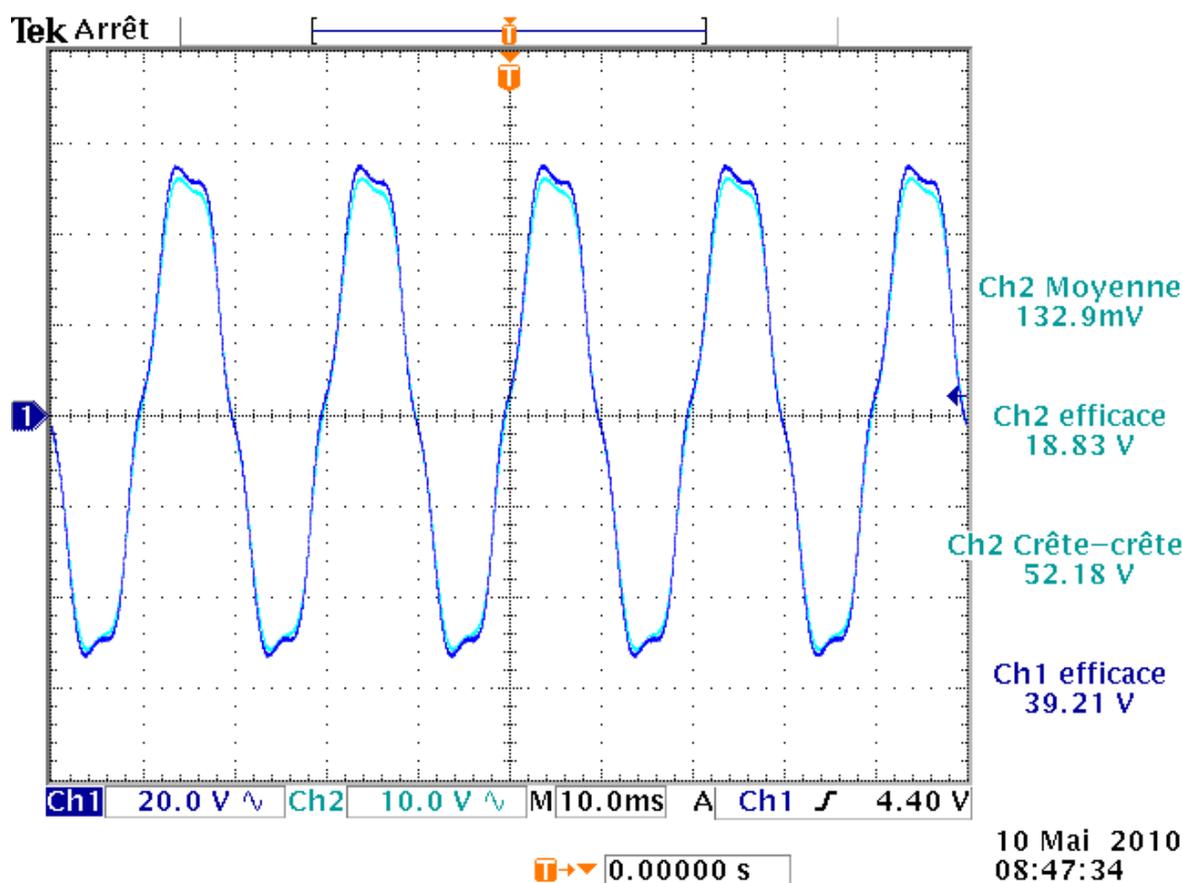


Figure IV.14: Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn:  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $U=40\text{kV}$  et  $a/d = 0,2$ .



**Figure IV.15:** Formes des signaux de tension appliquée et de la charge pour une barrière en presspahn:  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $U=40\text{kV}$  et  $a/d = 0$

### IV.3.1 Effet de l'insertion de la barrière

Pour analyser l'effet de l'insertion de la barrière et son efficacité, nous avons d'abord effectué des essais en l'absence de la barrière ensuite en sa présence.

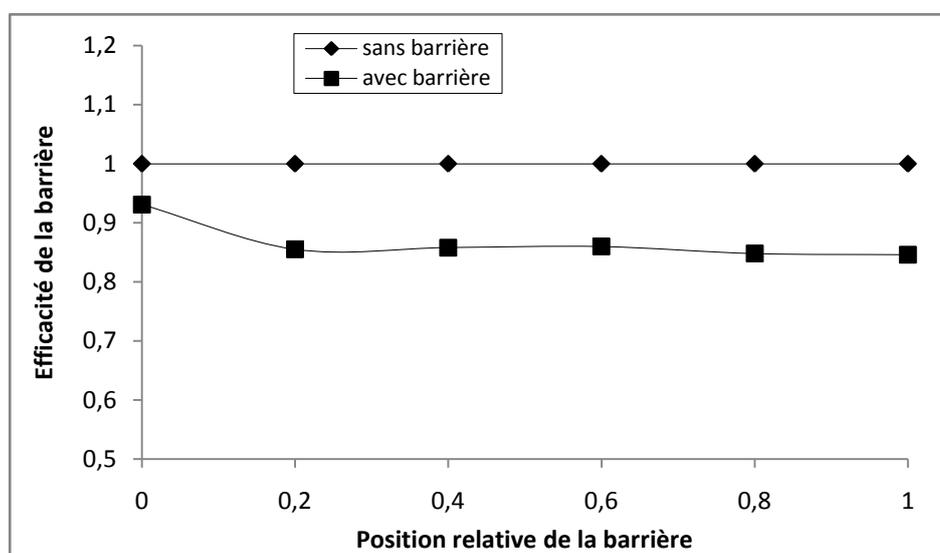
Sur les figures (IV.16 à IV.23) sont représentées les caractéristiques de l'efficacité en charge de la barrière en fonction de sa position relative.

Nous définissons l'efficacité en charge de la barrière comme étant le rapport de la charge de préclaquage du système pointe-plan avec barrière sur celle du système pointe-plan sans barrière.

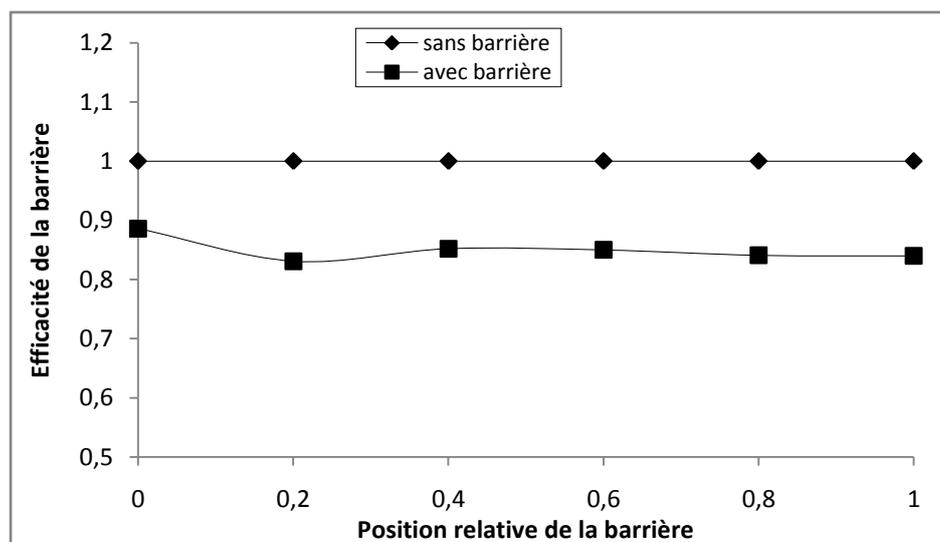
Il ressort de ces caractéristiques que la quantité de charge est réduite lorsque la barrière est introduite dans l'intervalle d'huile pointe plan, cela est dû, d'une part, au fait que la barrière présente un obstacle géométrique, et d'autre part, la présence de la barrière crée une zone entre la barrière et le plan où le champ est uniforme.

Nous constatons aussi que pour la position  $a/d=0$ , la charge de préclaquage du système avec barrière peut être supérieure ou égale à celle du système sans barrière, cela est dû à l'accumulation de la charge sur la surface de la barrière. Cette accumulation de la charge peut modifier la distribution du champ et mener par la suite aux décharges glissantes.

Notons que ce phénomène est beaucoup plus remarquable pour les barrières en presspahn (et devient plus visible plus en augmentant le niveau de tension (figure IV.22 et IV.23) que pour les barrières en bakélite à cause de la différence de permittivité entre les deux matériaux.



**Figure IV.16:** Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position :  
 $D=10\text{cm}$ ,  $e=2\text{mm}$ ,  $d=8\text{cm}$  et  $U=5\text{kV}$ .



**Figure IV.17 :** Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position :  
 $D=10\text{cm}$ ,  $e=2\text{mm}$ ,  $d=8\text{cm}$  et  $U=35\text{kV}$ .

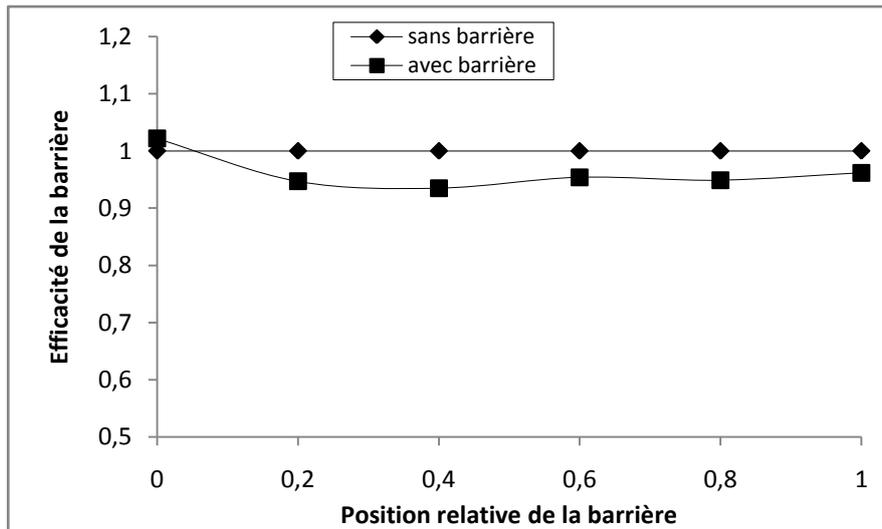


Figure IV.18: Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position: D=20cm, e=4mm, d=8cm et U=5kV

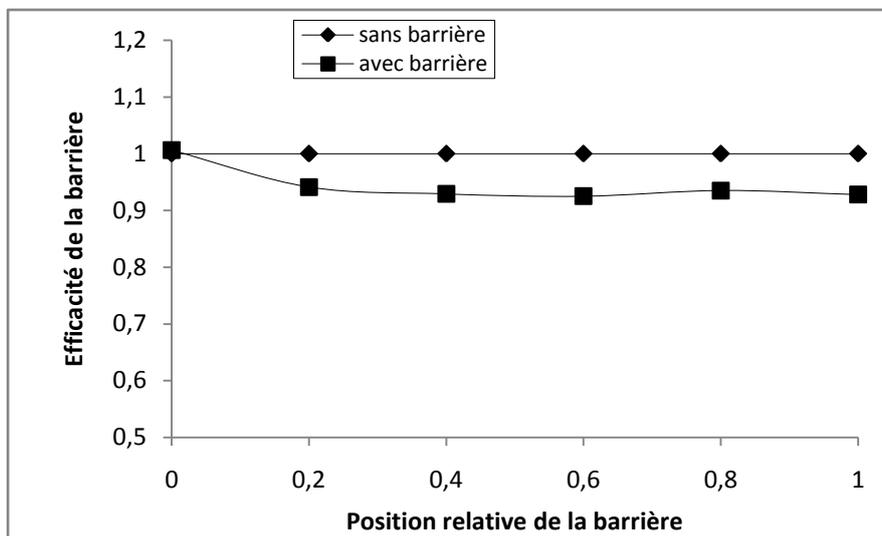


Figure IV.19: Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de sa position: D=20cm, e=4mm, d=8cm et U=35kV

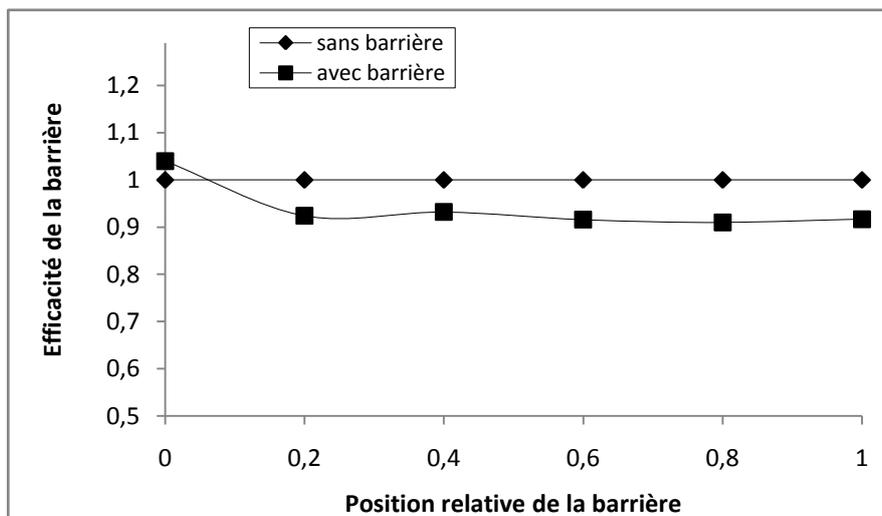


Figure IV.20: Efficacité de la barrière en Presspahn en fonction de sa position: D=10cm, e=2mm, d=8cm et U=5kV

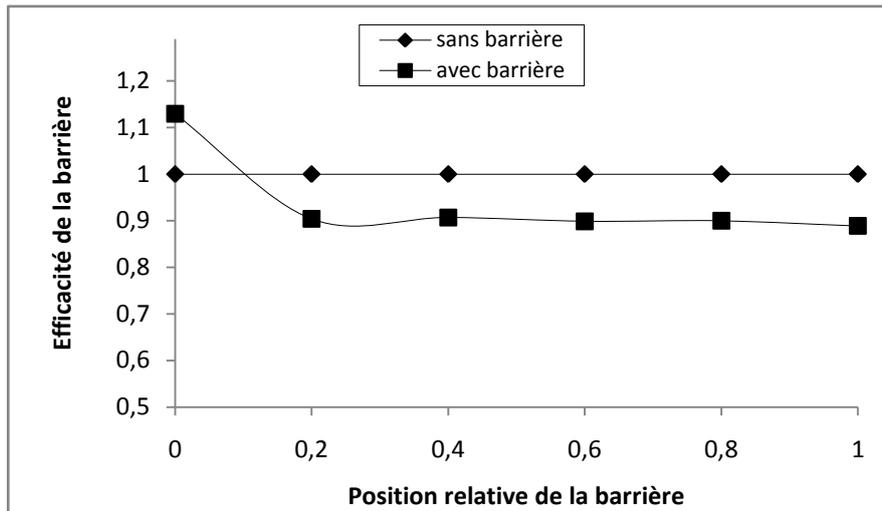


Figure IV.21: Efficacité de la barrière en Presspahn en fonction de sa position: D=10cm, e=2mm, d=8cm et U=35kV.

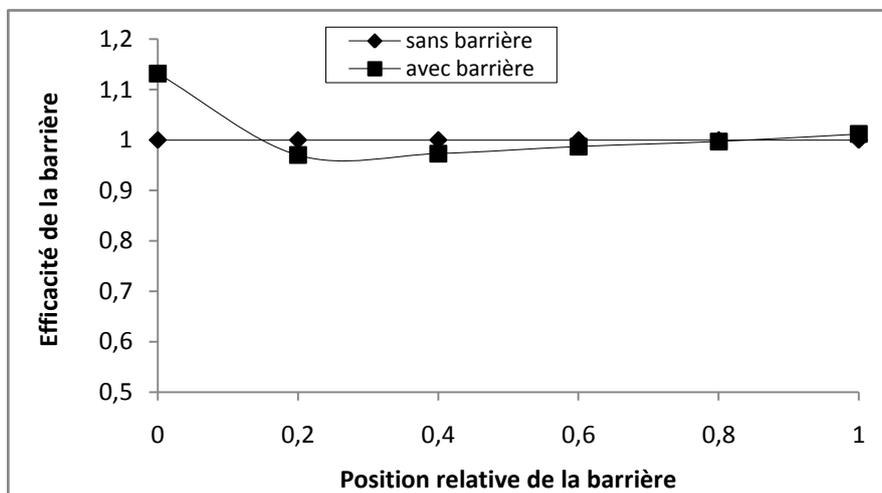


Figure IV.22: Efficacité de la barrière en Presspahn en fonction de sa position: D=20cm, e=4mm, d=8cm et U=5kV.

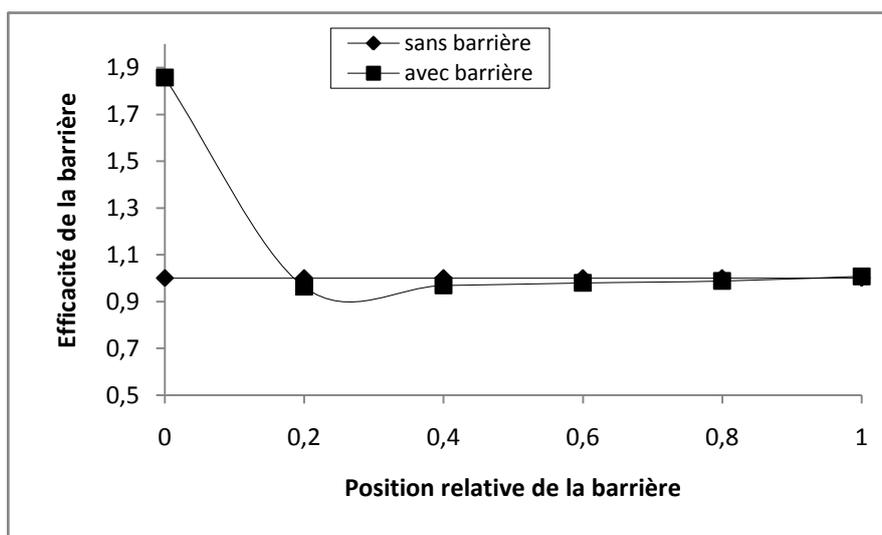
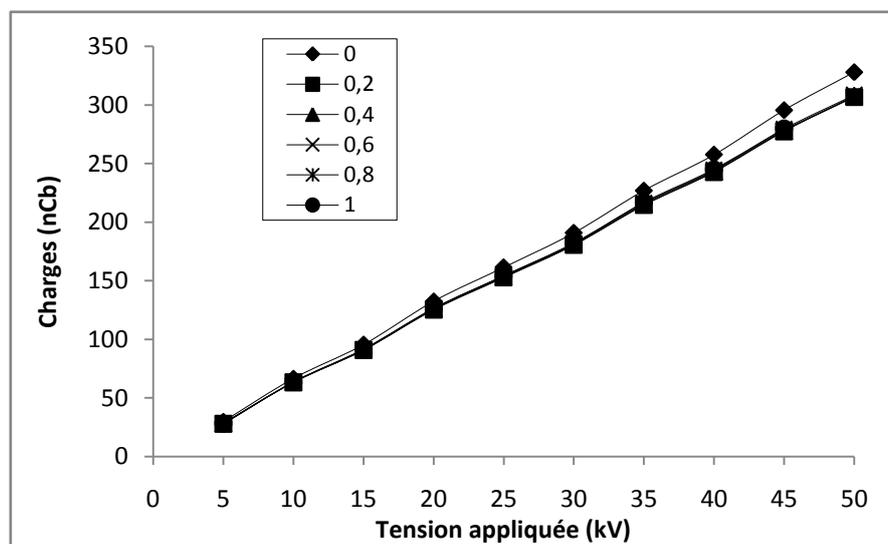


Figure IV.23: Efficacité de la barrière en Presspahn en fonction de sa position: D=20cm, e=4mm, d=8cm et U=35kV

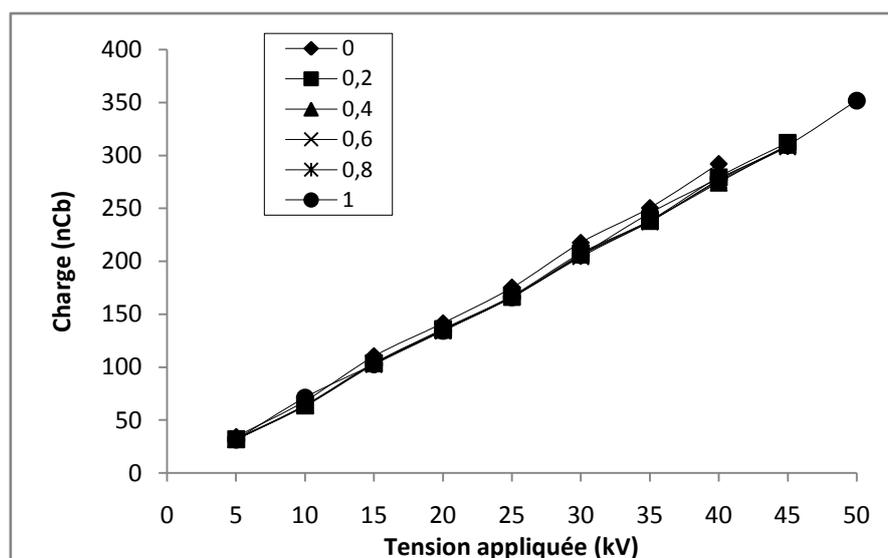
### IV.3.1 Effet de la tension appliquée

Nous présentons dans cette partie l'ensemble des courbes donnant la variation de la charge du système pointe-barrière-plan en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière, figures (IV.24 à IV.31).

En analysant ces courbes nous remarquons que pour toutes les positions de la barrière l'augmentation de la tension appliquée engendre l'accroissement de la charge électrique quelle que soit la distance inter-électrodes, la nature et les dimensions de la barrière, ce qui confirme donc que le système garde toujours son caractère capacitif.



**Figure IV.24:** Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite : D=10cm, e=2mm, d=12cm pour différentes positions.



**Figure IV.25:** Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite : D=20cm, e=4mm, d=12cm pour différentes positions

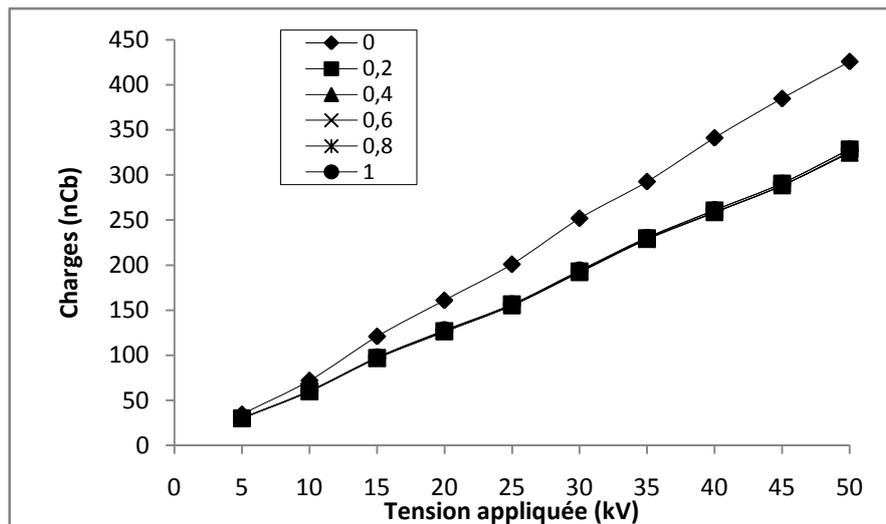


Figure IV.26: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn : D=10cm, e=2mm, d=12cm pour différentes positions.

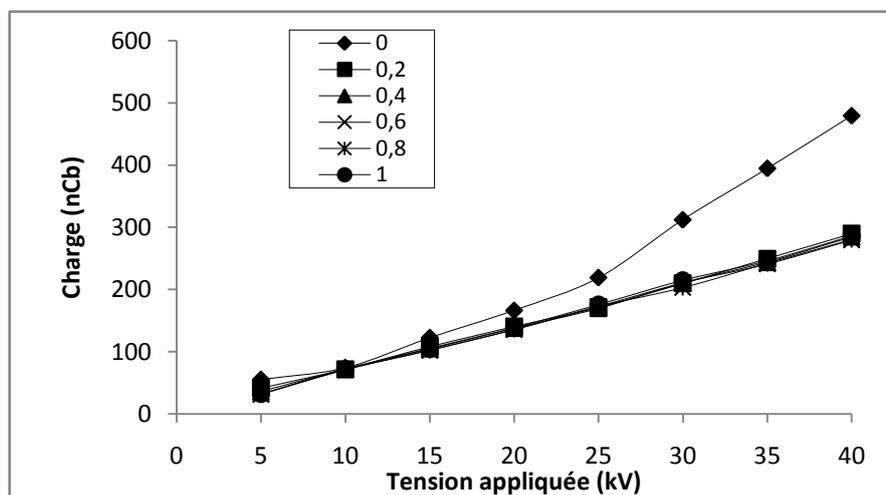


Figure IV.27: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn : D=20cm, e=4mm, d=12cm pour différentes position.

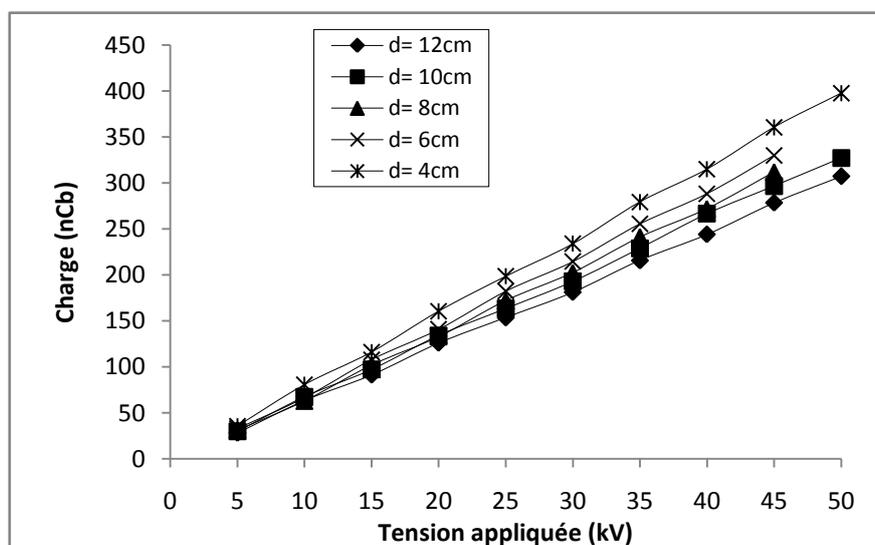


Figure IV.28: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite: D=10cm, e=2mm, a/d = 0.6

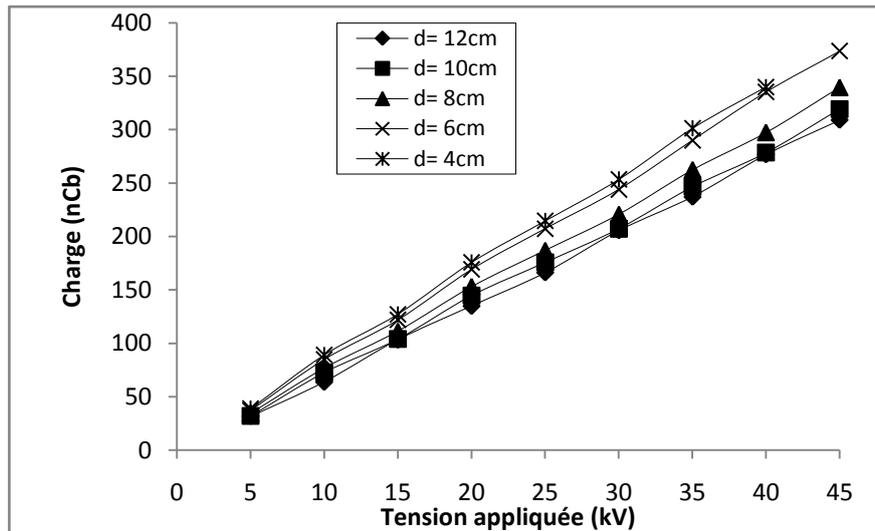


Figure IV.29: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite : D=20cm, e=4mm, a/d = 0.6

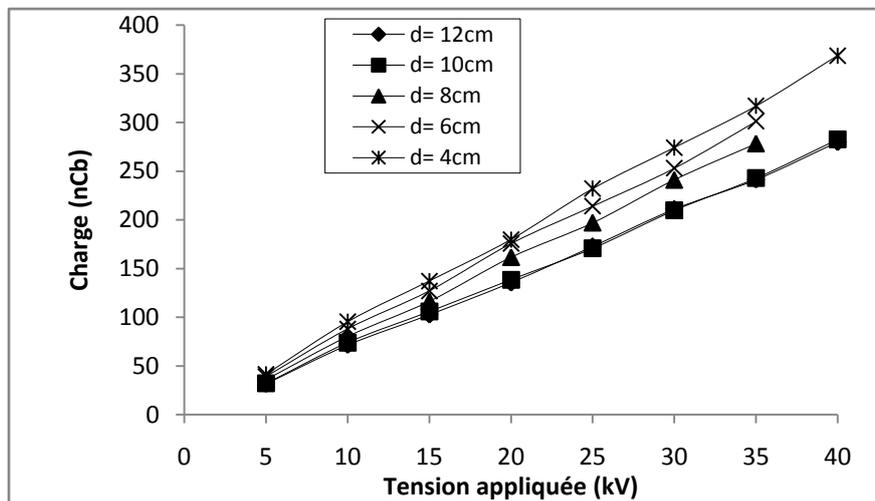


Figure IV.30: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn : D=20cm, e=4mm, a/d = 0.6

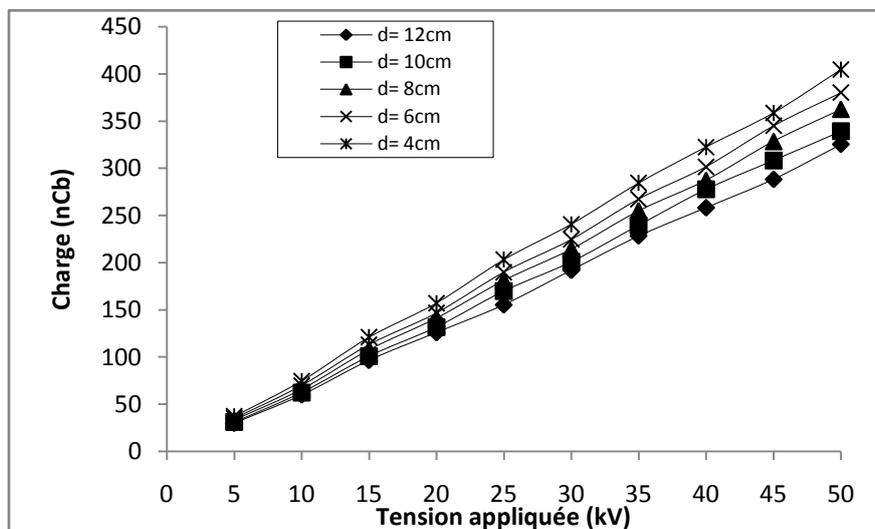


Figure IV.31: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn : D=10cm, e=2mm, a/d = 0.6

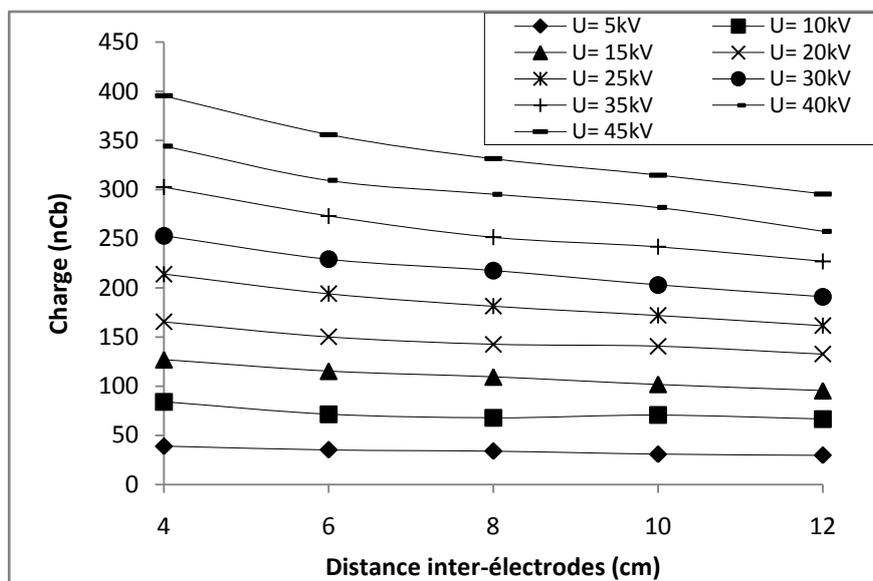
D'après les figures (IV.24 à IV.27), nous remarquons que la charge de préclaquage est plus importante pour la position  $a/d = 0$  par rapport aux autres positions, ceci peut être expliqué par l'accumulation d'une grande quantité de charge sur la surface de la barrière. Cette différence devient plus visible lorsque, nous augmentons le niveau de la tension appliquée.

Ce phénomène est plus remarquable pour les barrières en presspahn que celles en bakélite, cela est dû à la différence de permittivité entre les deux matériaux.

### IV.3.2 Effet de la distance inter-électrodes

Pour l'étude de l'effet de la distance inter-électrodes sur la charge de préclaquage du système pointe-plan avec barrière, plusieurs valeurs de distance ont été pris en considération (4, 6, 8, 10 et 12cm), et différentes positions de la barrière.

D'après les résultats obtenus (figure IV.32 et IV.37), nous remarquons, pour les niveaux de tension supérieurs à 15kV et quelle que soit la nature et les dimensions de la barrière, que la réduction de la distance inter-électrodes entraîne une légère augmentation de la charge de préclaquage, ceci est dû à l'augmentation du champ électrique au niveau de la pointe lorsque la distance inter-électrodes est plus petite. Cette augmentation devient plus visible pour les niveaux de tension relativement élevées.



**Figure IV.32:** Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite:  $D=10\text{cm}$ ,  $e=2\text{mm}$ ,  $a/d=0$ .

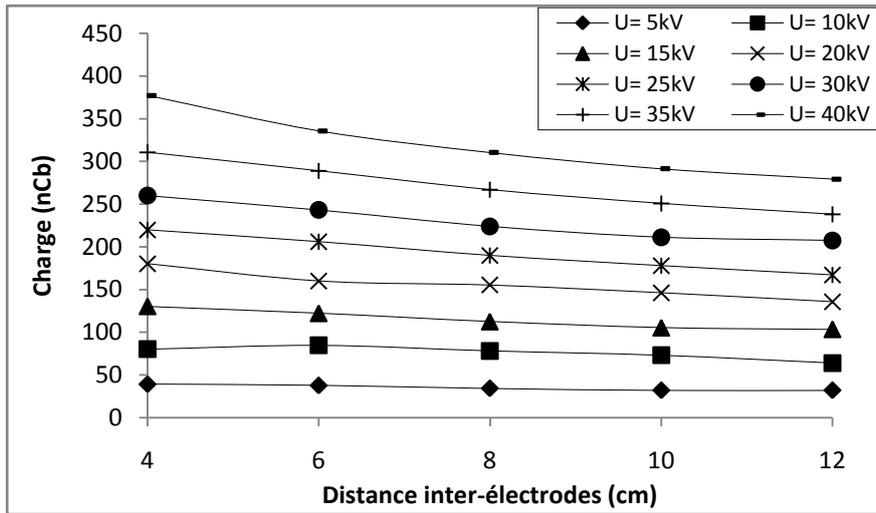


Figure IV.33: Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite:  $D=20\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $a/d=0.2$

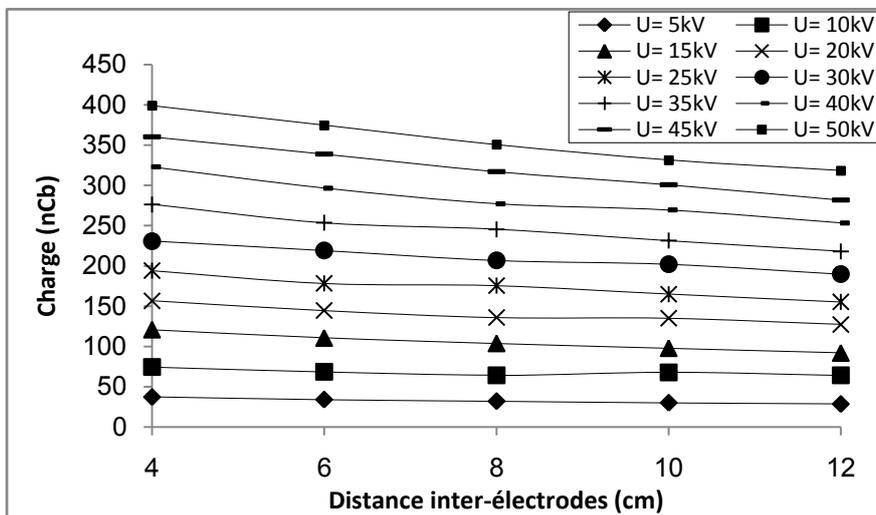


Figure IV.34: Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite:  $D=10\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $a/d=0.4$

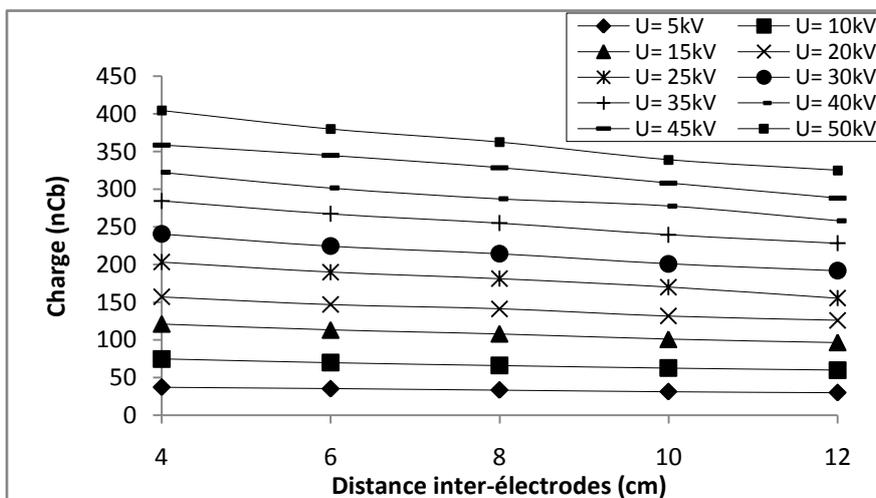
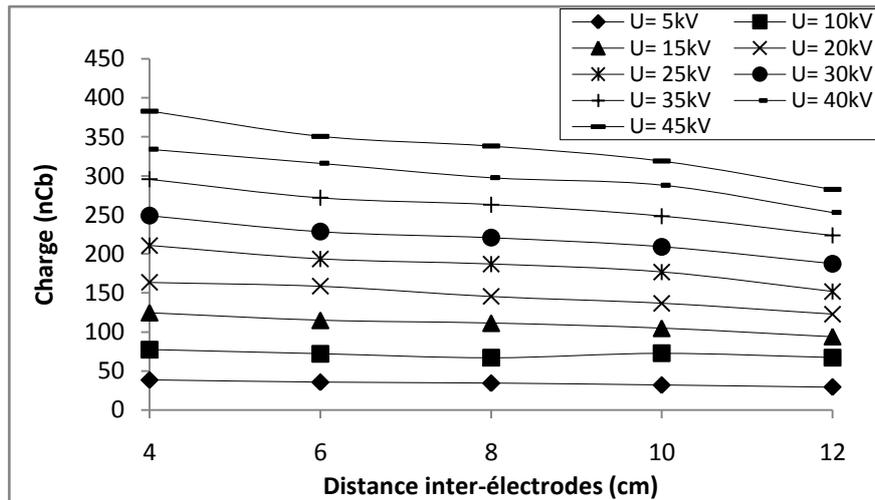
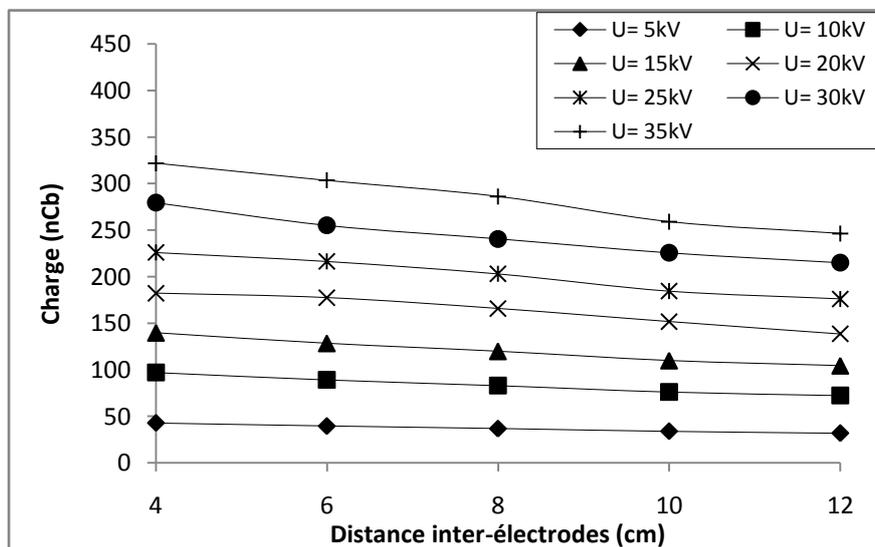


Figure IV.35: Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn :  $D=10\text{cm}$ ,  $e=2\text{mm}$ ,  $a/d=0.6$



**Figure IV.36:** Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn :  $D=10\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $a/d=0.8$



**Figure IV.37:** Charge en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite:  $D=20\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $a/d=1$

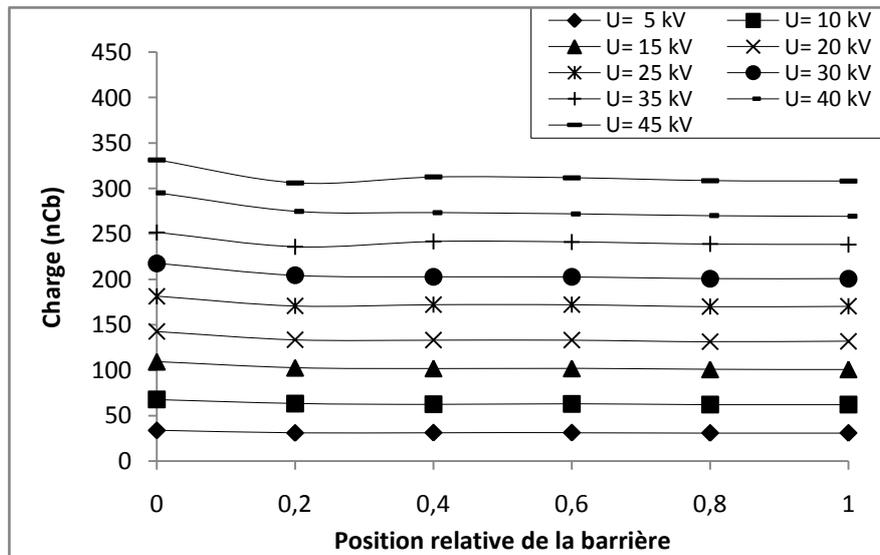
### IV.3.3 Effet de la position de la barrière

Pour étudier l'influence de la position de la barrière sur la variation de la charge du système pointe-plan, nous avons effectué des essais pour six positions de la barrière en variant la distance inter-électrodes et la tension appliquée.

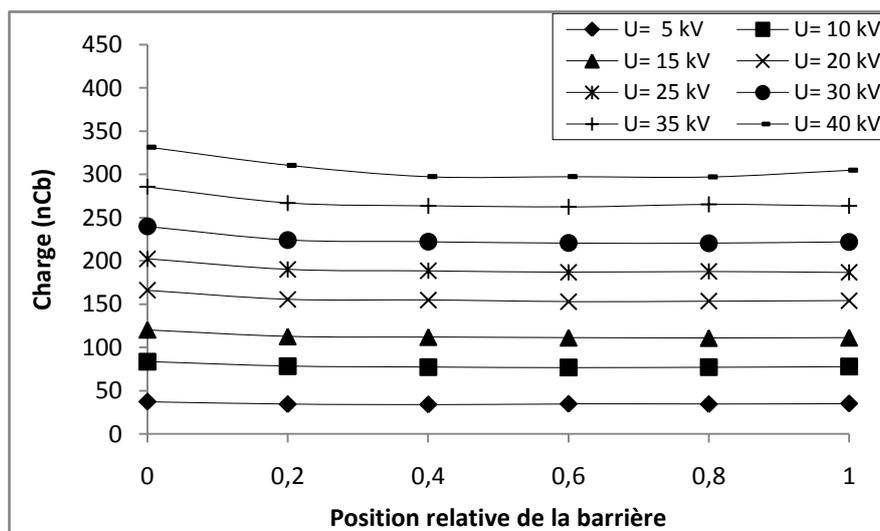
Aux figures IV.38 à IV.41 sont illustrées les courbes de la charge en fonction de la position de la barrière pour les différents niveaux de tension, nous constatons que pour les deux types de matériaux (bakélite et presspahn) l'effet de la position de la barrière n'intervient pas que pour les niveaux de tension supérieurs à 15 kV et lorsque la barrière est près de la pointe.

En comparant les deux types de barrières utilisées, nous remarquons qu'à la position  $a/d=0$ , la quantité de charge est plus importante pour une barrière en presspahn que celle en bakélite, cela peut être justifié par la différence de permittivité entre les deux matériaux.

D'après les figures (IV.42 à IV.45), présentant la variation de l'efficacité de la barrière en fonction de la distance inter-électrodes, il en ressort que l'efficacité est presque constante pour toutes les positions de la barrière sauf que pour la position  $a/d=0$  où elle est plus importante.



**Figure IV.38:** Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite :D=10cm, e=2mm, d=8cm



**Figure IV.39:** Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en Bakélite :D=20cm, e=4mm, d=8cm

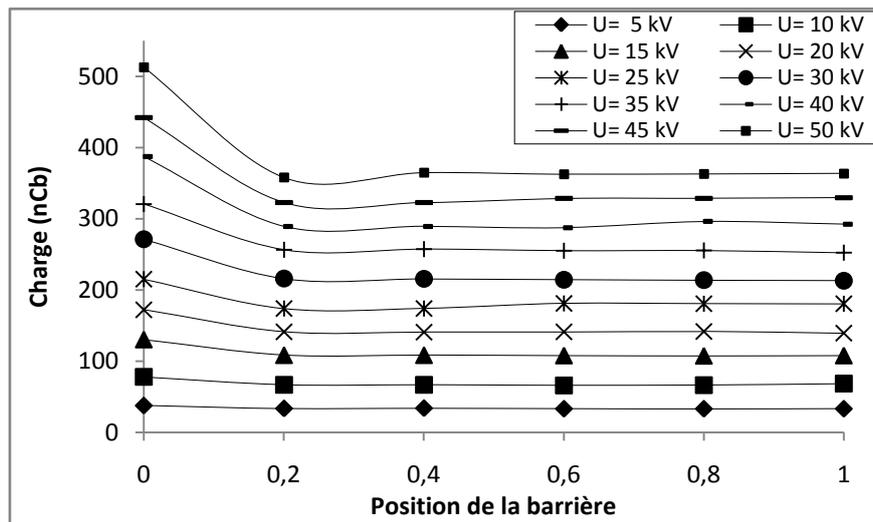


Figure IV.40: Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn : D=10cm, e=2mm, d=8cm

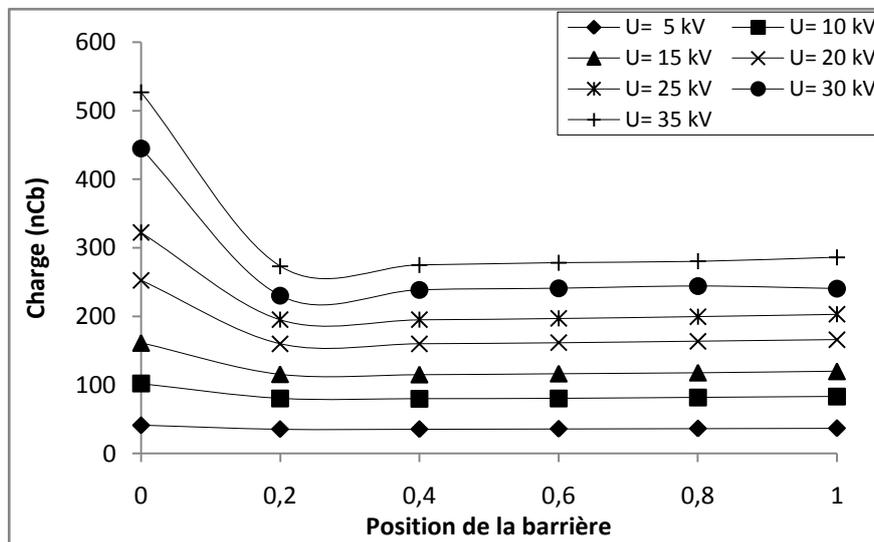


Figure IV.41: Charge en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en Presspahn : D=20cm, e=4mm, d=8cm

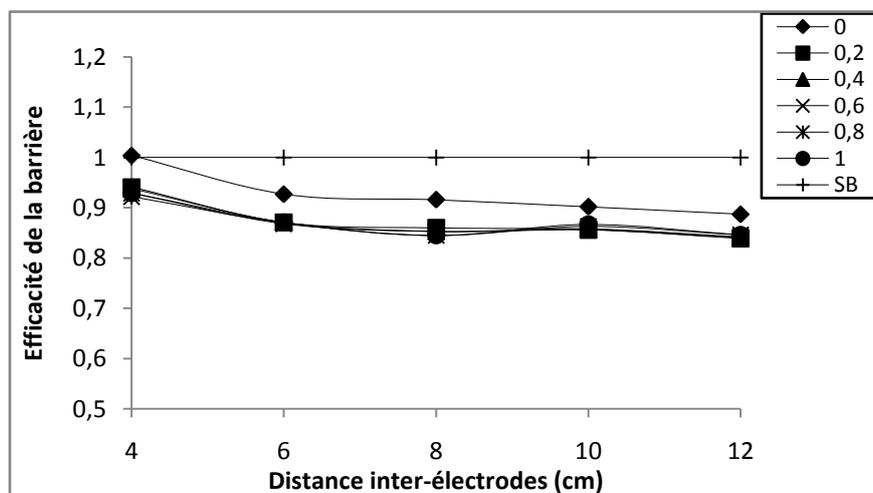


Figure IV.42: Efficacité de la barrière en Bakélite en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; D=10cm, e=2mm et U=30kV

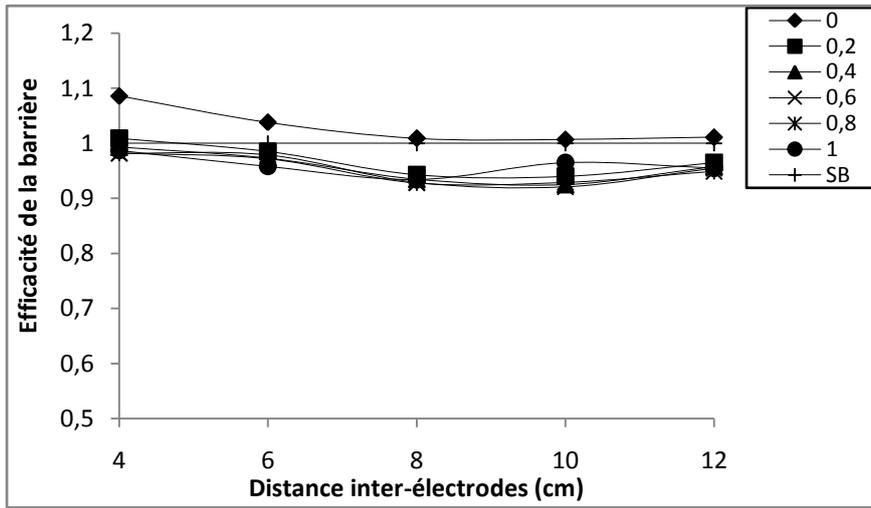


Figure IV.43: Efficacité de la barrière en Bakélite en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; D=20cm, e=4mm et U=30kV

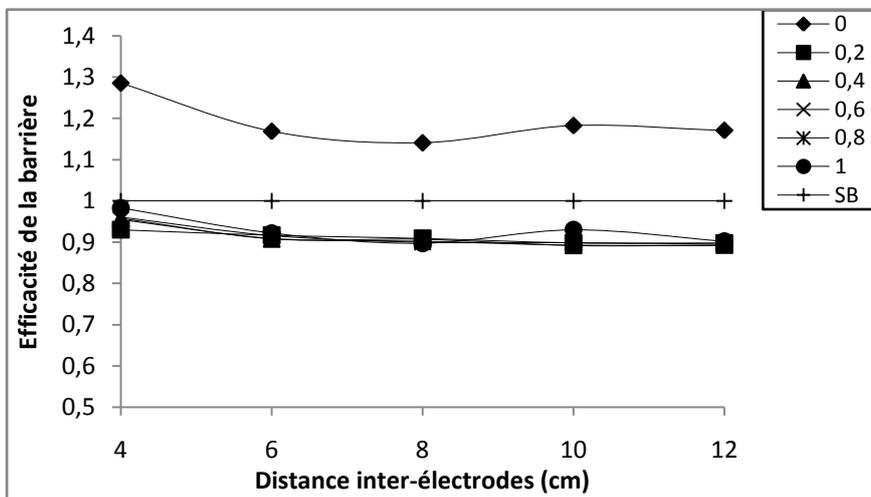


Figure IV.44: Efficacité de la barrière en Presspahn en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; D=10cm, e=2mm et U=30kV

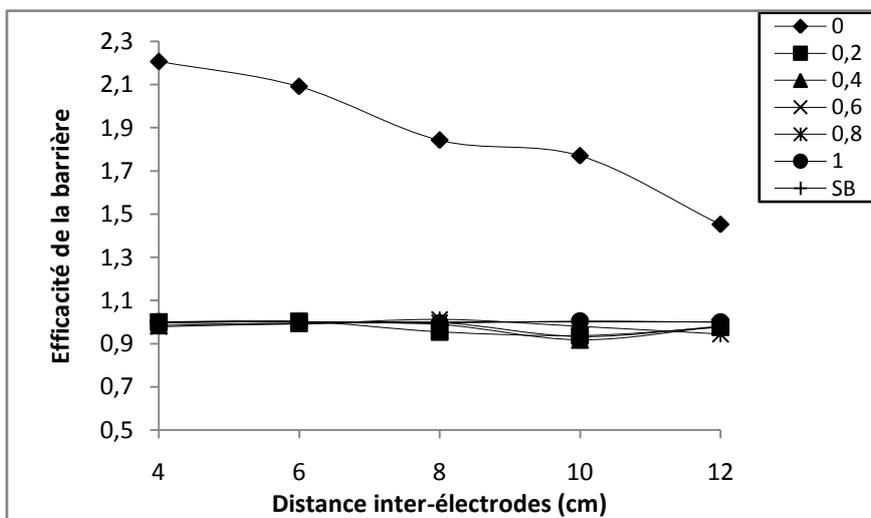


Figure IV.45: Efficacité de la barrière en Presspahn en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière; D=20cm, e=4mm et U=30kV

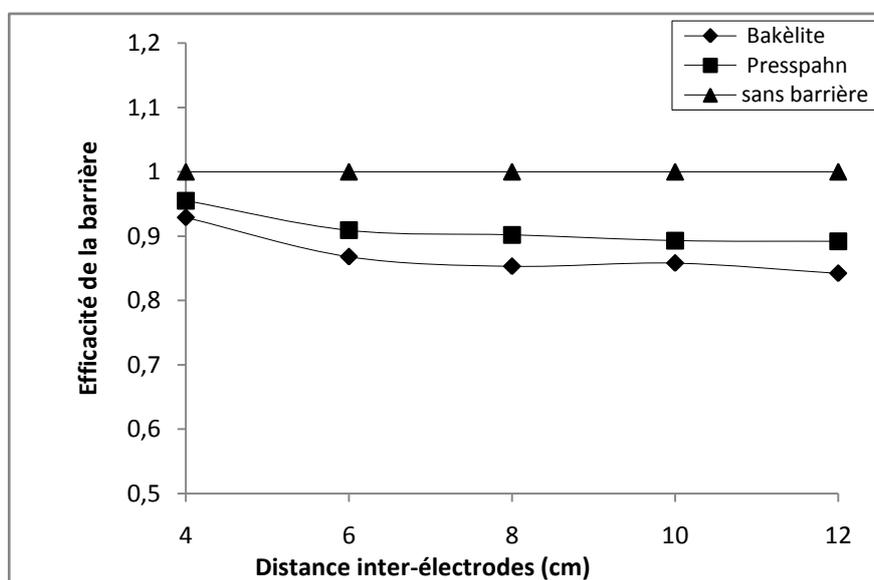
#### IV.3.4 Effet de la nature de la barrière

Pour analyser l'influence de la nature de la barrière sur la charge du système, nous avons utilisé pendant nos essais deux matériaux différents: la bakélite ( $\epsilon_r=5$ ) et le presspahn ( $\epsilon_r=3$ ) pour les différents diamètres (10 et 20cm) et de différentes épaisseurs (2 et 4mm).

Les résultats sont illustrés sur les figures (IV.46 à IV.53). Nous remarquons que pour deux barrières de mêmes dimensions et de natures différentes, la barrière en bakélite diminue plus la charge que la barrière en presspahn, en raison de la différence de leurs permittivités.

Notons que plus en augmentant la tension appliquée plus l'efficacité de deux barrières se différencie surtout pour la position  $a/d=0$  où la barrière est en contact avec la pointe, (figures IV.50 à IV.53).

Les caractéristiques données aux figures (IV.48 et IV.49) montrent que l'efficacité de la barrière en fonction de la position se stabilise en s'éloignant de la pointe pour les deux types de barrières.



**Figure IV.46:** Efficacité en fonction la distance inter-électrodes de deux barrières l'une en bakélite l'autre en presspahn :  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $U=30\text{kV}$ ;  $a/d = 0.6$

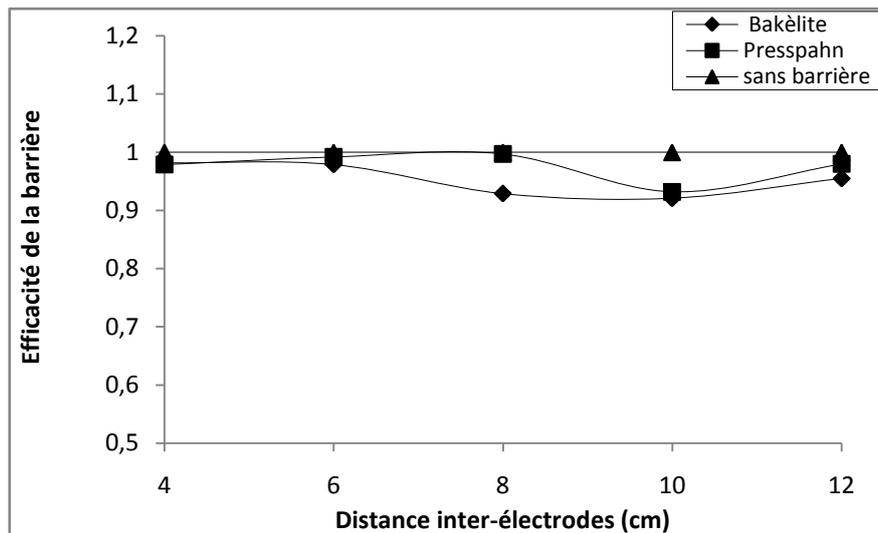


Figure IV.47: Efficacité en fonction la distance inter-électrodes de deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn :  $D=20\text{cm}$ ;  $e=4\text{mm}$ ;  $U=30\text{kV}$ ;  $a/d = 0.6$

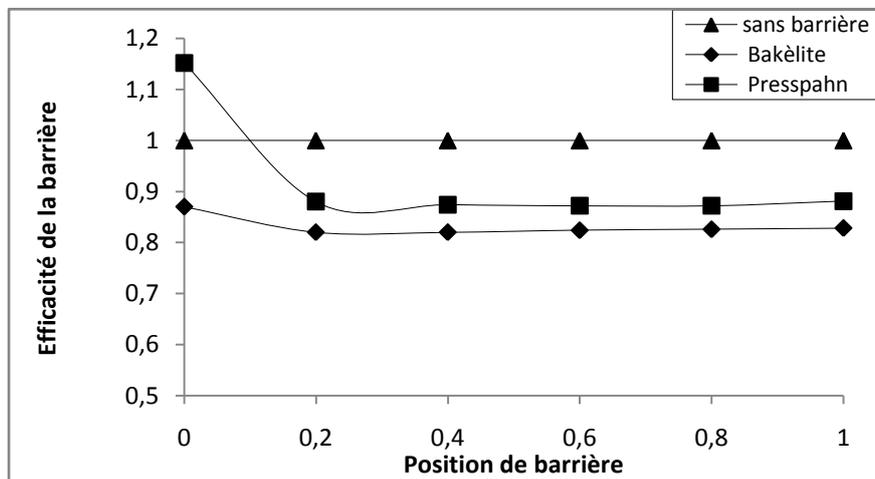


Figure IV.48: Efficacité de la barrière en fonction de la position de deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn:  $D=10\text{cm}$ ,  $e=2\text{mm}$ ,  $d=12\text{cm}$  et  $U=40\text{kV}$

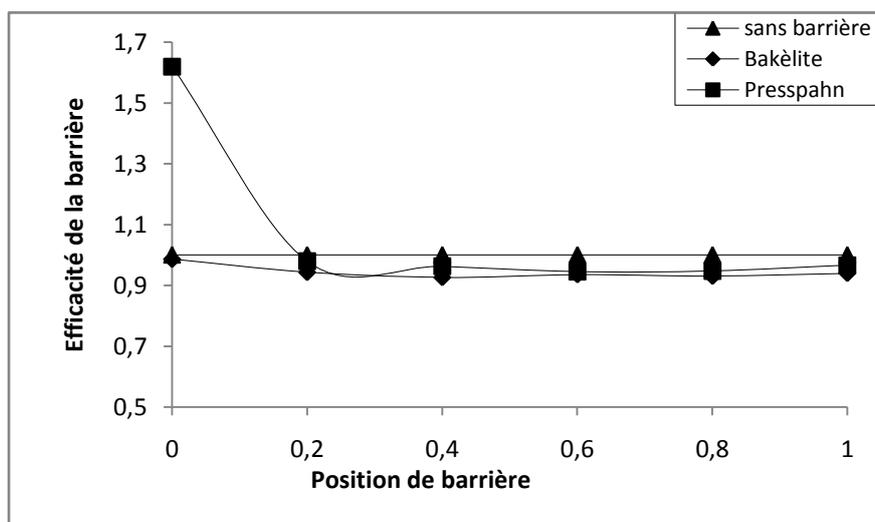


Figure IV.49: Efficacité de la barrière en fonction de la position de deux barrières l'une en bakélite et l'autre en presspahn:  $D=20\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $d=12\text{cm}$  et  $U=40\text{kV}$

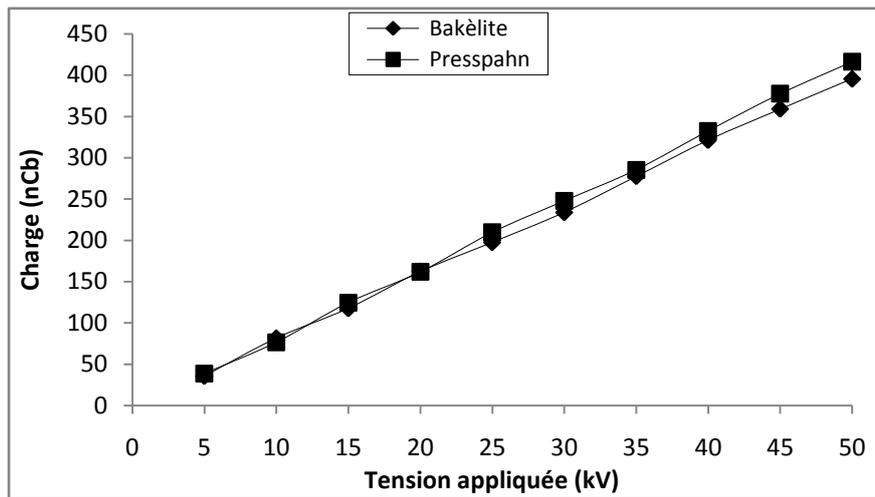


Figure IV.50: Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d = 1$

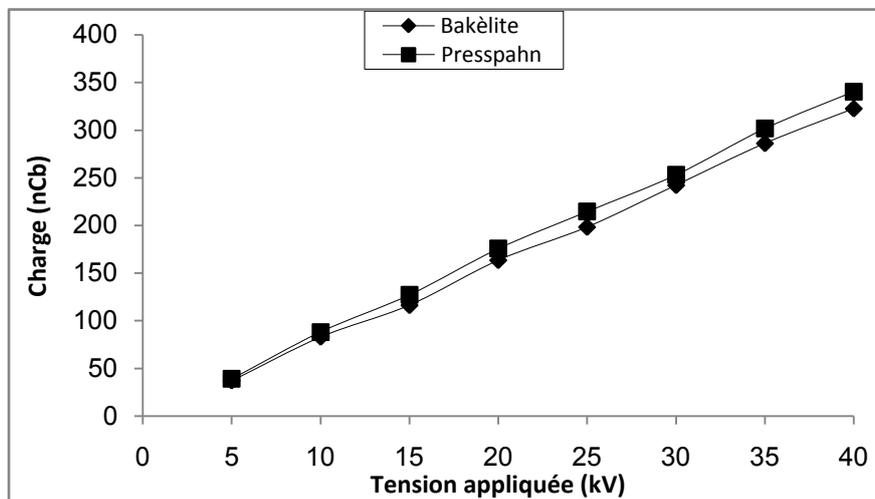


Figure IV.51: Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=20\text{cm}$ ;  $e=4\text{mm}$ ;  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 0.8$

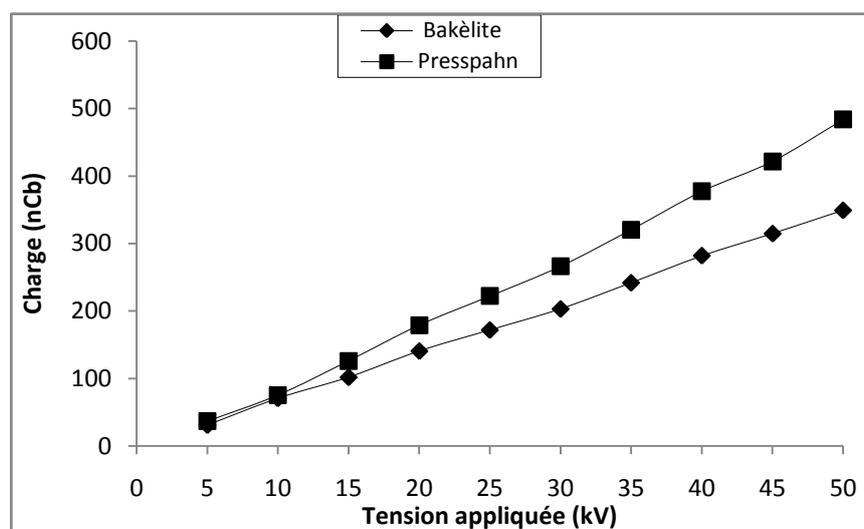
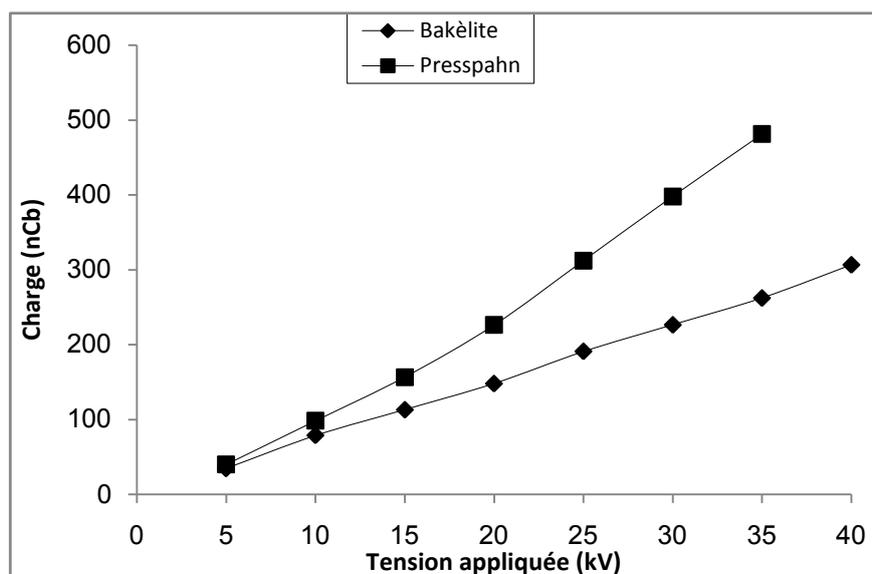


Figure IV.52: Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



**Figure IV.53:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=20\text{cm}$ ;  $e=4\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0$

### IV.3.5 Effet de l'épaisseur de la barrière

La recherche de l'influence de l'épaisseur de la barrière nous a conduit à utiliser des barrières isolantes de différentes épaisseurs. Pour notre cas, nous avons choisis les épaisseurs (2 et 4mm) pour les différents diamètres (10 et 20cm) des barrières en presspahn et en bakélite.

Nous observons que l'épaisseur de la barrière n'a pas d'effet pour une barrière en bakélite quel que soit son diamètre, sa position par rapport à la pointe, la distance inter-électrodes et la tension appliquée (figures IV.54, IV.57 à IV.61).

Nous remarquons aussi que pour une barrière en presspahn, l'effet de l'épaisseur n'intervient pas pour un diamètre de 10cm, quelle que soit la position de la barrière, la distance inter-électrodes et la tension appliquée (figures IV.56, IV.62 et IV.63). Par contre pour une barrière de diamètre de 20cm située près de la pointe à la position  $a/d=0$  pour toutes les distances inter-électrodes (figures IV.55, IV.65 et IV.66), ainsi que pour les distances 4 et 6cm pour toutes les positions (figures IV.67 à IV.70), l'augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation de la charge, cela signifie que la charge présente bien un caractère volumique et la barrière joue le rôle d'obstacle géométrique.

Pour mieux observer l'influence d'épaisseur de la barrière, il serait donc plus intéressant d'utiliser des barrières d'épaisseurs très différentes.

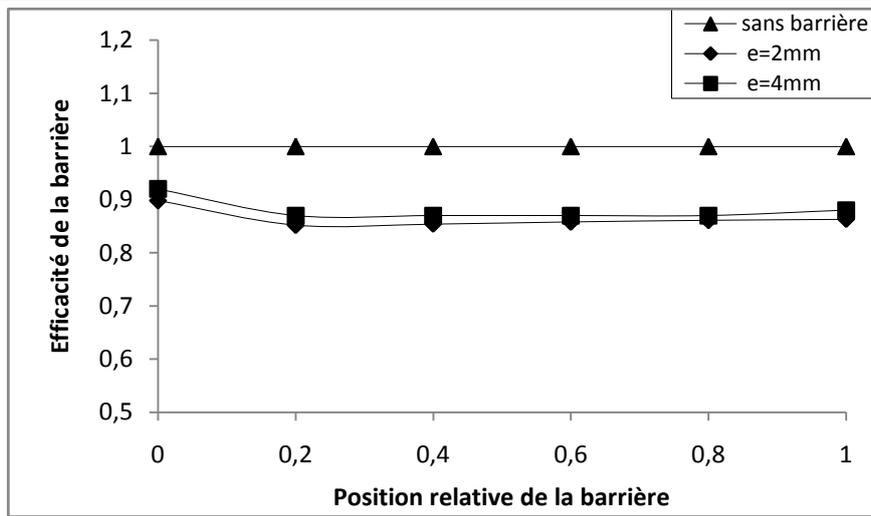


Figure IV.54: Efficacité en fonction de la position de deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); D=10cm; U=15kV; d=10cm

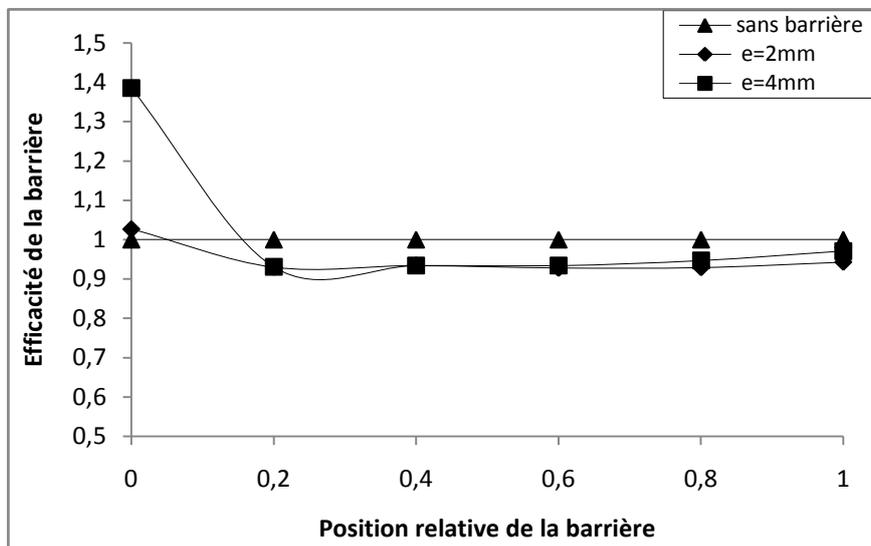


Figure IV.55: Efficacité en fonction de la position de deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); D=20cm; U=15kV; d=10cm

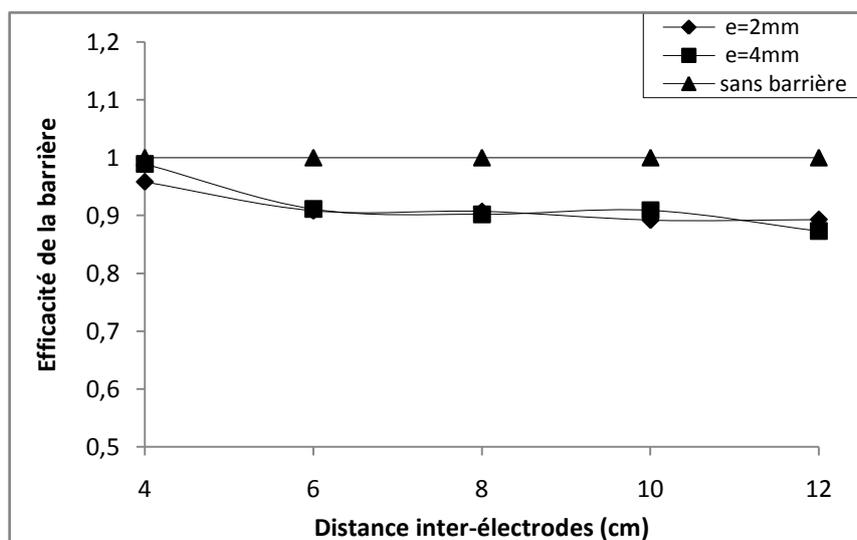


Figure IV.56: Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm); D=10cm; U=30kV; a/d = 0.4

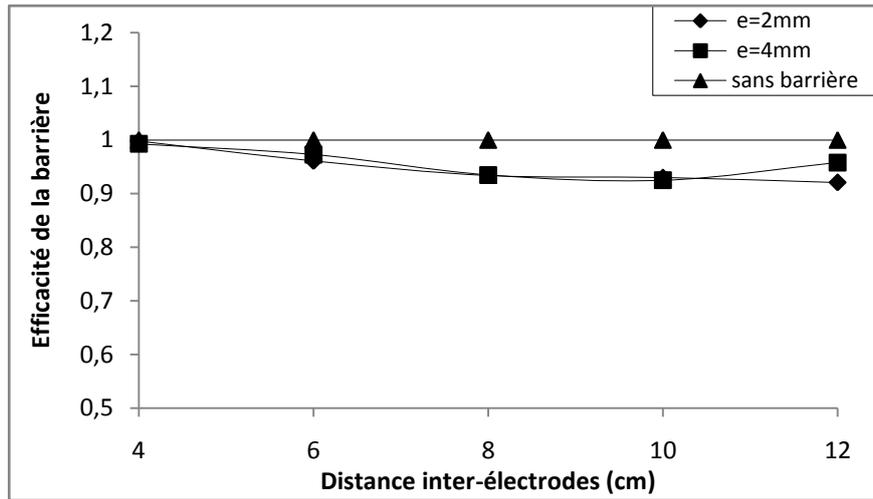


Figure IV.57: Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ;  $U=30\text{kV}$ ;  $a/d = 0.4$

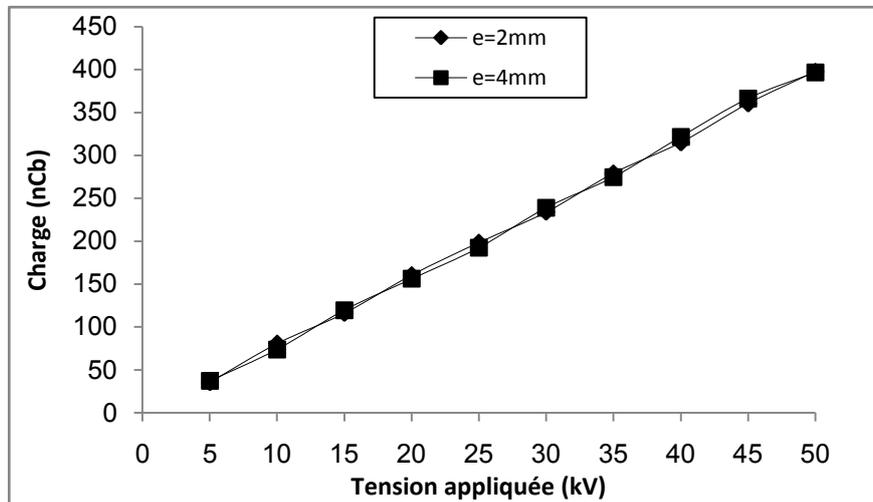


Figure IV.58: Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm) ;  $D=10\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d=0.6$

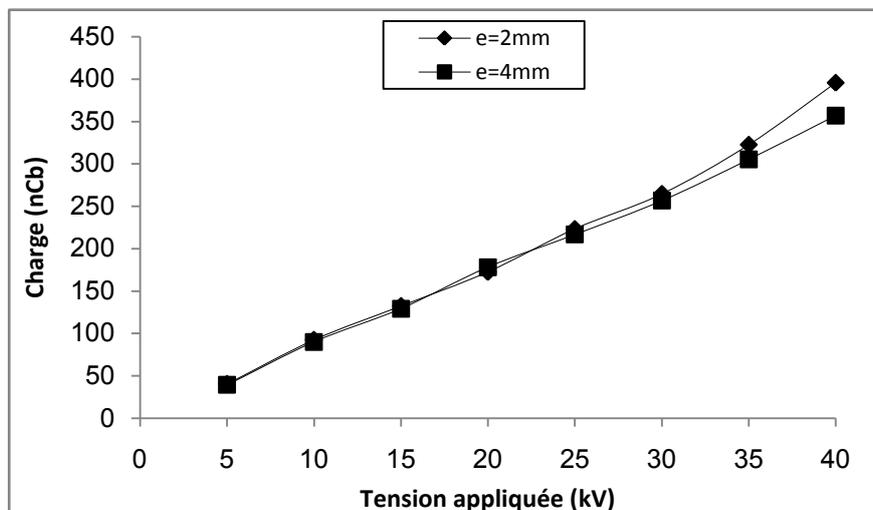
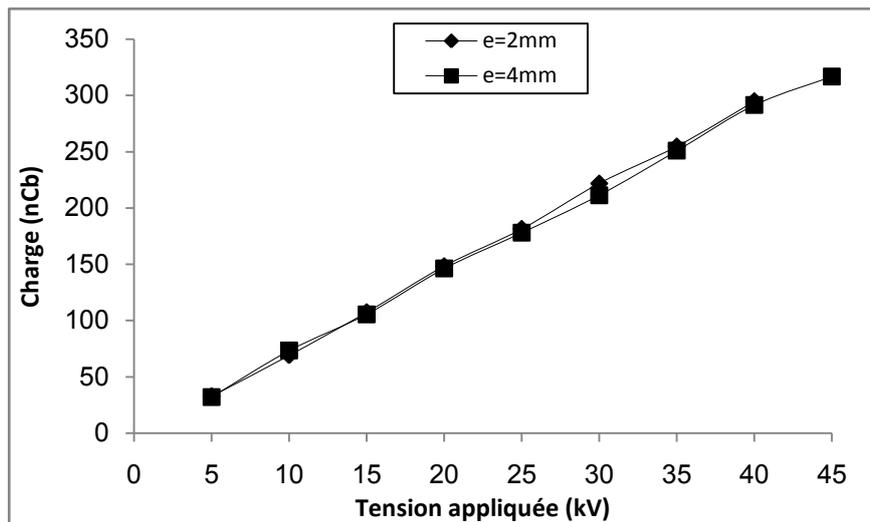
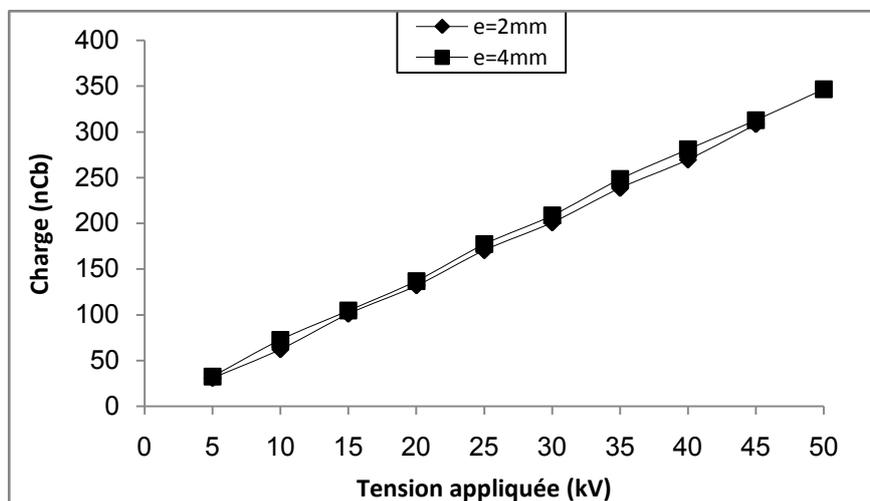


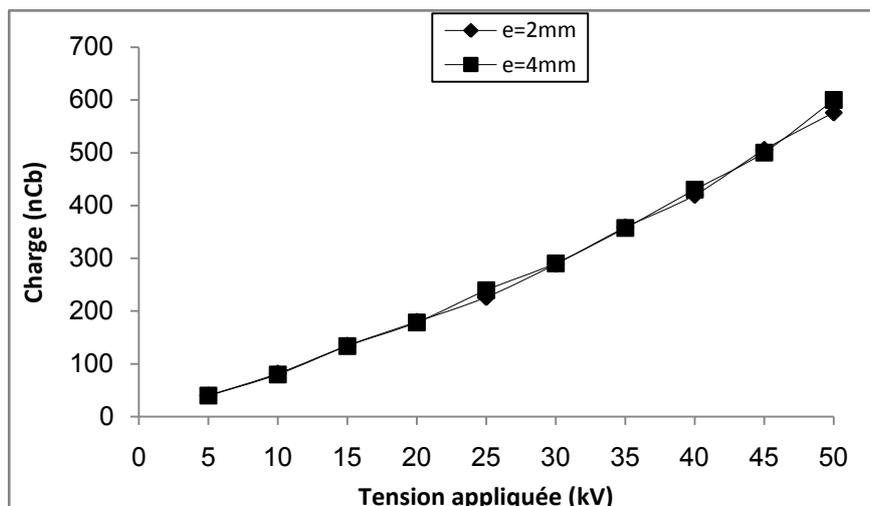
Figure IV.59: Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm)  $D=20\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d=0$



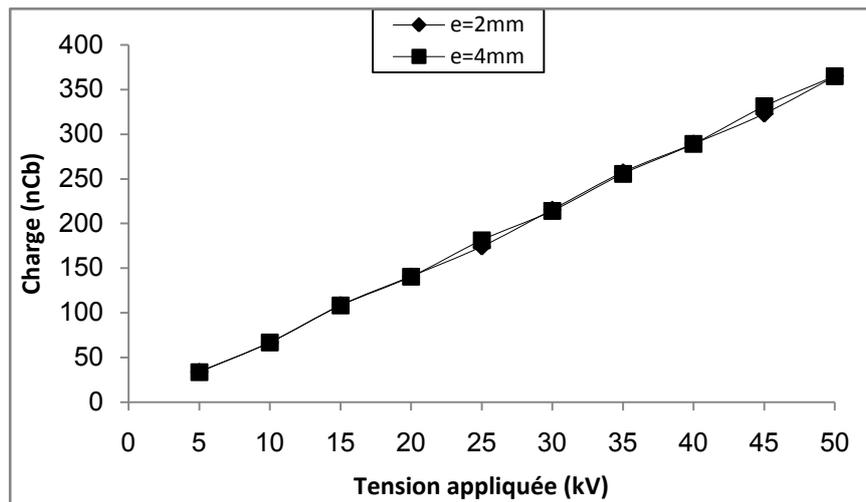
**Figure IV.60:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm) ;  $D=20\text{cm}$ ,  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d=0.2$



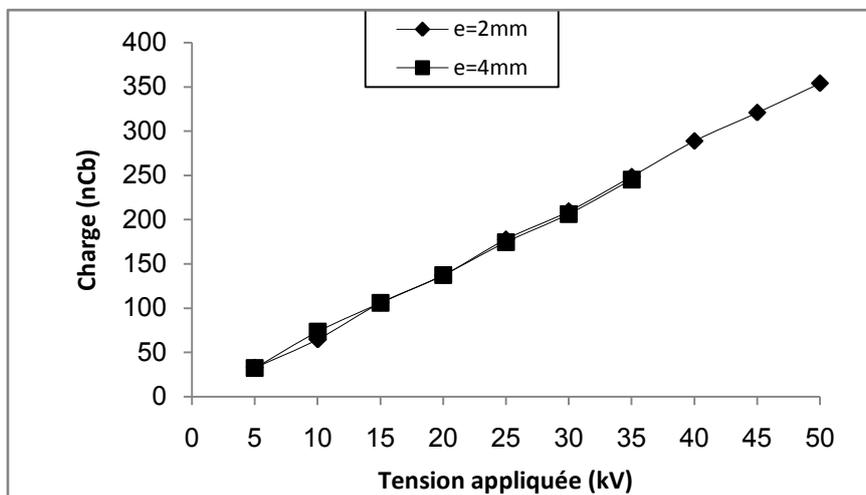
**Figure IV.61:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm),  $D=10\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d=1$



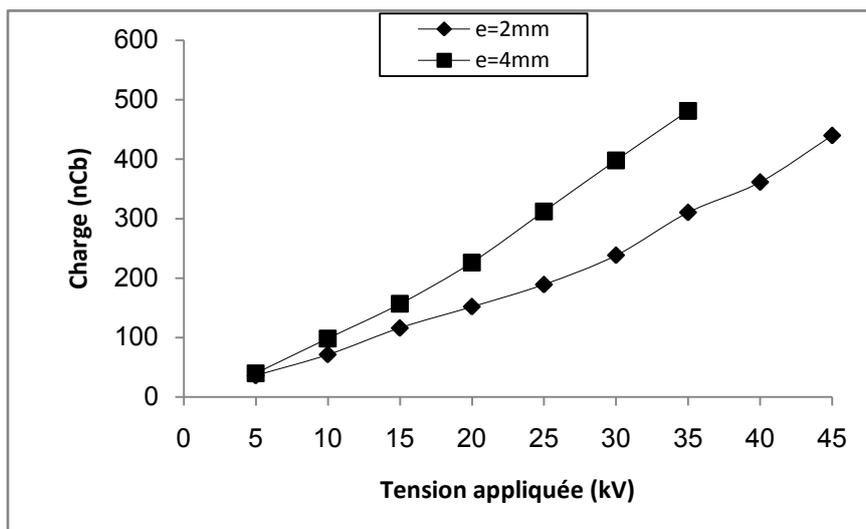
**Figure IV.62:** charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  $D=10\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d=0$



**Figure IV.63:** charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=10\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d=0.4$



**Figure IV.64:** charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ,  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d=0.4$



**Figure IV.65:** charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ,  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d=0$

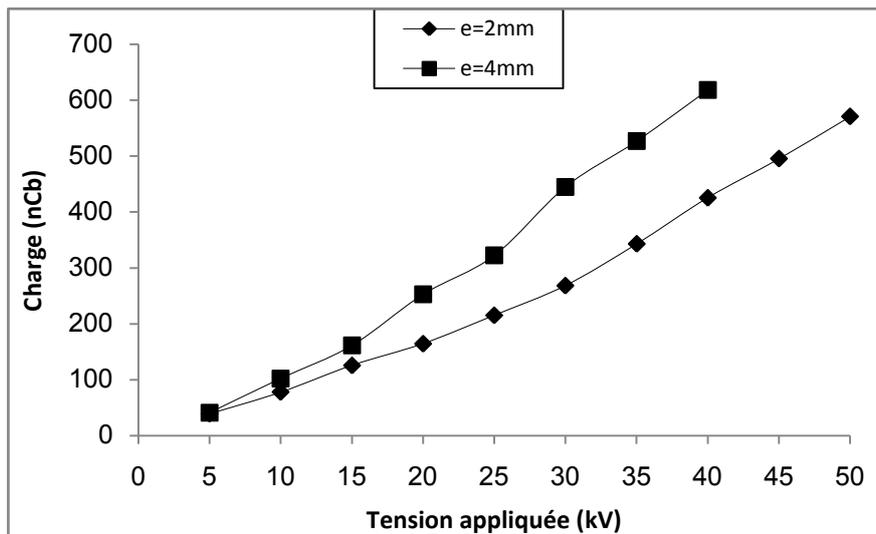


Figure IV.66: charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn; d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d=0$

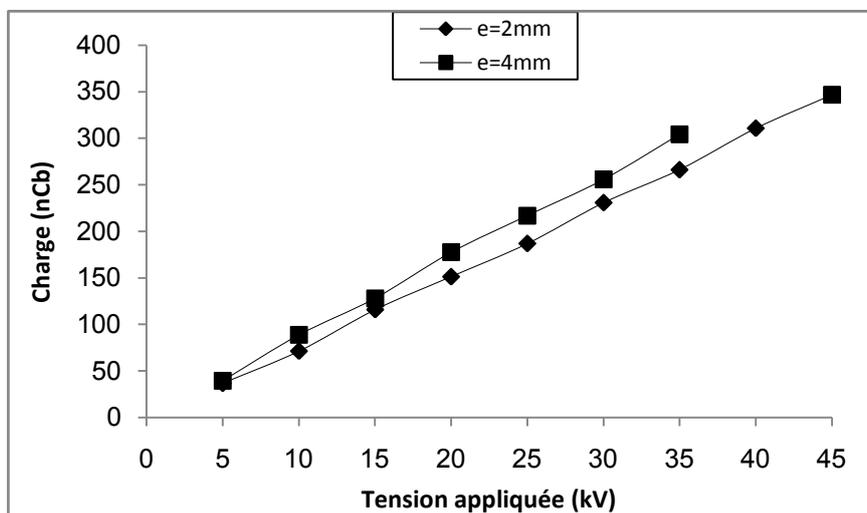


Figure IV.67: charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn; d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d=0.2$

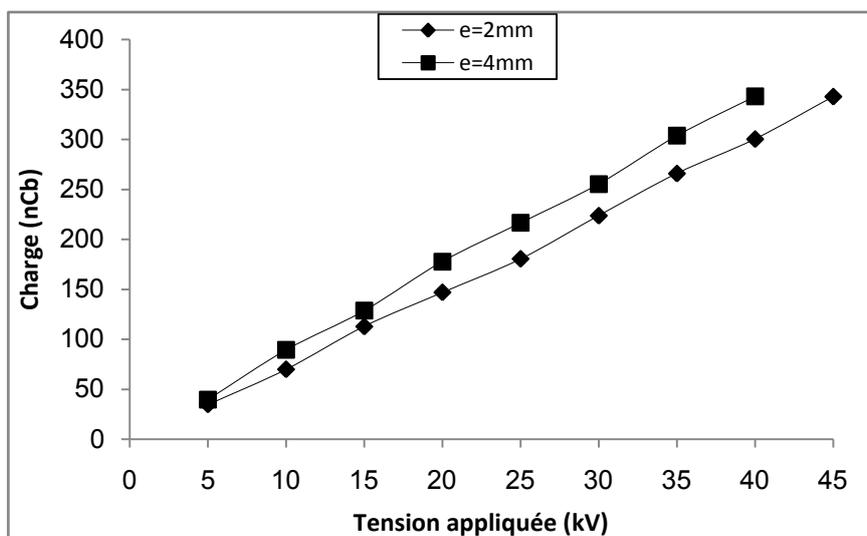
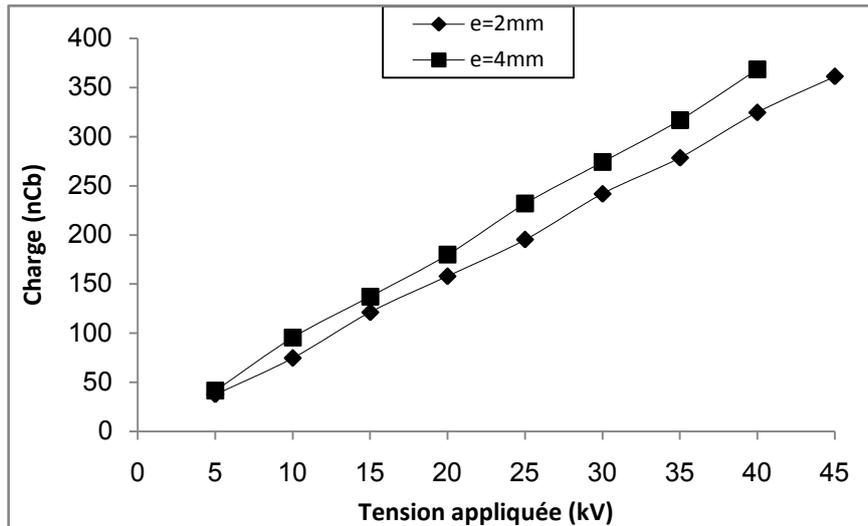
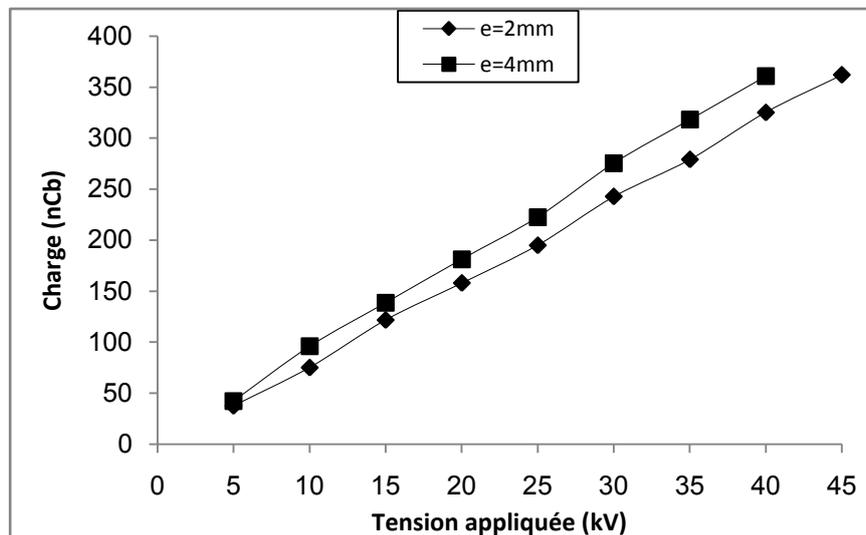


Figure IV.68: charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn; d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d=1$



**Figure IV.69:** charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=10\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d=0.6$

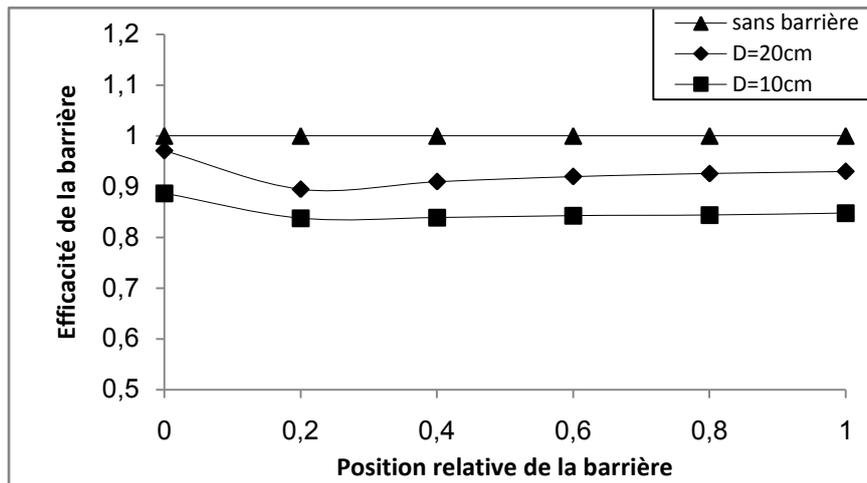


**Figure IV.70:** charge en fonction de la tension appliquée entre deux barrières en Presspahn d'épaisseurs différentes (2mm et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d=0.4$

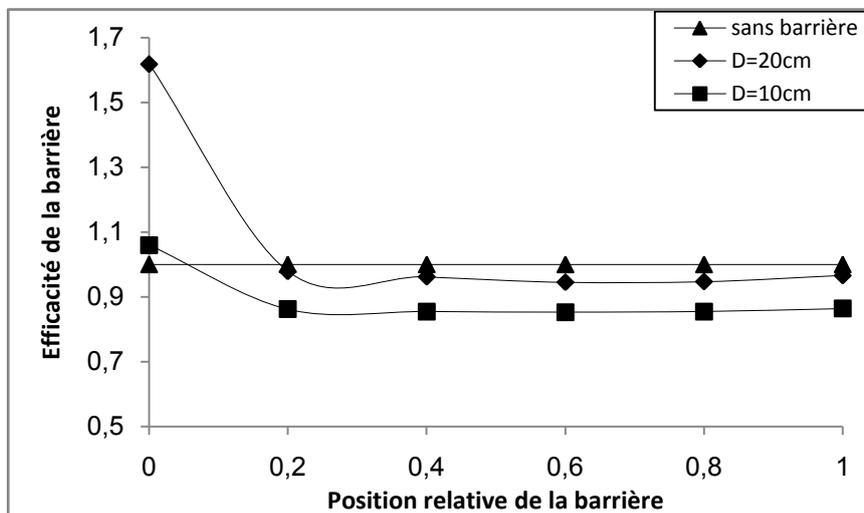
#### IV.2.6 Effet du diamètre de la barrière:

L'effet du diamètre de la barrière est représenté sur les figures (IV.71 à IV.78). Il ressort de ces courbes que la charge du système utilisé devient plus importante lorsque le diamètre de la barrière augmente, cela est dû au fait que l'accumulation de la charge augmente par l'augmentation de la surface de la barrière.

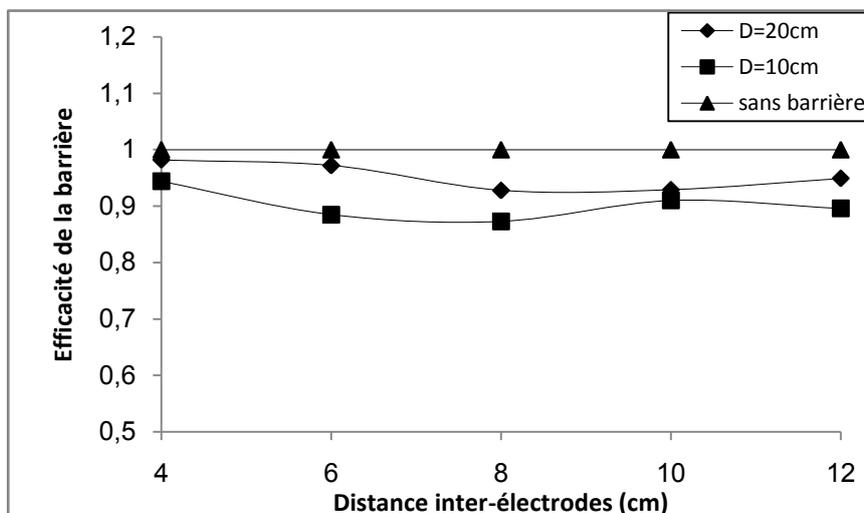
Nous constatons aussi pour une barrière en presspahn (figures IV.72 et IV.78), que cette différence est plus remarquable pour la position  $a/d=0$ , quelle que soit la distance inter-électrodes.



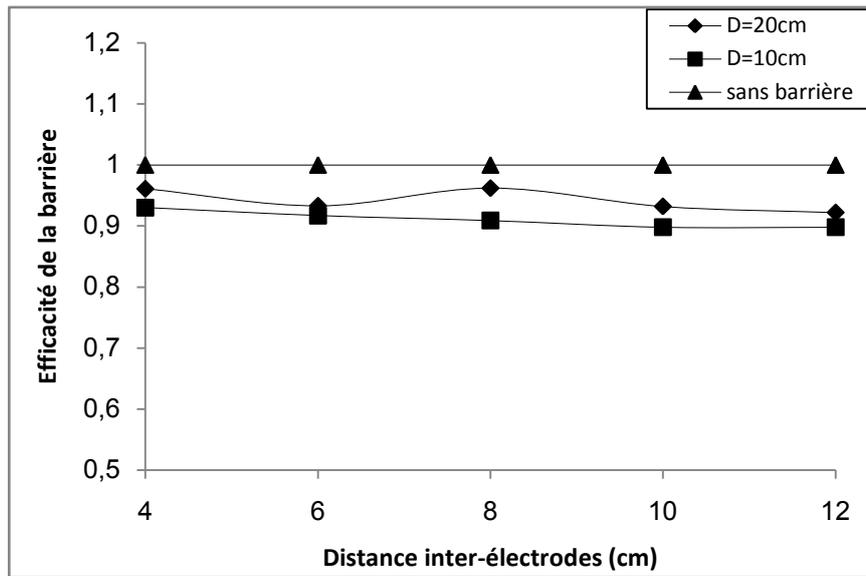
**Figure IV.71:** Efficacité en fonction de la position pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm),  $e=2\text{mm}$ ,  $U=35\text{kV}$ ,  $d=12\text{cm}$



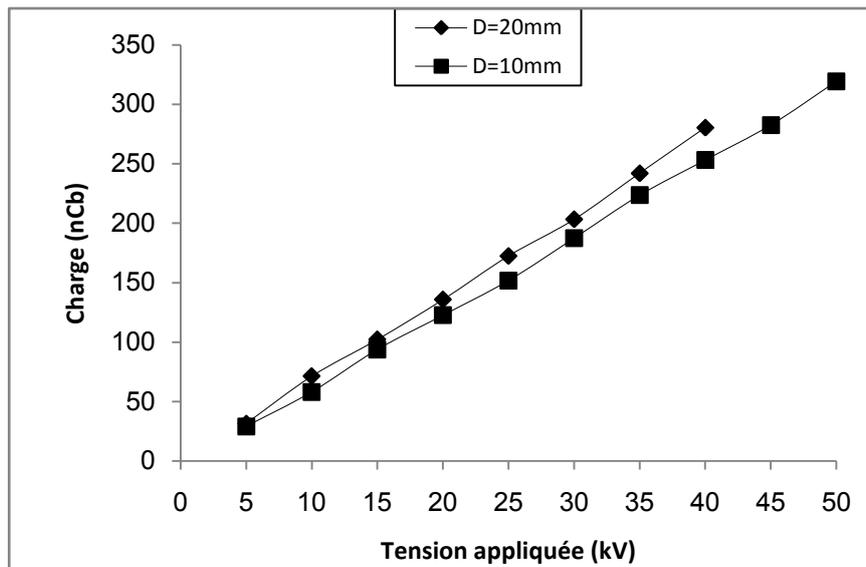
**Figure IV.72:** Efficacité en fonction de la position pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm),  $e=4\text{mm}$ ,  $U=40\text{kV}$ ,  $d=12\text{cm}$



**Figure IV.73:** Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en bakélite de diamètres différents : (10 et 20cm),  $e=4\text{mm}$ ,  $U=30\text{kV}$ ,  $a/d=0.8$



**Figure IV.74:** Efficacité en fonction de la distance inter-électrodes de deux barrières en presspahn de diamètres différents : (10 et 20cm),  $e=2\text{mm}$ ,  $U=30\text{kV}$ ,  $a/d=0.2$



**Figure IV.75:** Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Presspahn de diamètres différents (10 et 20cm);  $e=2\text{mm}$ ;  $d=12\text{cm}$ ;  $a/d=0.8$

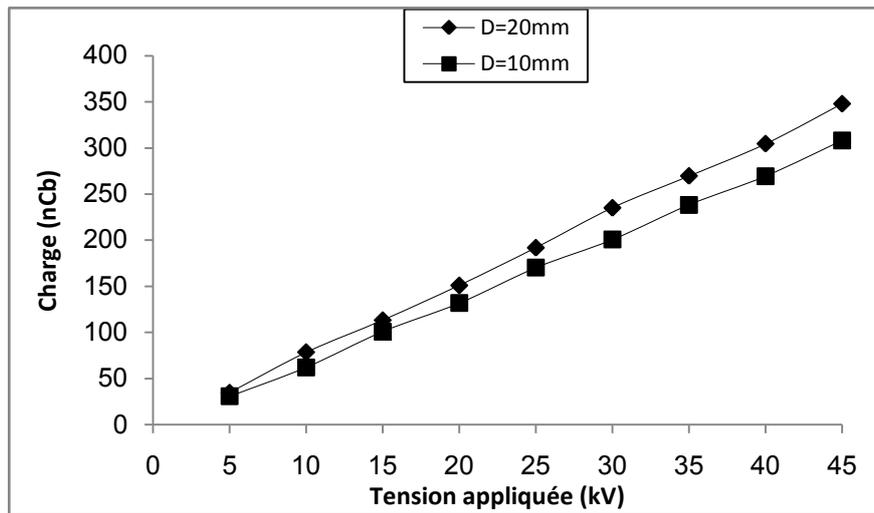


Figure IV.76: charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm); e=2mm; d=8cm; a/d = 1

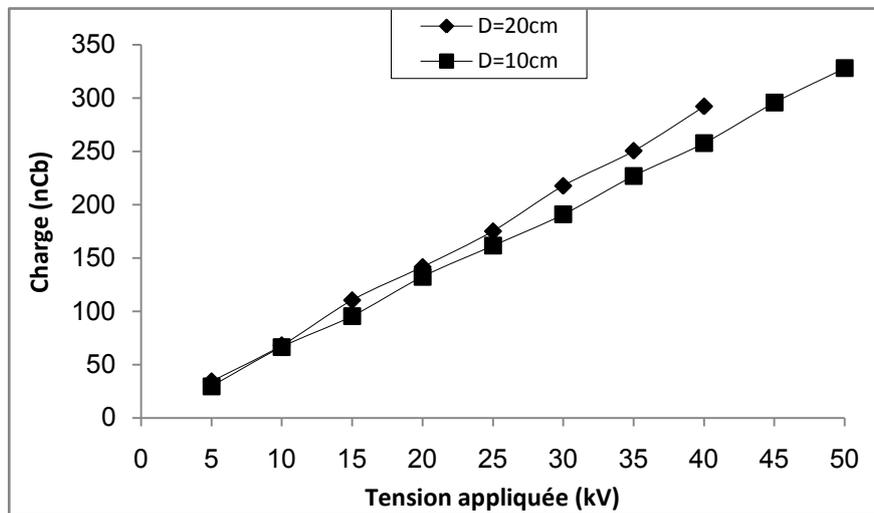


Figure IV.77: charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm); e=4mm; d=12cm; a/d=0

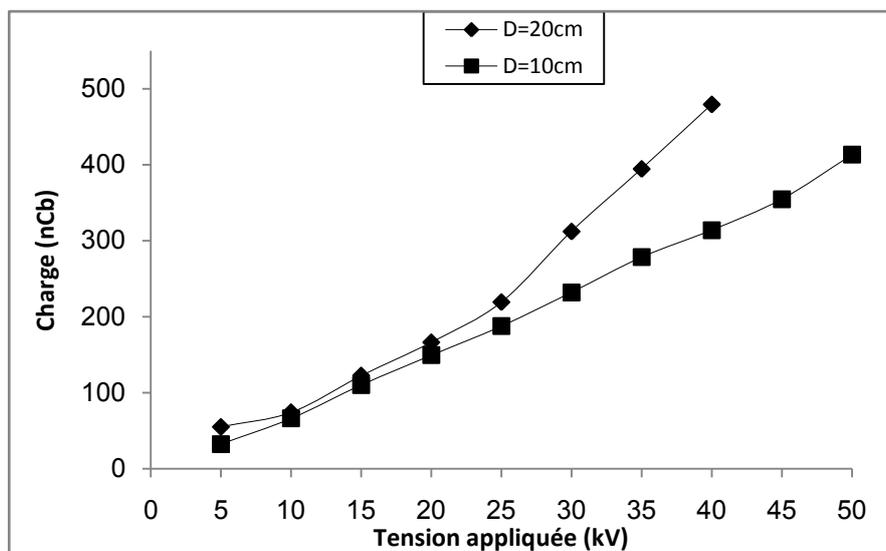


Figure IV.78: charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm); e=2mm; d=12cm; a/d=0

## IV.4 Energie moyenne du système

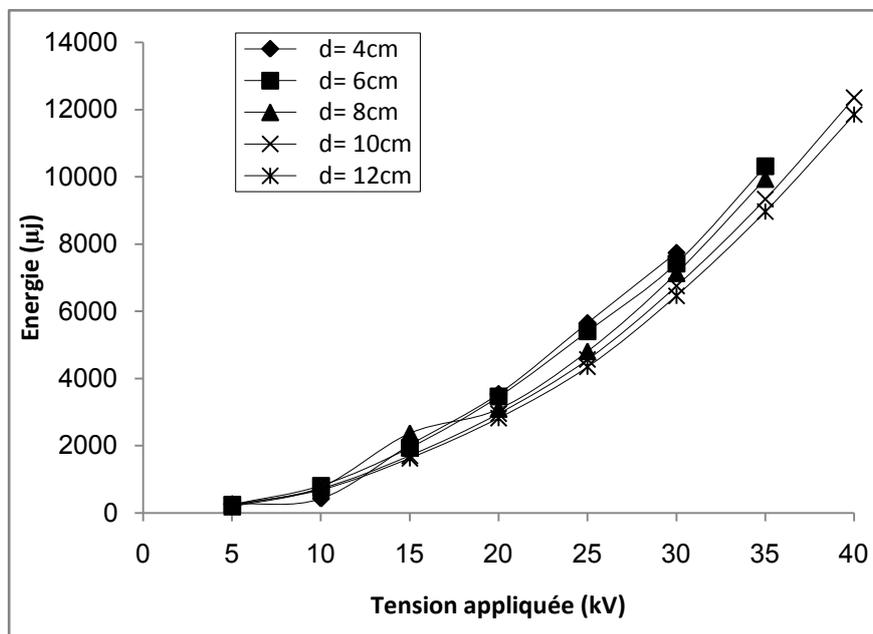
L'énergie moyenne est définie comme étant le travail fournie pour ioniser (générer des charges), échauffer, vaporiser l'isolant liquide et enfin à déplacer le streamer [17]. Elle est donnée par la relation suivante :  $W=Q.U$

### IV.4.1 Energie moyenne pour un système pointe-plan sans barrière

#### IV.4.1.1 Influence de la tension appliquée

La figure IV.79 montre l'évolution de l'énergie en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter – électrodes.

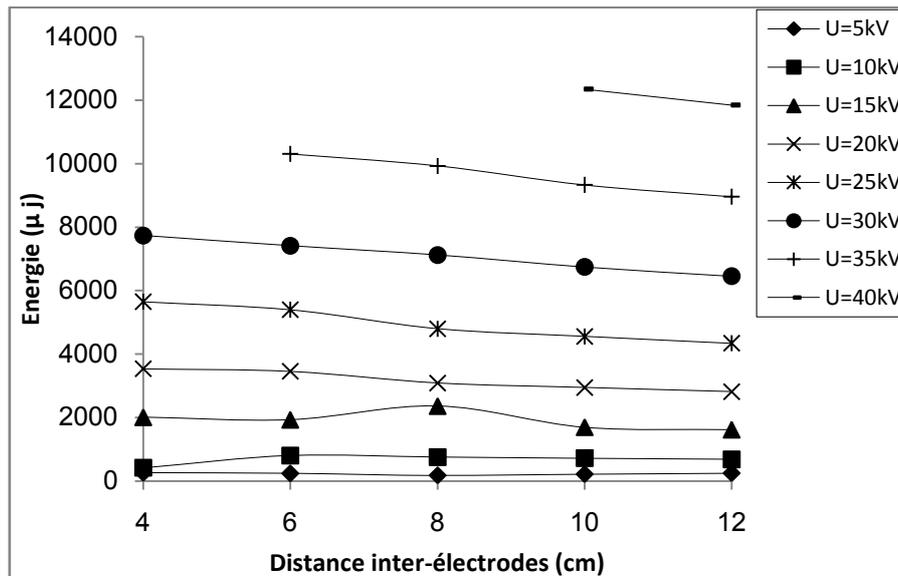
Nous constatons que l'énergie augmente avec la tension appliquée quelle que soit la distance inter-électrodes. Ceci est dû à l'augmentation de la quantité de charge générée dans l'huile entre l'électrode pointe et le plan. Ces résultats coïncident avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [10].



**Figure IV.79:** Energie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes

#### IV.4.1.2 Influence de la distance inter-électrodes

Nous représentons sur la figure **IV.80** la variation de l'énergie en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension. Il ressort de cette figure que pour les tensions supérieures à **20 kV**, l'énergie du système diminue légèrement avec l'augmentation de la distance inter-électrodes, ce qui est toujours en relation avec la quantité de charge générée dans l'huile.

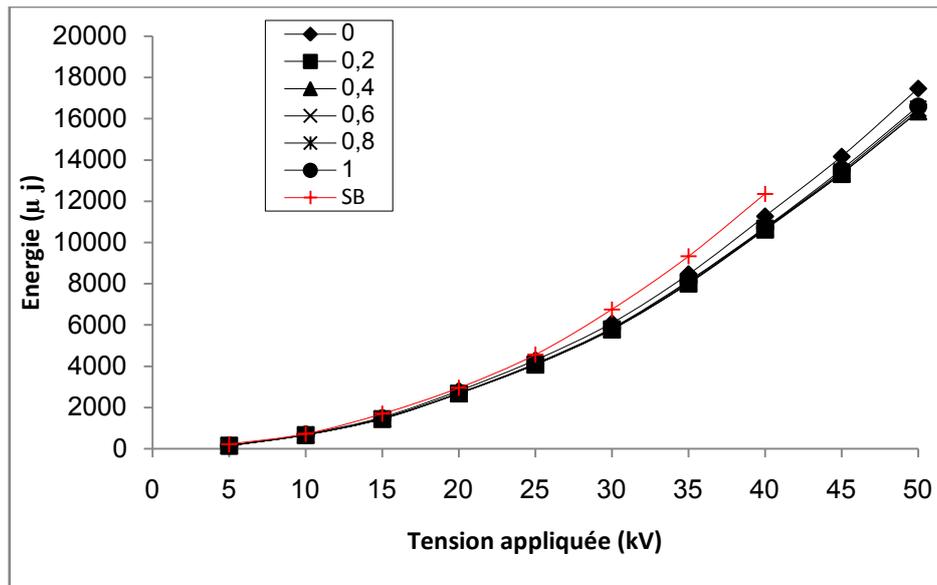


**Figure IV.80:** Énergie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension

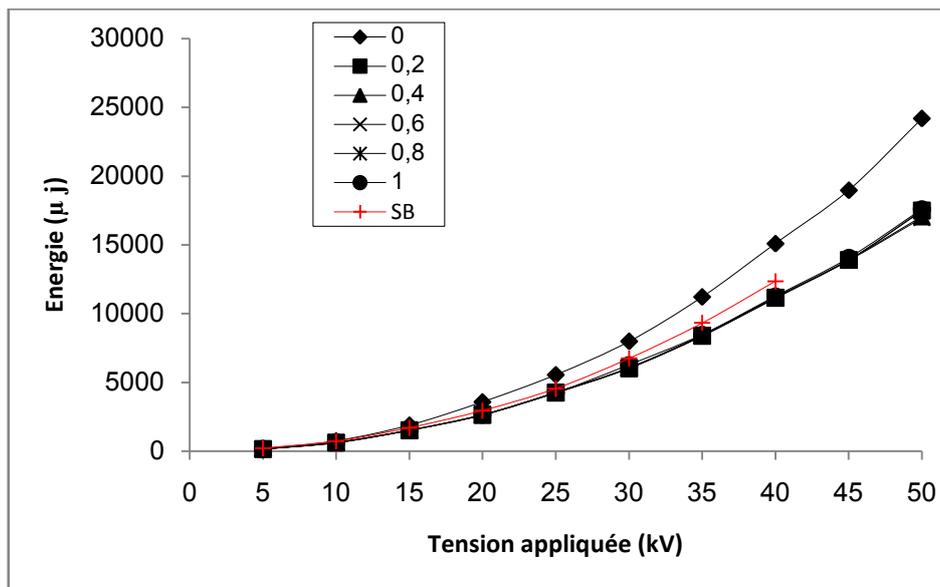
#### IV.4.2 Énergie pour un système pointe-plan avec barrière

##### IV.3.2.1 Effet de l'insertion de la barrière

Il apparait des figures **IV.81** et **IV.82** que l'insertion d'une barrière isolante dans un système pointe-plan diminue significativement l'énergie du système, cela est dû d'une part, au fait que la barrière présente un obstacle géométrique, et d'autre part, la présence de la barrière crée une zone entre la barrière et le plan où le champ est uniforme.



**Figure IV.81:** Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes positions; barrière utilisée : bakélite ;  $D=10\text{cm}$ ,  $e=2\text{mm}$ ,  $d=10\text{cm}$



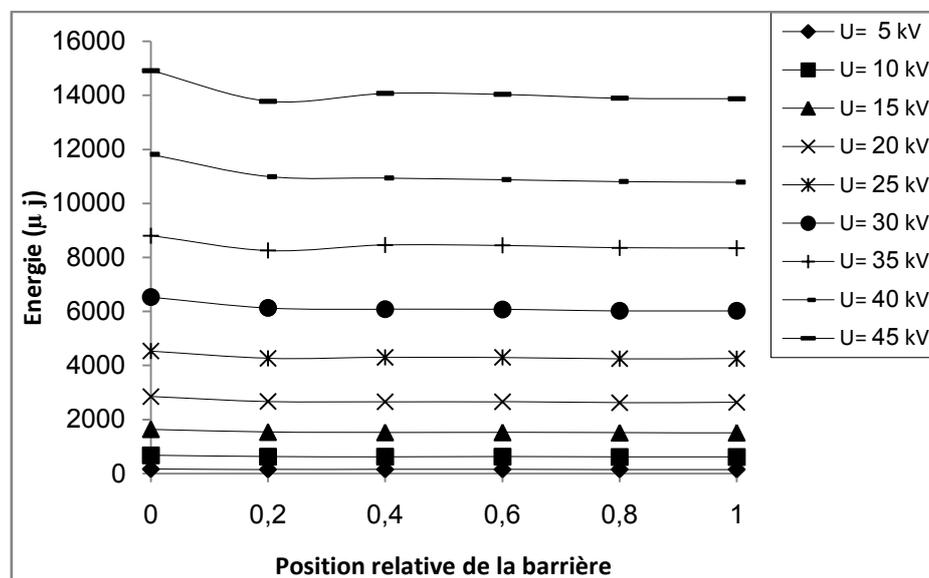
**Figure IV.82:** Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes positions; barrière utilisée : Presspahn ;  $D=10\text{cm}$ ,  $e=2\text{mm}$ ,  $d=10\text{cm}$

Nous constatons d'après la figure IV.82, que pour les barrières en presspahn, l'énergie du système est augmentée par la barrière quand elle est située près de la pointe ( $a/d=0$ ) ce qui est lié à la grande quantité de charge accumulée sur la surface de la barrière.

### IV.3.2.2 Effet de la position de la barrière

L'énergie mise en jeu en phase de préclaquage varie faiblement en fonction de la position de la barrière, cette variation est observée pour les deux types de barrière utilisées (figures IV.83 à IV.86).

Nous constatons que l'énergie du système devient plus importante lorsque la barrière est en contact avec la pointe, et cela pour les niveaux de tension supérieurs: à 30 kV pour une barrière en bakélite (figures IV.83 et IV.84) ; et à 20 kV pour celle en presspahn (figures IV.85 et IV.86). Ceci est dû à l'accumulation d'une grande quantité de charge sur la surface de la barrière à cette position.



**Figure IV.83:** Énergie du système pointe-plan avec barrière en bakélite en fonction de la position pour différents niveaux de tension: D=10cm, e=2mm, d=8cm

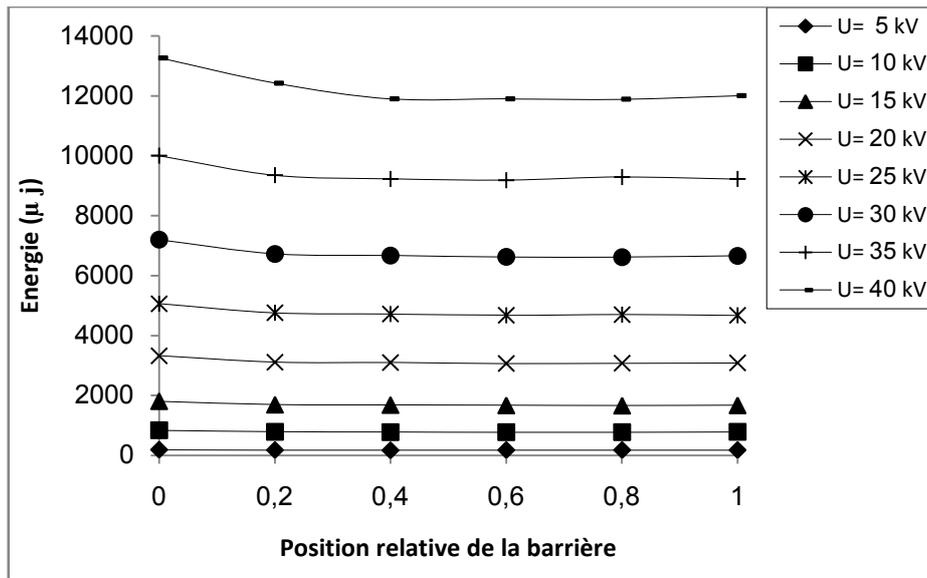


Figure IV.84: Energie du système pointe-plan avec barrière en bakélite en fonction de la position pour différents niveaux de tension: D=20cm, e=4mm, d=8cm

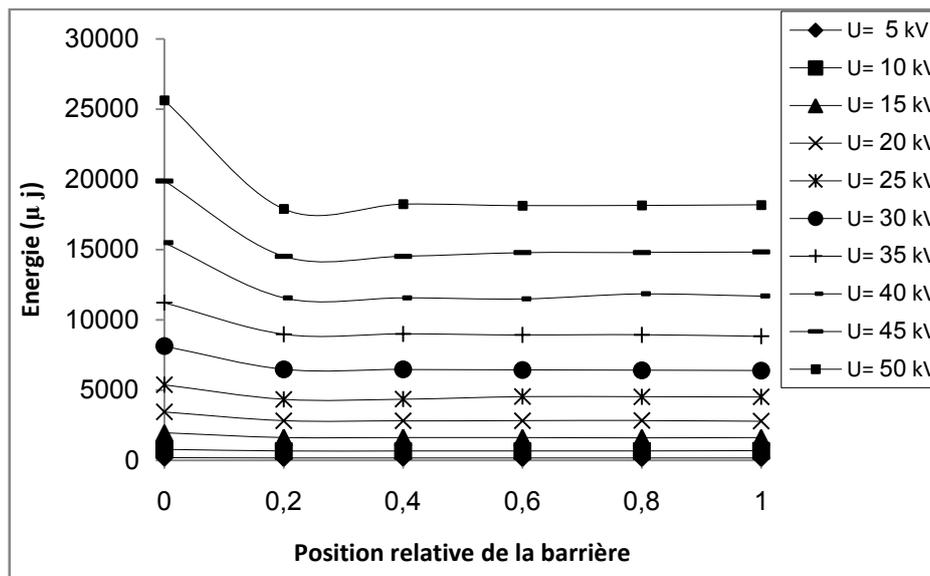
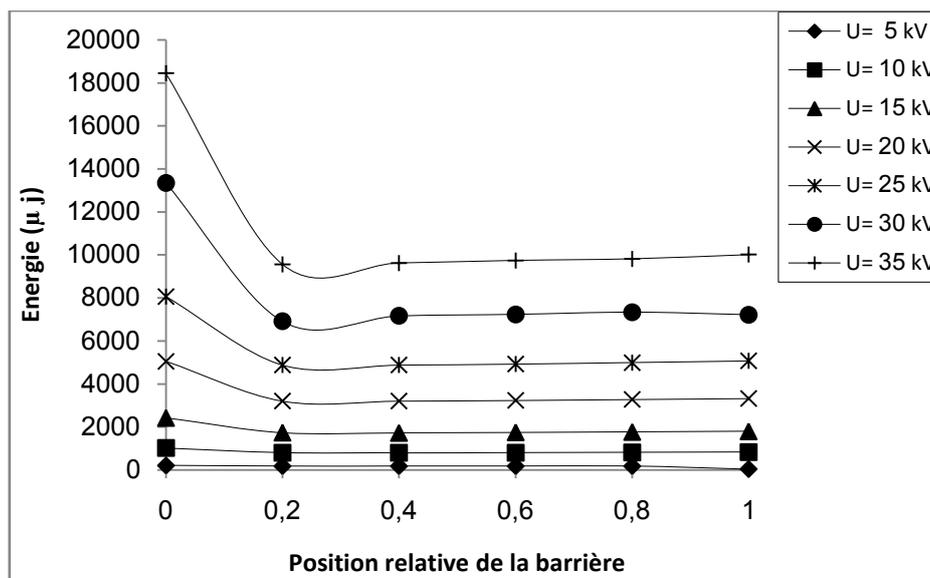


Figure IV.85: Energie du système pointe-plan avec barrière en presspahn en fonction de la position pour différents niveaux de tension: D=10cm, e=2mm, d=8cm



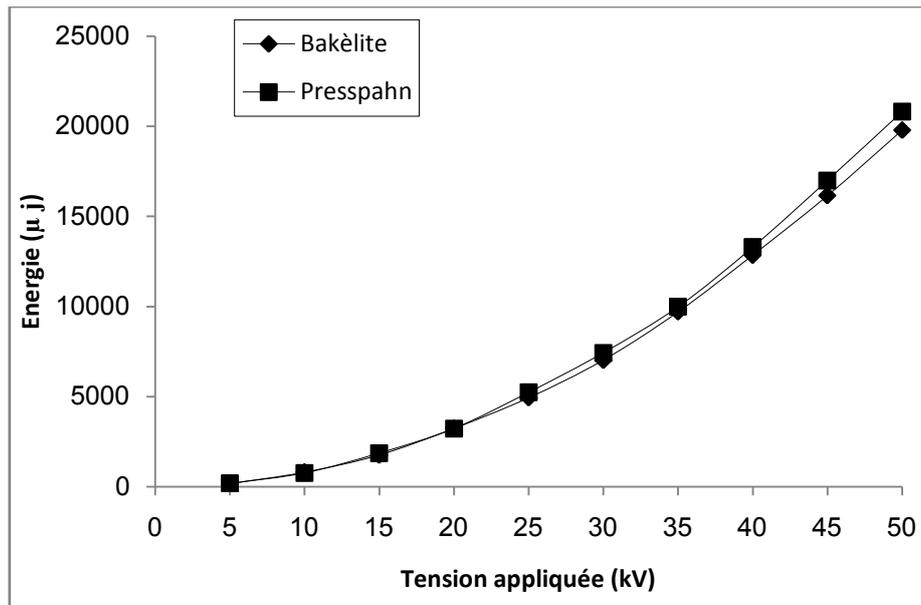
**Figure IV.86:** Energie du système pointe-plan avec barrière en presspahn en fonction de la position pour différents niveaux de tension:  $D=20\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $d=8\text{cm}$

#### IV.4.2.3 Effet de la nature de la barrière

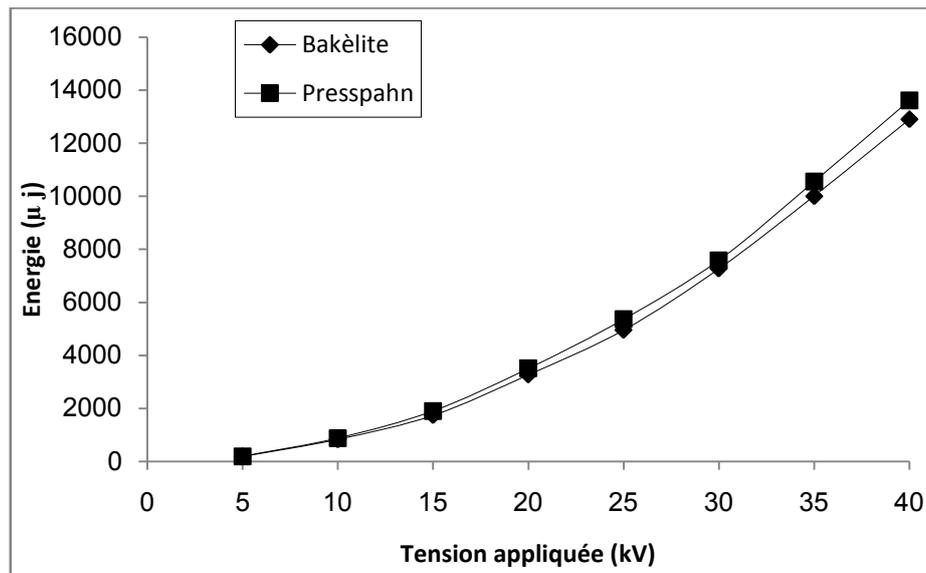
Les caractéristiques présentées aux figures (IV.87 à IV.90) montrent l'évolution de l'énergie en fonction de la tension appliquée pour différents types de barrières.

Nous remarquons que pour deux barrières de mêmes dimensions et de natures différentes, l'augmentation de la tension appliquée engendre l'accroissement de l'énergie, ceci est dû à l'augmentation de charge injectée dans le système pointe-barrière-plan.

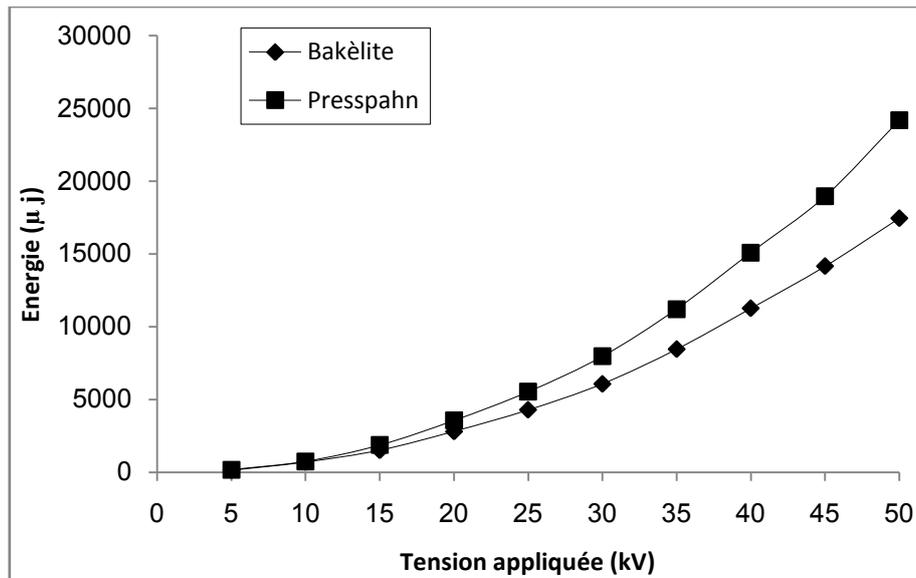
Il est intéressant de noter que cette énergie est plus importante pour la barrière en presspahn que celle en bakélite. L'écart d'énergie entre les deux types de barrières devient plus important quand la barrière est à la position  $a/d=0$ . Cet écart est dû à la différence de permittivité des deux matériaux.



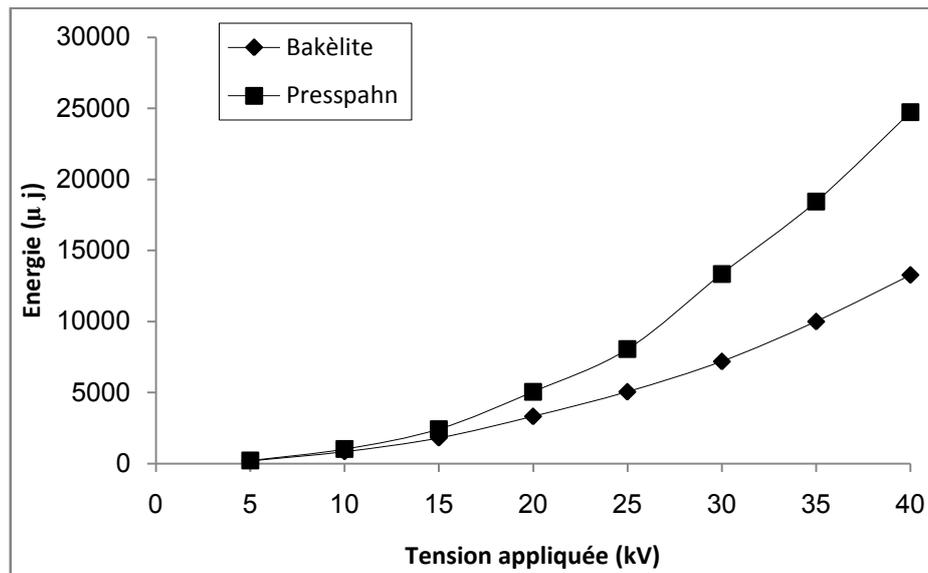
**Figure IV.87:** Énergie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d = 1$



**Figure IV.88 :** Énergie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=20\text{cm}$ ;  $e=4\text{mm}$ ;  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 0.8$



**Figure IV.89:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=10\text{cm}$ ;  $e=2\text{mm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



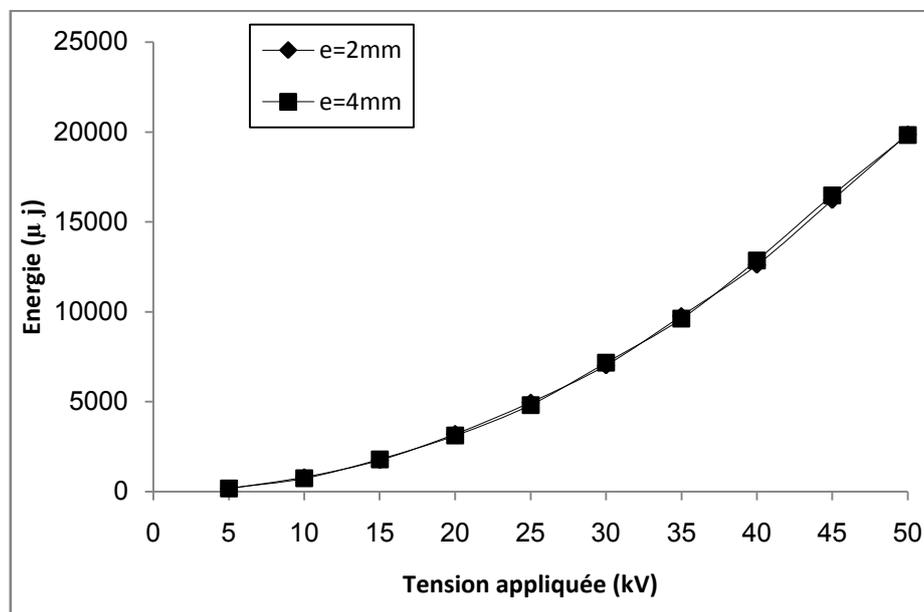
**Figure IV.90:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières l'une en Bakélite et l'autre en Presspahn;  $D=20\text{cm}$ ;  $e=4\text{mm}$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d = 0$

#### IV.3.2.4 Effet de l'épaisseur

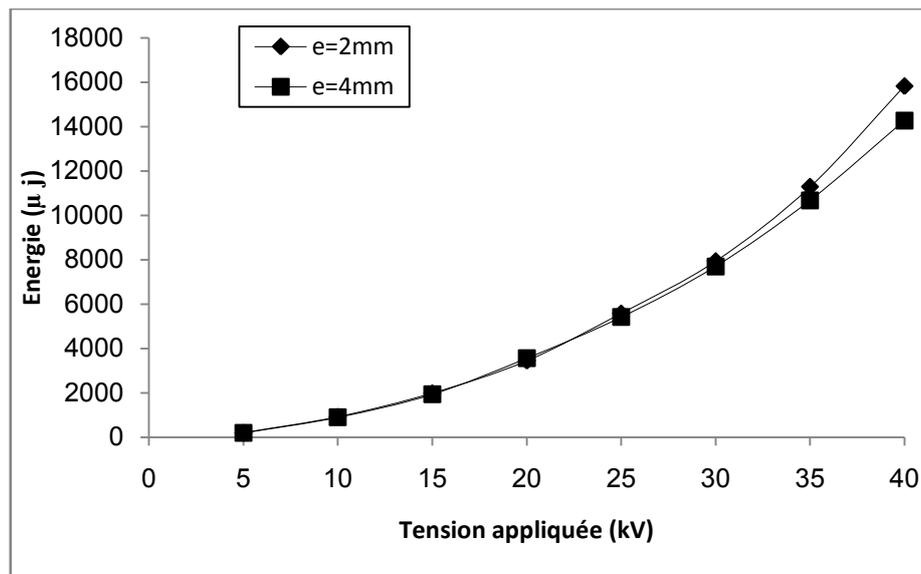
Nous illustrons dans les figures (IV.91 à IV.103) la variation de l'énergie mise en jeu dans le système en fonction de la tension appliquée pour différentes épaisseurs.

Nous remarquons d'après les figures (IV.91 à IV.94) que l'épaisseur de la barrière n'a pas d'influence pour une barrière en bakélite quel que soit son diamètre, sa position par rapport à la pointe, la distance inter-électrodes et la tension appliquée.

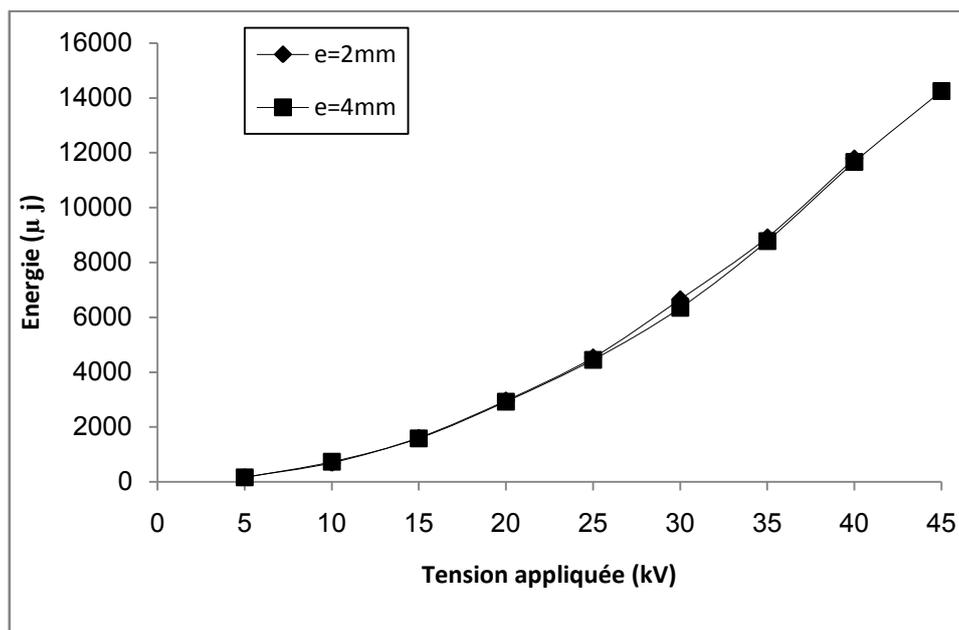
Nous constatons aussi que pour une barrière en presspahn l'effet de l'épaisseur n'intervient pas pour un diamètre de 10cm, quelle que la position de la barrière, la distance inter-électrodes et la tension appliquée (figures IV.95 à IV.97). Par contre pour une barrière de diamètre de 20cm et à la position  $a/d=0$  de toutes les distances inter-électrodes (figures IV.98 et IV.99), ainsi que pour les distances 4cm et 6cm pour toutes les positions (figures IV.100 à IV.103), l'augmentation de l'épaisseur par conséquent le volume du diélectrique entraîne une augmentation de la charge.



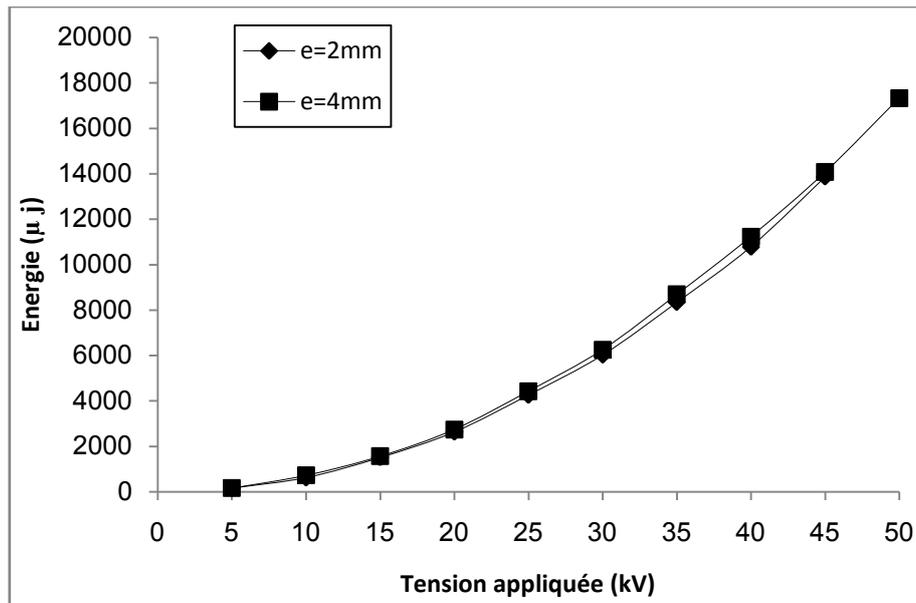
**Figure IV.91:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=10\text{cm}$ ;  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d = 0.6$



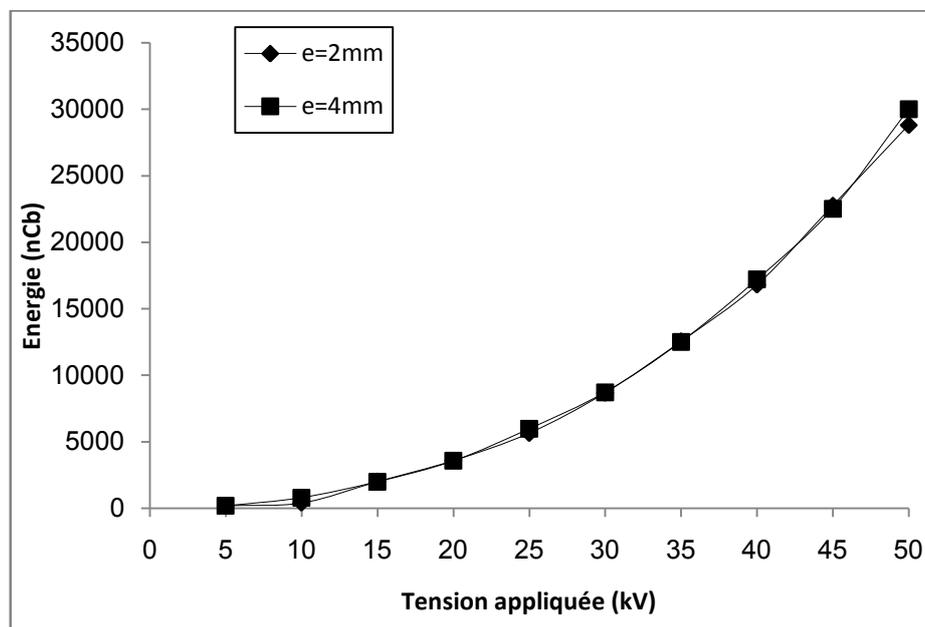
**Figure IV.92:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=20\text{cm}$ ;  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



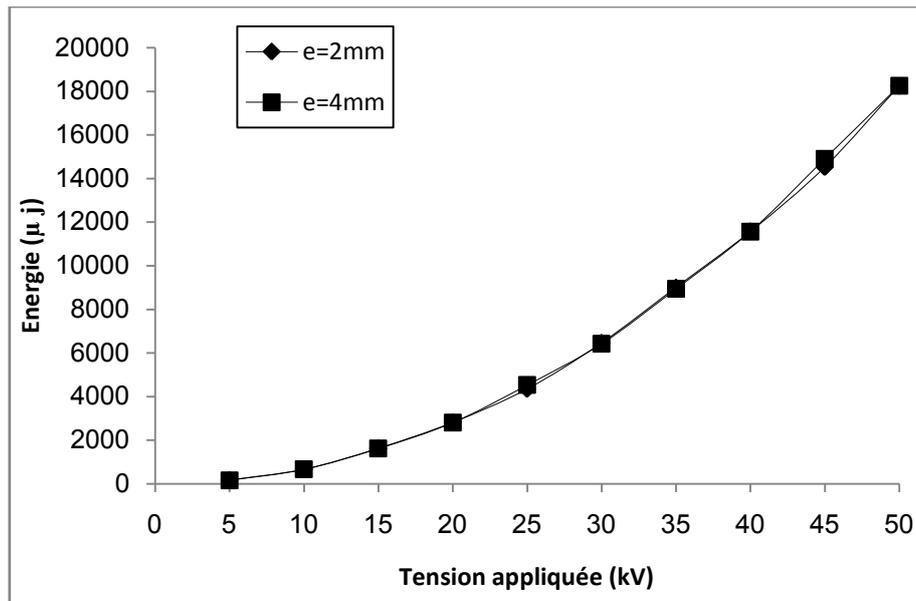
**Figure IV.93:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=20\text{cm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0.2$



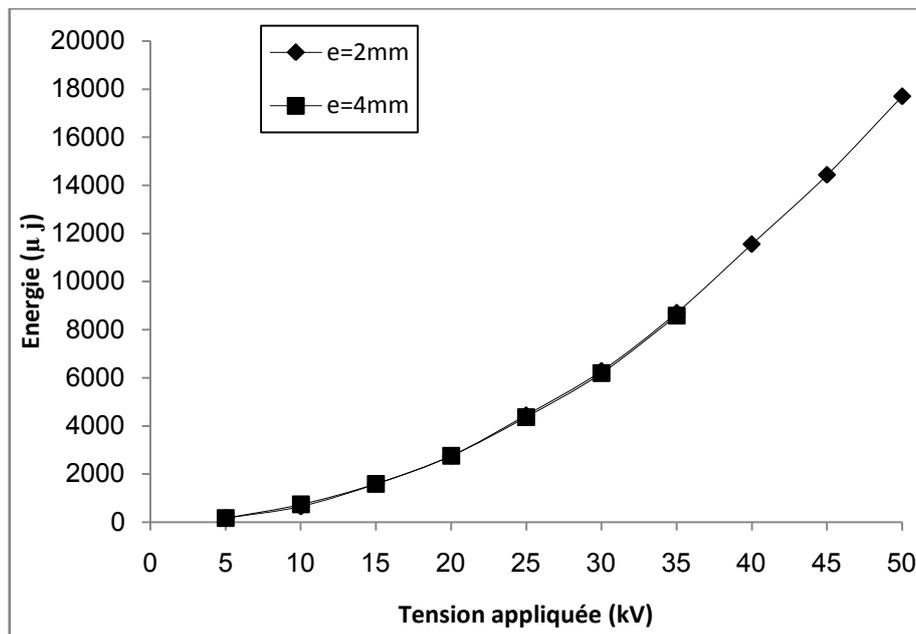
**Figure IV.94:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Bakélite d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=10\text{cm}$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d = 1$



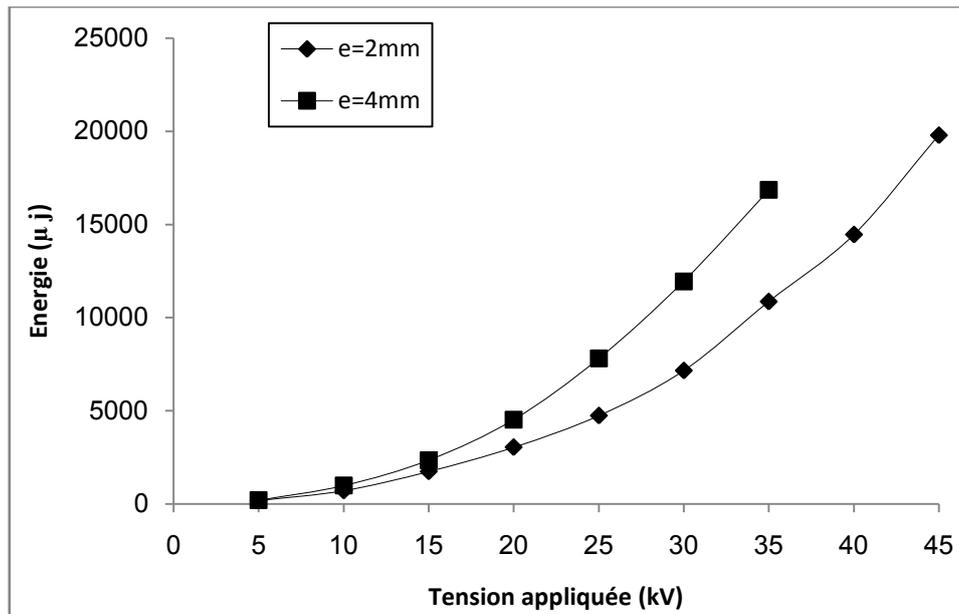
**Figure IV.95:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=10\text{cm}$ ;  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



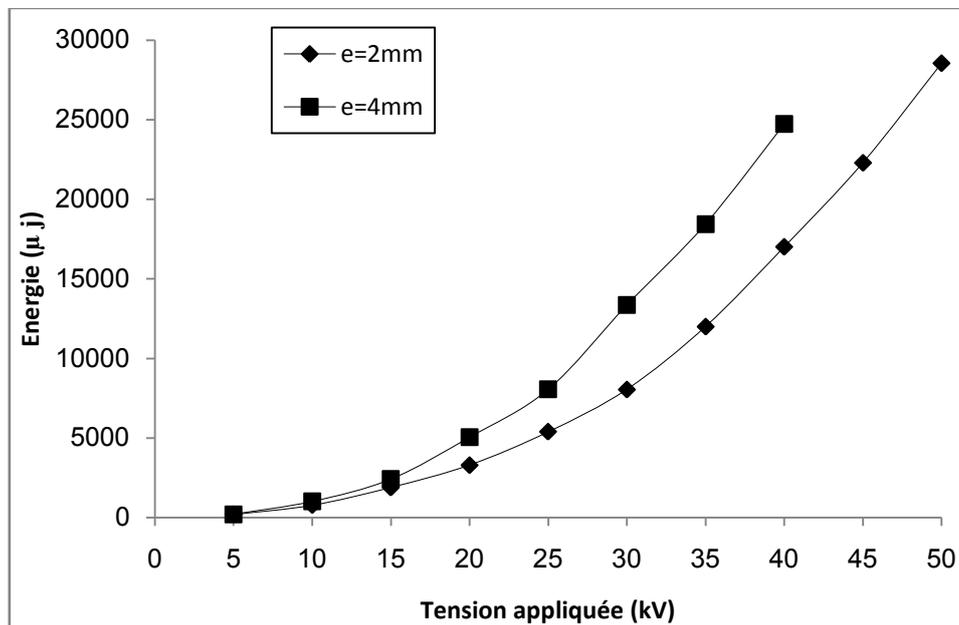
**Figure IV.96:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  $D=10\text{cm}$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d=0.4$



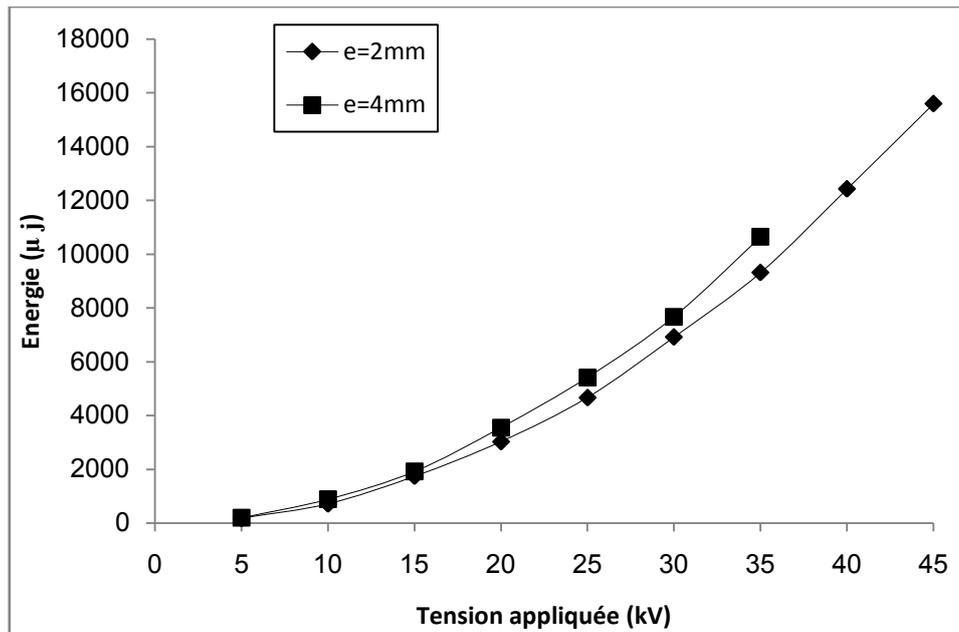
**Figure IV.97 :** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  $D=20\text{cm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0.4$



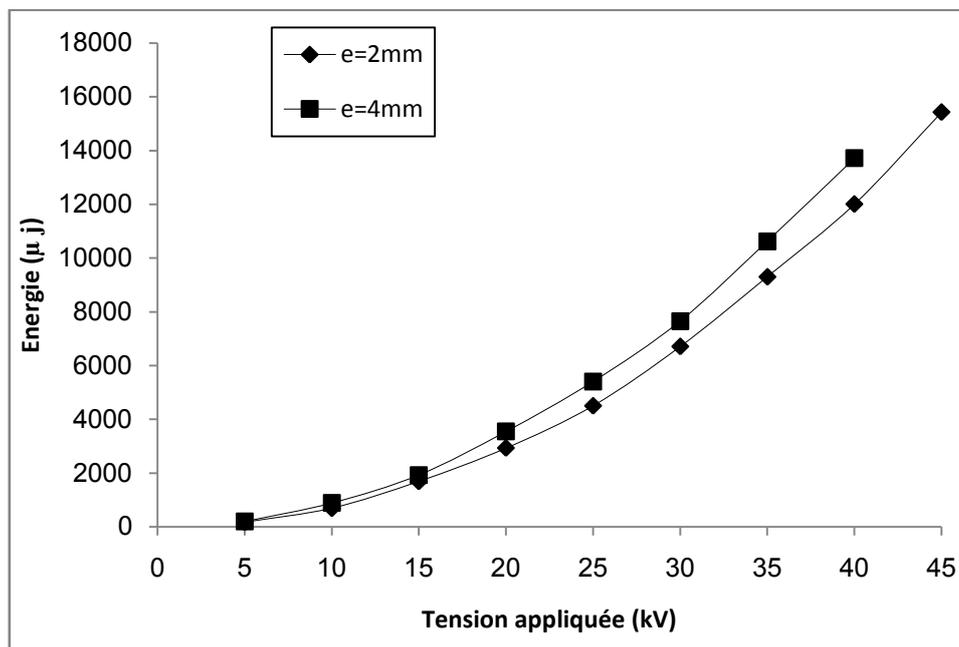
**Figure IV.98:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=20\text{cm}$ ;  $d=10\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



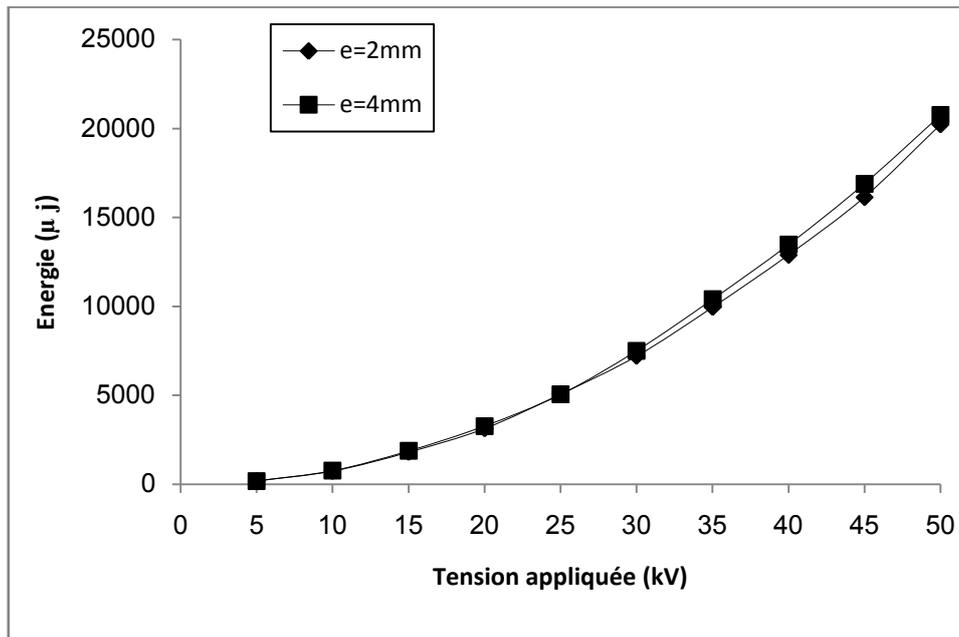
**Figure IV.99:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=20\text{cm}$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



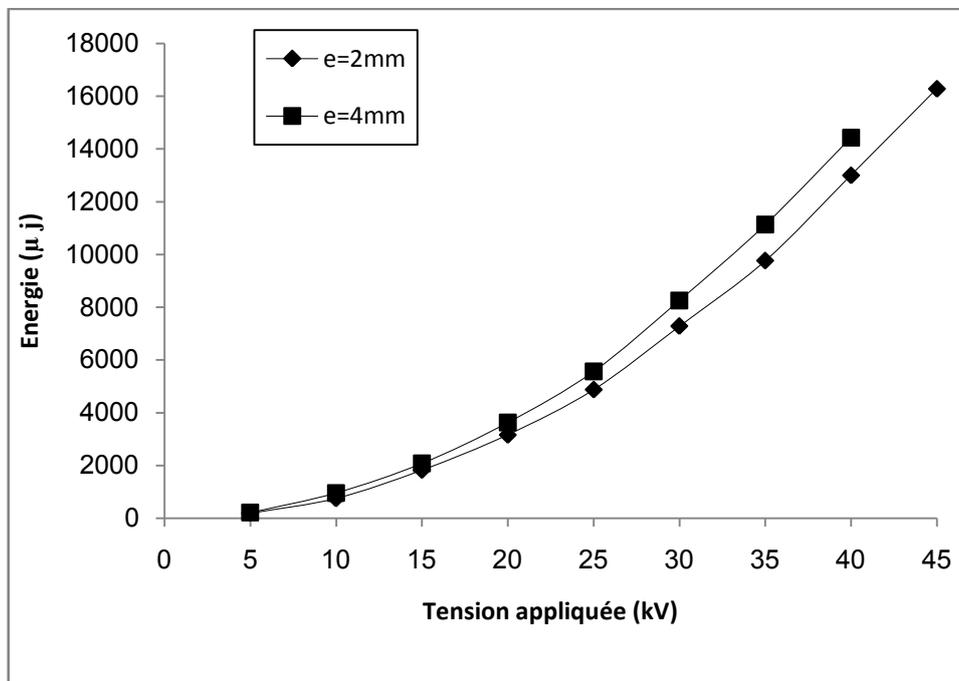
**Figure IV.100:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=20\text{cm}$ ;  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 0.2$



**Figure IV.101:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=20\text{cm}$ ;  $d=6\text{cm}$ ;  $a/d = 1$



**Figure IV.102:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=10\text{cm}$ ;  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d = 0.6$

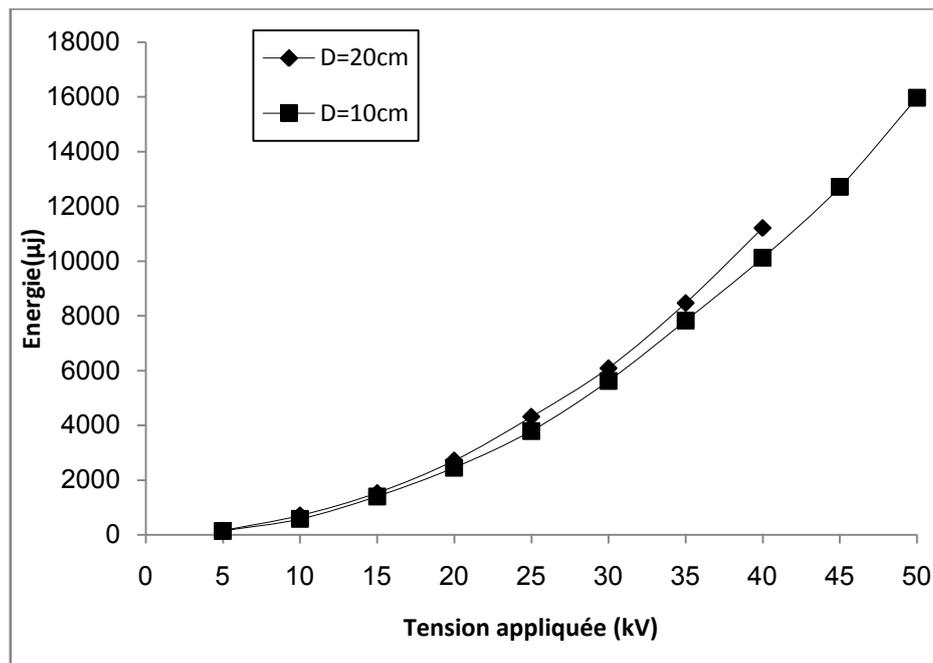


**Figure IV.103:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm);  
 $D=10\text{cm}$ ;  $d=4\text{cm}$ ;  $a/d = 0.4$

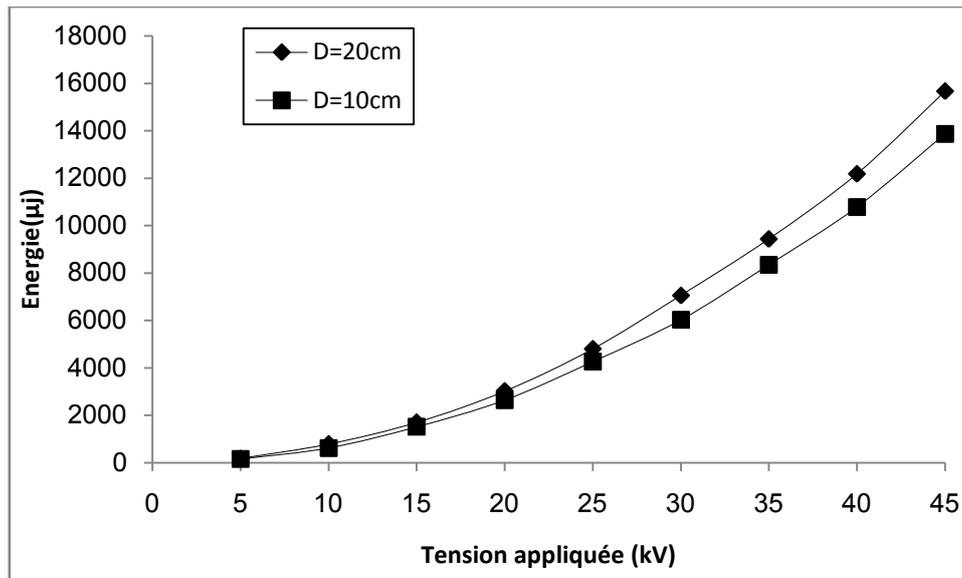
### IV.3.2.5 Effet du diamètre

D'après les figures (IV.104 à IV.108) nous remarquons que l'augmentation du diamètre de la barrière entraîne une augmentation de l'énergie du système utilisé, cela peut être expliqué par l'accroissement de la quantité de charge avec l'augmentation de la surface de la barrière ce qui entraîne une augmentation de l'énergie d'interaction entre les charges.

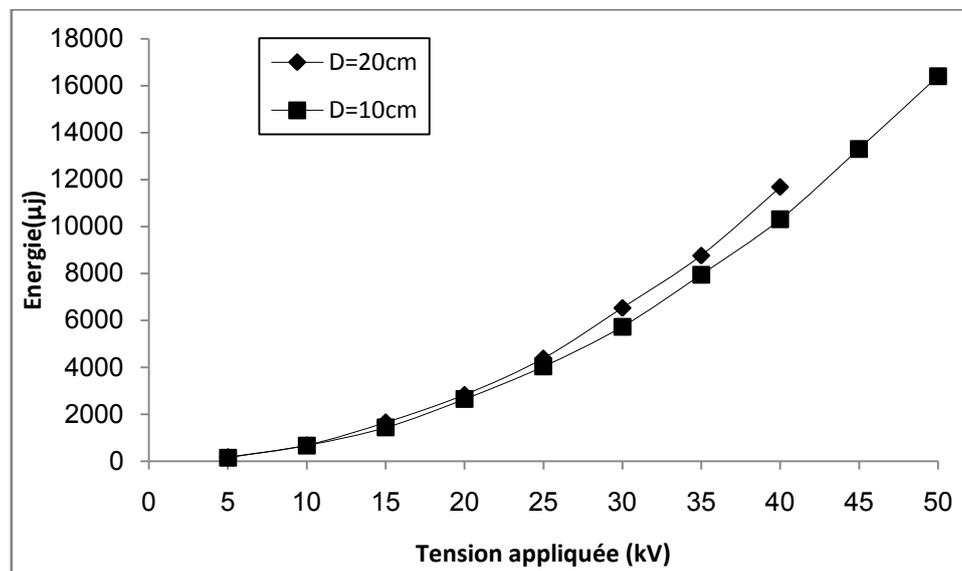
Nous constatons aussi pour une barrière en presspahn (figures IV.107 et IV.108) que cette différence est plus remarquable pour la position  $a/d = 0$ , quelle que soit la distance inter-électrodes.



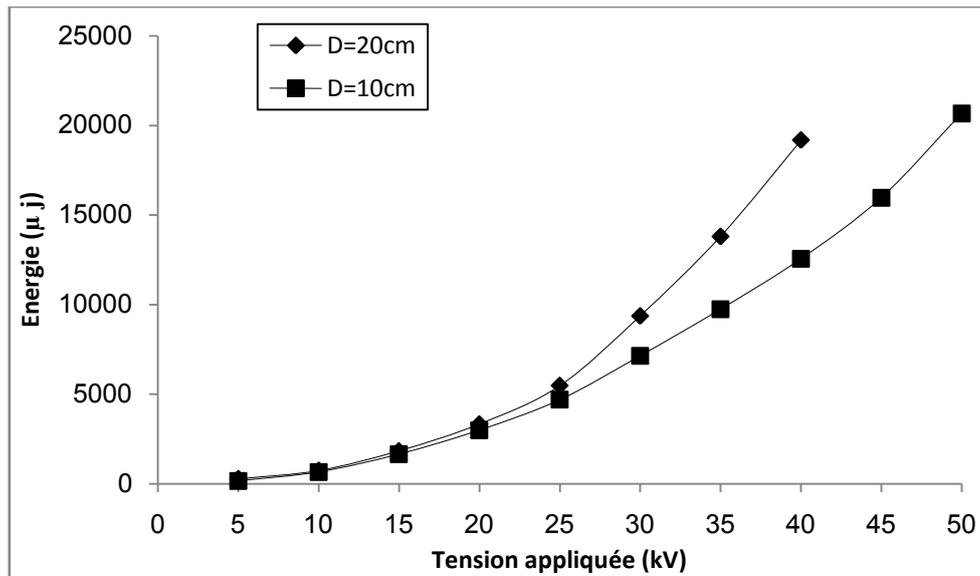
**Figure IV.104:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm);  $e=4\text{mm}$ ;  $d=12\text{cm}$ ;  $a/d = 0.8$



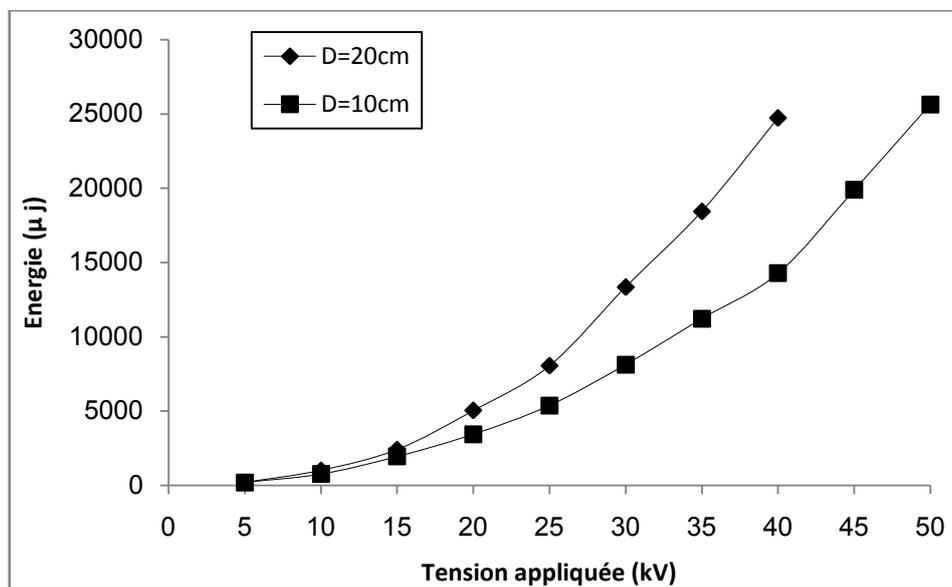
**Figure IV.105:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm);  $e=2\text{mm}$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d = 1$



**Figure IV.106:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm);  $e=4\text{mm}$ ;  $d=12\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



**Figure IV.107:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm);  
 $e=2\text{mm}$ ;  $d=12\text{cm}$ ;  $a/d = 0$



**Figure IV.108:** Energie du système pointe-plan avec barrière en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm);  
 $e=4\text{mm}$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $a/d = 0$

## **IV.5 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'apporter une contribution qualitative à l'influence de certains paramètres électro-géométriques sur la charge apparente de préclaquage de l'huile de transformateur, dans une configuration pointe-plan sous tension alternative 50 Hz, en présence d'une barrière isolante.

Il ressort de ce qui précède que l'insertion d'une barrière isolante dans un système d'électrodes divergent ne dépend pas uniquement des propriétés intrinsèques des deux milieux (liquide et solide) mais surtout des différents processus physico-chimiques apparaissant lors des deux phases (double couche, charges et conduction superficielle...).

Nous pouvons conclure aussi que l'insertion de la barrière diminue significativement la charge de préclaquage et l'énergie moyenne mise en jeu dans le système pointe-plan quelle que soit la nature et les dimensions de la barrière.

*Conclusion  
Générale*

La recherche bibliographique, entreprise dans le cadre de ce travail, nous a permis d'acquérir des connaissances sur les huiles isolantes en général et de l'huile minérale pour transformateur en particulier, ainsi que sur l'influence des barrières isolantes sur la charge de préclaquage et l'énergie du système pointe-plan dans l'huile de transformateur.

Les travaux expérimentaux que nous avons entrepris, ont pour principales conclusions:

- L'augmentation de la tension appliquée entraîne un accroissement linéaire de la charge de préclaquage et l'énergie mise en jeu dans le système pointe-plan.
- La diminution de l'écart de la distance inter-électrodes augmente significativement la charge apparente et l'énergie moyenne du système.
- L'introduction d'une barrière isolante dans un système d'électrodes divergent a pour effet de modifier les valeurs de la charge et de l'énergie du système sans barrière quelle que soit la nature et les dimensions de la barrière.
- Pour les deux types de matériaux étudiés de la barrière, et quelle que soit sa dimension, la position de la barrière n'a pas d'effet sur la charge et l'énergie du système, sauf que pour la position  $a/d=0$  et pour des niveaux de tensions relativement élevés, nous avons trouvé que la barrière augmente la charge et l'énergie du système.
- Pour deux barrières de mêmes dimensions et de natures différentes, nous avons remarqué que la barrière en bakélite est plus efficace que la barrière en presspahn, et cette différence est plus visible lorsque la barrière est en contact avec la pointe ( $a/d=0$ ).
- L'épaisseur de la barrière n'a pas d'influence pour une barrière en bakélite quel que soit son diamètre, sa position par rapport à la pointe, la distance inter-électrodes et la tension appliquée. Par contre pour une barrière en presspahn et pour les distances inter-électrodes de 4 et 6cm, l'augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation de la charge.
- La charge apparente de préclaquage du système dépend du diamètre de la barrière. Plus le diamètre est grand, plus la charge du système est importante, surtout pour la position  $a/d=0$ .

Enfin nous souhaitons que ce travail apporte une contribution sur le plan industriel, pour le but d'assurer une meilleure qualité d'isolation.

Pour les travaux de recherche futurs et en perspective à notre travail, nous proposons une étude sur l'insertion de barrières isolantes d'autres natures dans le volume d'huile. Nous souhaitons qu'une attention soit accordée à une large variation du diamètre de la barrière, son épaisseur, son positionnement (parallèle ou perpendiculaire). L'étude serait d'une importance capitale en étudiant les barrières perforées, ainsi que l'effet de barrières en chaîne.

*Références*  
*bibliographiques*

- [1] **C. Perrier**, "Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance – recherche d'un mélange optimal", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, France, Avril 2005.
- [2] **A. Zouaghi**, " Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu ", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Décembre 1997
- [3] **R. Tobazéon**, "Préclaquage et claquage des liquides diélectrique", Technique de l'ingénieur, D 2450, 2008.
- [4] **F.Kadri et H.Rahali**, "Influence des barrières isolantes sur la tension de décharge disruptive des intervalles d'huile sous tension alternative", Mémoire de projet de fin d'étude, Département Génie électrique, ENP d'Alger, Juin 2008.
- [5] **S. A. Benghezal et H. B. Hammadi**, « Courant de préclaquage dans l'huile de transformateur "Borak22" dans le système pointe-plan avec barrières isolantes », Mémoire de projet de fin d'études, Département Génie électrique, ENP d'Alger, Juin 2009.
- [6] **N. Berger**, " Liquides isolants en électrotechnique : présentation générale " Technique de l'ingénieur, D2470, 2008
- [7] **S.Bouazabia**, "Mécanismes de décharges dans les diélectriques liquides", cours de graduation, Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, 2001.
- [8] **R.Benamar**, " Influence du nombre de claquages sur les propriétés de l'huile de transformateur", Mémoire de Magister, Département Génie électrique, École nationale polytechnique d'Alger, 2008.
- [9] **N. Berger**, « Liquides isolants en électrotechnique : caractéristiques des produits » Technique de l'Ingénieur, D2471, 2008
- [10] **B. Moula**, "Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22 » sous tension alternative 50Hz ", Mémoire de Magister, Département Génie électrique, ENP d'Alger, 2007.
- [11] **D. Khelil et S.Zoutat**, " Etude des phénomènes de décharge électrique dans la Borak 22 sous tension alternative», Projet de Fin d'Études, Département Génie électrique, École nationale polytechnique d'Alger, 2006.
- [12] **N.Aouchar, C.Bekhaled**, "Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur", Projet de fin d'études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.

[13] **B. Boubekki**, " Mesure du champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre », Mémoire de Magister, Département Génie électrique, École nationale polytechnique d'Alger, 2006.

[14] **Z. Djemai**, " Détermination de la dimension fractale des décharges électrique radiale sur les surfaces isolantes", Thèse de Doctorat, Département Génie électrique, ENP d'Alger, 1999.

[15] **L. Kebbabi**, " Caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale ", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Mars 2006.

[16] **A. BOUBAKEUR**, «Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe –plan». Thèse de doctorat, EP Varsovie, Pologne, 1979.

[17] **N. T. Aka**, " Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides - modèles de génération et de propagation des streamers", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, France, juin 2000.