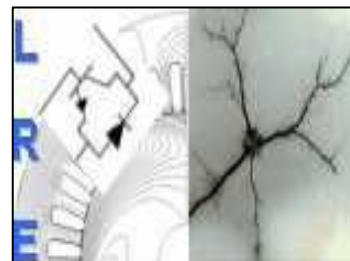


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Thèse de Doctorat es Sciences

Présentée par :

Fettouma GUERBAS

Magister en Electrotechnique E.N.P.

Thème

**Influence des Barrières sur la Rigidité Diélectrique de l'Huile
Minérale**

Soutenue le 20 juin 2011 devant le jury composé de:

Président:	MEKHALDI Abdelouahab	Professeur ENP
Rapporteur:	BOUBAKEUR Ahmed	Professeur ENP
Co-Rapporteur	BEROUAL Abderrahmane	Professeur ECLyon
Examineurs:	TEGUAR Madjid	Professeur ENP
	BOUCHEFFA Youcef	Professeur EMP
	BOUAZABIA Slimane	Maître de Conférences USTHB
	MOULAI Hocine	Maître de Conférences USTHB
Invitée :	RAHAL Dalal	SKMK-SONELGAZ

Année Universitaire 2010-2011

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Phénomènes de claquage dans les structures isolantes mixtes	
Introduction.....	4
I.1 Huiles isolantes.....	4
I.2 Composition chimique.....	5
I.3 Propriétés des huiles isolantes.....	6
I.3.1 Les propriétés électriques.....	6
I.3.1.1 La permittivité relative ou constante diélectrique.....	6
I.3.1.2 La résistivité transversale.....	6
I.3.1.3 La résistivité superficielle.....	7
I.3.1.4 La conductivité.....	7
I.3.1.5 La rigidité diélectrique et la tension de claquage.....	7
I.3.1.6 Le facteur de dissipation diélectrique.....	7
I.3.2 Propriétés physiques.....	8
I.3.2.1 La Viscosité.....	8
I.3.2.2 Point d'écoulement.....	8
I.3.2.3 Le point d'éclair.....	9
I.3.2.4 Le point de feu.....	9
I.3.2.5 Capacité et conductivité thermique.....	9
I.3.2.6 Aspect et couleur.....	9
I.3.3 Propriétés chimiques.....	9
I.3.3.1 L'acidité.....	9
I.3.3.2 Oxydation des huiles minérales isolantes.....	10
I.3.3.3 Teneur en eau.....	10
I.4 Claquage des liquides diélectriques.....	11
I.4.1 Mécanisme électronique.....	11
I.4.2 Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse.....	12
I.4.2.1 Mécanisme thermique.....	13
I.4.2.2 Mécanisme de cavitation.....	14
I.4.2.2.1 Cavitation d'origine électrique.....	14
I.4.2.2.2 Cavitation électro hydrodynamique.....	14
I.4.3 Claquage par pont.....	15
I.4.3.1 Origine des particules.....	15
I.4.3.2 Teneur des particules.....	15
I.4.3.3 Rôle des particules dans le claquage.....	15
I.4.3.3.1 Particules isolantes.....	16
I.4.3.3.2 Particules conductrices.....	16
I.4.4 Longues décharges dans les liquides.....	16
I.5 Facteurs influant sur la rigidité diélectrique des liquides.....	16
I.5.1 Paramètres électro géométriques.....	16
I.5.2 Pression hydrostatique.....	17
I.5.3 Température.....	17
I.5.4 La tension.....	17
I.5.5 L'humidité.....	17
I.6 Claquage des solides.....	18

I.6.1	Phénomènes de polarisation.....	18
I.6.2	Mécanismes de claquage des isolants solides.....	19
I.6.2.1	Claquage électrique.....	19
I.6.2.1.1	Claquage électrique intrinsèque.....	19
I.6.2.1.2	Claquage électrique par avalanche.....	20
I.6.2.2	Claquage thermique.....	20
I.6.2.3	Claquage électromécanique.....	20
I.6.2.4	Claquage du aux décharges partielles.....	21
I.6.2.5	Claquage du à la charge d'espace.....	21
I.7	Phénomènes de décharge électrique à l'interface solide/liquide.....	21
I.7.1	Mise en évidence d'effet d'interface.....	22
I.7.2	Double couche.....	22
I.7.3	Contournement.....	23
I.7.4	Décharges glissantes aux interfaces liquide/solide.....	23
I.8	Influence des barrières isolantes dans les intervalles d'air.....	23
I.8.1	Influence du type de tension.....	25
I.8.2	Influence de la polarité de l'électrode pointe.....	25
I.8.3	Influence de la position de la barrière.....	26
I.8.4	Influence des dimensions et du nombre de barrière.....	26
I.8.5	Influence de la perforation de la barrière.....	26
I.8.6	Influence du matériau de la barrière.....	26
I.8.7	Influence de l'accumulation de la charge d'espace.....	27
I.8.8	Formes des décharges Observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante.....	27
I.9	Influence des barrières isolantes sur la rigidité de l'huile.....	28
I.9.1	Influence de la polarité.....	28
I.9.2	Influence de la position de la barrière.....	29
I.9.3	Influence de la distance inter-électrodes.....	29
I.9.4	Influence des dimensions et du nombre de barrières.....	30
I.9.5	Influence de la perforation de la barrière.....	32
I.9.6	Influence de la nature de la barrière.....	32
I.10	Conclusion.....	33

Chapitre II : Techniques et méthodes de mesures expérimentales

II.1	Introduction.....	35
II.2	Techniques expérimentales.....	35
II.2.1	Cellule d'essais.....	35
II.2.2	Les barrières isolantes.....	36
II.2.3	Caractéristiques des matériaux utilisés.....	37
II.2.4	Présentation de l'huile.....	37
II.2.5	Circuits d'essais et de mesure.....	38
II.3	Circuits de mesure.....	39
II.3.1	Mesure de la tension de claquage.....	39
II.3.2	Mesure du courant et de la charge.....	39
II.4	Forme du courant.....	39
II.5	Forme de la charge.....	41
II.6	Analyses physico-chimiques.....	42
II.6.1	Mesure de la viscosité cinématique à 20°C.....	42
II.6.2	Mesure de l'indice de couleur.....	43

II.6.3	Mesure du point d'éclair.....	44
II.6.4	Mesure de l'indice de réfraction.....	45
II.6.5	Mesure de l'indice d'acidité.....	46
II.6.6	Mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité à 90°C.....	47
II.6.6.1	Permittivité relative.....	48
II.6.6.2	Facteur de pertes diélectriques.....	49
II.7	Conclusion.....	50

Chapitre III : Influence des barrières isolantes sur la tension de claquage

III.1	Introduction.....	52
III.2	Essais sans barrière.....	52
III.2.1	Influence de la distance inter-électrodes.....	52
III.2.2	Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe.....	53
III.2.3	Rigidité diélectrique.....	53
III.3	Essais avec barrière.....	54
III.3.1	Influence de la position de la barrière.....	54
III.3.2	Influence de distance inter-électrodes.....	57
III.3.3	Influence des dimensions de la barrière.....	59
III.3.3.1	Influence du diamètre de la barrière.....	59
III.3.3.2	Influence de l'épaisseur de la barrière.....	62
III.3.3.3	Influence de la nature de la barrière.....	64
III.4	Influence de la barrière sur la trajectoire de la décharge.....	66
III.5	Discussion.....	70
III.6	Conclusion.....	71

Chapitre IV : Influence des barrières isolantes sur le courant et la charge de pré claquage

IV.1	Introduction.....	73
IV.2	Courant de pré claquage.....	73
IV.2.1	Essais sans barrière.....	73
IV.2.1.1	Effet de la tension appliquée sur le courant.....	73
IV.2.1.2	Effet de la distance inter-électrodes sur le courant.....	74
IV.2.2	Essais avec barrière.....	75
IV.2.2.1	Effet de l'insertion de la barrière.....	75
IV.2.2.2	Effet de la position de la barrière.....	77
IV.2.2.3	Effet de la distance inter-électrodes.....	79
IV.2.2.4	Effet des dimensions de la barrière.....	80
IV.2.2.4.1	Effet du diamètre de la barrière.....	80
IV.2.2.4.2	Effet de l'épaisseur et de la nature de la barrière.....	81
IV.3	Variation de l'impédance apparente.....	84
IV.3.1	Système pointe –plan.....	84
IV.3.2	Système pointe –barrière –plan.....	85
IV.4	La charge de pré claquage.....	88
IV.4.1	Essais sans barrière.....	89
IV.4.1.1	Effet de la tension appliquée sur la charge de pré claquage.....	89
IV.4.1.2	Effet de la distance inter-électrodes sur la charge de pré claquage.....	89
IV.4.2	Essais avec barrière.....	90
IV.4.2.1	Effet de l'insertion de la barrière.....	90
IV.4.2.2	Effet de la tension appliquée.....	92
IV.4.2.3	Effet de la distance inter-électrodes.....	94
IV.4.2.4	Effet de position de la barrière.....	96

IV.4.2.5 Effet de la nature de la barrière.....	98
IV.4.2.6 Effet de l'épaisseur de la barrière.....	101
IV.4.2.7 Effet du diamètre de la barrière.....	103
IV.5 Energie moyenne du système.....	103
IV.5.1 Energie moyenne pour un système pointe-plan sans barrière.....	105
IV.5.1.1 Influence de la tension appliquée.....	105
IV.5.1.2 Influence de la distance inter-électrodes.....	106
IV.5.2 Energie pour un système pointe-plan avec barrière.....	107
IV.5.2.1 Effet de l'insertion de la barrière.....	107
IV.5.2.2 Effet de la position de la barrière.....	108
IV.5.2.3 Effet de la nature et de l'épaisseur de la barrière.....	109
IV.5.2.4 Effet du diamètre de la barrière.....	111
IV.6 Discussion.....	113
IV.7 Conclusion.....	114
Conclusion générale.....	116
Bibliographies.....	119

Liste des figures

Figure I.1 : Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative.....	17
Figure I.2 : Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau.....	18
Figure I.3 : Processus de rupture électromécanique.....	21
Figure I.4 : décharges à l'interface liquide/solide dans un système pointe-plan.....	22
Figure I.5 : Schéma de la double couche selon le modèle de Stern.....	23
Figure I.6 : Décharge directe et par étapes (décharge glissante).....	28
Figure I.7 : Tension du claquage U_{50} en fonction de la position de la barrière pour les deux polarités.....	29
Figure I.8 Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de la barrière pour les deux polarités.....	30
Figure I.9 : Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative.....	31
Figure I.10 : Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive.....	31
Figure I.11 : Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative.....	32
Figure I.12 : Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative.....	33
Figure II.1 : Vue de la cellule d'essais.....	36
Figure II.2 : Schéma de la cellule d'essais, vue de face.....	36
Figure II.3 : Forme de la barrière utilisée.....	37
Figure II.4 : Circuit d'essai.....	38
Figure II.5 : Signaux courant-tension, pour une tension appliquée de 10kV, d=4cm.....	40
Figure II.6 : Signaux courant-tension, pour une tension appliquée de 25kV, d=4cm.....	40
Figure II.7 : Signaux charge- tension pour une tension appliquée $U=5kV$ d=6cm, système sans barrière.....	41
Figure II.8 : Signaux charge- tension pour une tension appliquée système $U=5kV$ d=4cm, système avec barrière.....	42
Figure II.9 : Viscosimètre TAMSON (PMT) utilisé dans la mesure de la viscosité.....	43

Figure II.10 : Variation de la viscosité cinématique en fonction du nombre de claquages.....	43
Figure II.11 : Colorimètre LOVIBOND utilisé dans la mesure de l'indice de couleur.....	44
Figure II.12 : Variation de l'indice de couleur en fonction du nombre de claquages.....	44
Figure II.13 : Auto flash GALLEKAMP utilisé dans la mesure du point d'éclair.....	45
Figure II.14 : Variation du point d'éclair en fonction du nombre de claquages.....	45
Figure II.15 : Réfractomètre utilisé dans la mesure de l'indice de réfraction.....	46
Figure II.16 : Variation de l'indice de réfraction en fonction du nombre de claquages.....	46
Figure II.17 : Variation de l'indice d'acidité en fonction du nombre de claquages.....	47
Figure II.18 : Dieltest DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité relative.....	48
Figure II.19 : Variation de la permittivité relative en fonction du nombre de claquages.....	48
Figure II.20 : Variation du facteur de pertes diélectriques à 90°C en fonction du nombre de Claquages.....	49
Figure III.1 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour différents rayons de courbures de la pointe.....	52
Figure III.2 : Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes.....	53
Figure III.3 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes.....	54
Figure III.4 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du rayon de courbure de la pointe.....	54
Figure III.6 : Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en presspahn.....	55
Figure III.7 : Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite.....	55
Figure III.8 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	56
Figure III.9 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	56
Figure III.10 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	57

Figure III.11 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative e=2mm, D=20cm, r _p =6mm.....	57
Figure III.12 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative e=4mm, D=20cm, r _p =6mm.....	58
Figure III.13 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative e=4mm, D=20cm, r _p =6mm.....	58
Figure III.14 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différents diamètres, e=2mm, d=6cm, r _p =6mm.....	59
Figure III.15 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différents diamètres e=2mm, d=10cm, r _p =6mm.....	60
Figure III.16 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différents diamètres e=2mm, d=12cm, r _p =6mm.....	60
Figure III.17 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différents diamètres e=2mm, d=6cm, r _p =6mm.....	61
Figure III.18 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différents diamètres e=2mm, d=10cm, r _p =6mm.....	61
Figure III.19 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différents diamètres e=2mm, d=12cm, r _p =6mm.....	62
Figure III.20 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs d=10cm, D=10cm, r _p =6mm.....	62
Figure III.21 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs d=10cm, D=20cm r _p =6mm.....	63
Figure III.22 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs d=10cm, D=10cm, r _p =6mm.....	63
Figure III.23 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs d=10cm, D=20cm,r _p =6mm.....	64
Figure III.24 : Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, e=2mm, d=4cm, D=10cm, r _p =6mm.....	65
Figure III.25 : Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, e=4mm, d=4cm, D=10cm, r _p =6mm.....	65
Figure III.26 : Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, e=2mm, d=4cm, D=20cm, r _p =6mm.....	66
Figure III.27 : Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, e=4mm, d=4cm, D=20cm, r _p =6mm.....	66
Figure III.28 : Arrangement des électrodes et la barrière.....	67

Figure III.29 : Equivalence géométrique entre les distances inter-électrodes avec et sans barrière.....	67
Figure III.30 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes positions de la barrière en presspahn, $e_p=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $r_p=6\text{ mm}$	68
Figure III.31 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, Pour différentes positions de la barrière en presspahn, $e_p=2\text{ mm}$, $D=20\text{ cm}$, $r_p=6\text{ mm}$	68
Figure III.32 : Détermination des distances d' gr.....	69
Figure IV.1 : Variation du courant de pré claquage en fonction de la tension appliquée, pour un système pointe-plan sans barrière, $r_p=6\text{ mm}$	74
Figure IV.2 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour un système pointe-plan sans barrière, $r_p=6\text{ mm}$	74
Figure IV.3 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes, barrière en bakélite, $e=2\text{ mm}$, $D=20\text{ cm}$, $a/d=0.2$, $U=10\text{ kV}$, $r_p=6\text{ mm}$	75
Figure IV.4 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes barrière en bakélite, $e=2\text{ mm}$, $D=20\text{ cm}$, $a/d=0.2$, $U=20\text{ kV}$, $r_p=6\text{ mm}$	76
Figure IV.5 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes barrière en presspahn, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $a/d=1$, $U=5\text{ kV}$, $r_p=6\text{ mm}$	76
Figure IV.6 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes barrière en presspahn, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $a/d=1$, $U=10\text{ kV}$, $r_p=6\text{ mm}$	77
Figure IV.7 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $d=10\text{ cm}$, $r_p=6\text{ mm}$	77
Figure IV.8 : Variation du courant de pré claquage en fonction de la tension appliquée, barrière en bakélite, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $d=10\text{ cm}$, $r_p=6\text{ mm}$	78
Figure IV.9 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée, barrière en bakélite, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $d=10\text{ cm}$, $r_p=6\text{ mm}$	78
Figure IV.10 : Atténuation du courant en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $d=10\text{ cm}$, $r_p=6\text{ mm}$	79
Figure IV.11 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la distance inter-électrodes pour une barrière en bakélite, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{ mm}$	79
Figure IV.12 : Variation du courant de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour une barrière en presspahn, $e=2\text{ mm}$, $D=10\text{ cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{ mm}$	80
Figure IV.13 : Atténuation du courant en fonction de la tension appliquée pour différents diamètres de la barrière en presspahn, $e=2\text{ mm}$, $a/d=1$, $d=4\text{ cm}$	80
Figure IV.14 : Atténuation du courant en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, $e=2\text{ mm}$, $a/d=0.2$, $d=4\text{ cm}$	81

Figure IV.15 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $a/d=0.2$, $D=10\text{cm}$, $U=10\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$	81
Figure IV.16 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $a/d=0.2$, $D=10\text{cm}$, $U=20\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$	82
Figure IV.17 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $a/d=0.2$, $D=10\text{cm}$, $U=25\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$	82
Figure IV.18: Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour différents matériaux de la barrière, $e=2\text{mm}$, $a/d=0.2$, $D=20\text{cm}$, $d=4\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	83
Figure IV.19: Courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différents matériaux de la barrière, $e=2\text{mm}$, $a/d=0$, $D=20\text{cm}$, $d=4\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	83
Figure IV.20: Courant de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différents matériaux de la barrière, $e=2\text{mm}$, $a/d=0.2$, $D=20\text{cm}$, $d=4\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	84
Figure IV.21: Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée, système sans barrière, $r_p=6\text{mm}$	85
Figure IV.22 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la distance inter-électrodes, système sans barrière, $r_p=6\text{mm}$	85
Figure IV.23: Variations de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée, barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	86
Figure IV.24 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée, barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	86
Figure IV.25: Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$	87
Figure IV.26 : Variations de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{mm}$	87
Figure IV.27 : Variation de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$	88
Figure IV.28 : Variation de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{mm}$	88
Figure IV.29: charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan sans barrière pour différentes distances inter-électrodes, $r_p=6\text{mm}$	89
Figure IV.30: charge de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan sans barrière pour différents niveaux de tension, $r_p=6\text{mm}$	90
Figure IV.31: Atténuation de la charge de la barrière en bakélite en fonction de sa position : $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$	91
Figure IV.32: Atténuation de la charge de la barrière en bakélite en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$ $r_p=6\text{mm}$	91
Figure IV.33 : Atténuation de la charge de la barrière en presspahn en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$, $e=4\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$	92

Figure IV.34 : Atténuation de la charge de la barrière en presspahn en fonction de sa position: D=10cm, e=2mm, d=10cm et U=35kV, $r_p=6\text{mm}$	92
Figure IV.35 : Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan, barrière en bakélite D=10cm, e=2mm, d=12cm, $r_p=6\text{mm}$	93
Figure IV.36: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan, barrière en bakélite, D=20cm, e=2mm, d=12cm, $r_p=6\text{mm}$	93
Figure IV.37: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan, barrière en presspahn, D=10cm, e=2mm, d=12cm, $r_p=6\text{mm}$	94
Figure IV.38 : Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan, barrière en presspahn, D=20cm, e=2mm, d=12cm, $r_p=6\text{mm}$	94
Figure IV.39: La charge de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes , barrière en bakélite: D=10cm, e=2mm, a/d=0, $r_p=6\text{mm}$	95
Figure IV.40: La charge de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes, barrière en presspahn: D=10cm, e=4mm, a/d=0, $r_p=6\text{mm}$	95
Figure IV.41 : Charge de pré claquage en fonction de la tension appliqué, barrière en bakélite, D=10cm, e=2mm, a/d=0 $r_p=6\text{mm}$	96
Figure IV.42: Charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, D=10cm, e=2mm, a/d=0, $r_p=6\text{mm}$	96
Figure IV.43: Charge de pré claquage en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite, pour différents niveaux de tension : D=10cm, e=2mm, d=8cm, $r_p=6\text{mm}$	97
Figure IV.44: Charge de pré claquage en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn pour différents niveaux de tension, D=10cm, e=2mm, d=8cm, $r_p=6\text{mm}$	97
Figure IV.45: Atténuation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes, barrière en bakélite; D=10cm, e=2mm et U=30kV, $r_p=6\text{mm}$	98
Figure IV.46 : Atténuation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes, barrière en presspahn; D=10cm, e=2mm et U=30kV, $r_p=6\text{mm}$	98
Figure IV.47: Atténuation de la charge en fonction la distance inter-électrodes et la nature de la barrière, D=10cm; e=2mm; U=10kV; d=6cm.....	99
Figure IV.48: Atténuation de la charge en fonction la distance inter-électrodes et la nature de la barrière : D=10cm; e=4mm; U=5kV; d=4cm, $r_p=6\text{mm}$	99
Figure IV.49: Atténuation de la charge en fonction de la position et la nature de la barrière: D=10cm, e=2mm, d=12cm et U=5kV, $r_p=6\text{mm}$	100
Figure IV.50: La charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée et la nature de la barrière; D=10cm; e=2mm; d=4cm; a/d = 0, $r_p=6\text{mm}$	100

Figure IV.51: La charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée et la nature de la barrière; $D=20\text{cm}$; $e=4\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$	101
Figure IV.52: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en bakélite pour deux épaisseurs différentes; $D=10\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d= 10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	101
Figure IV.53: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en bakélite pour deux épaisseurs différentes; $D=20\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d= 10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	102
Figure IV.54: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en presspahn pour deux épaisseurs différentes; $D=10\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d= 10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	102
Figure IV.55: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en presspahn pour deux épaisseurs différentes; $D=20\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d= 10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	103
Figure IV.56: Atténuation de la charge en fonction de la position pour deux barrières en bakélite de diamètres différents, $e=4\text{mm}$, $U=35\text{kV}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	103
Figure IV.57: Atténuation de la charge en fonction de la position pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm), $e=4\text{mm}$, $U=35\text{kV}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	104
Figure IV.58: Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Presspahn de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$; $d=12\text{cm}$; $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$	104
Figure IV.59: La variation de la charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$; $d=12\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$	105
Figure IV.60: Energie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes.....	106
Figure IV.61: Energie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la distance Inter-électrodes pour différents niveaux de tension.....	106
Figure IV.62: Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes positions de la barrière en bakélite ; $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	107
Figure IV.63: Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes positions de la barrière en presspahn ; $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	107
Figure IV.64: Energie du système pointe-plan avec barrière en bakélite en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=20\text{cm}$, $e=4\text{mm}$, $d=8\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	108
Figure IV.65: Energie du système pointe-plan avec barrière en presspahn en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=20\text{cm}$, $e=4\text{mm}$, $d=8\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$	108
Figure IV.66: Energie en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de la barrière; $D=10\text{cm}$; $e=2\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$	109
Figure IV.67: Energie en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de la barrière; $D=10\text{cm}$; $e=2\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0.2$, $r_p=6\text{mm}$	109

Figure IV.68: Energie en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de la barrière; D=10cm; e=2mm; d=4cm; a/d = 0.8, r _p =6mm.....	110
Figure IV.69 Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes ; D=10cm; d=10cm; a/d=0, r _p =6mm.....	110
Figure IV.70 Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes ; D=10cm; d=10cm; a/d=0.2, r _p =6mm.....	111
Figure IV.71 Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes ; D=10cm; d=10cm; a/d=0.8, r _p =6mm.....	111
Figure IV.72: Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents ; e =2mm; d=12cm; a/d = 0, r _p =6mm.....	112
Figure IV.73: Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents ; e=2mm; d=12cm; a/d = 0.2 r _p =6mm.....	112
Figure IV.74: Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents ; e=2mm; d=12cm; a/d = 0.4 r _p =6mm.....	113

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Solubilité de l'eau à température ambiante pour différents liquides isolants.....	10
Tableau II.1 : Propriétés Diélectriques des matériaux utilisés.....	37
Tableau III.1 : Comparaison entre les distances d'gm et d'gr pour une barrière en presspahn de diamètre D=10cm.....	69
Tableau III. 2 : Comparaison entre les distances d'gm et d'gr pour une barrière en presspahn de diamètre D=20cm.....	69

Introduction Générale

Le transformateur de puissance constitue l'un des éléments les plus coûteux et les plus stratégiques dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Toute défaillance de cet élément peut entraîner des pertes économiques non négligeables. En général, la vie d'un transformateur est égale à la vie de son isolation. Les défaillances électriques sont dues dans une très large mesure au claquage (ou rupture) électrique de l'isolation. Par conséquent, la fiabilité de ces équipements constitue l'un des principaux objectifs pour les fabricants et les entreprises spécialisées dans le domaine électro énergétique ; elle dépend de leur conception et de leur constitution [1]. Parmi les constituants que l'on peut trouver dans les transformateurs, l'huile isolante. En effet la majorité des transformateurs de haute tension sont remplis d'huile isolante. Cette dernière permet d'assurer un double rôle, l'isolation électrique et la dissipation thermique. Cette dualité la rend nécessaire dans bon nombre d'appareillages.

L'huile la plus employée dans les transformateurs de puissance est l'huile minérale en raison de son faible prix et ses bonnes propriétés [2,3]. Afin d'améliorer les principales propriétés requises pour ces équipements à savoir le transfert de chaleur, la rigidité diélectrique, le vieillissement, etc., de nombreuses études ont été réalisées pour caractériser les huiles minérales, et comprendre les différents phénomènes impliqués dans leur dégradation, plus particulièrement dans les phases de claquage et de pré claquage [4-6]. Dans ces appareils, l'huile minérale est utilisée conjointement avec des isolants solides formant ainsi des barrières isolantes au développement de la décharge électrique. Leur fonction essentielle est d'empêcher la formation de décharges susceptibles de se produire en des points ou des régions où le champ électrique est plus intense (extrémités de bobinages, points de connexion, etc.). Ces décharges peuvent se déclencher à des tensions relativement basses et conduire au claquage [7].

L'effet bénéfique des barrières isolantes est bien connu depuis longtemps, il est utilisé lors du dimensionnement des structures isolantes dans de nombreux dispositifs à haute tension, et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance. La plupart des études relatives à l'influence des barrières isolantes baignant dans l'huile ont été effectuées sous tension continue et impulsionnelle (ondes de foudre et de manœuvre), plus particulièrement dans les intervalles pointe-plan [7-9].

Il ressort des résultats reportés dans la littérature, que dans les grands intervalles d'huile, comme dans l'air [10,11], la barrière agit comme un obstacle géométrique au développement de la décharge. Lorsque le champ électrique appliqué augmente, une charge électrique s'accumule à la surface de la barrière face à l'électrode active (pointe). Ainsi, la barrière se comporte comme une électrode plane et le champ entre cette barrière et le plan devient pratiquement uniforme [11, 12]. Il en résulte alors une augmentation de la rigidité diélectrique dans l'intervalle d'huile.

L'état de l'huile, par l'extrême complexité et la grande diversité des mécanismes mis en jeu, rend difficile l'étude et l'interprétation des phénomènes de claquage et de préclaquage dans les intervalles d'huile avec barrières. En plus de l'importance fondamentale de la structure chimique de l'huile, les problèmes d'interface solide /liquide sont posés en permanence à la fois sur le plan théorique et sur le plan expérimental. Cela a poussé les chercheurs dans le domaine, à approfondir l'étude des propriétés électro géométriques des barrières isolantes en se basant sur les différents paramètres de ces dernières tels que leur nature, leur épaisseur et leurs dimensions, afin d'interpréter les phénomènes d'initiation et de propagation des décharges conduisant au claquage [7, 9,13].

Etant donné l'importance des systèmes d'isolations dans la durée de vie des transformateurs, il est primordial de comprendre les mécanismes à l'origine de la dégradation de l'huile minérale ainsi que la connaissance des conditions d'initiation et de propagation des décharges électriques se produisant à l'interface barrière/huile. Lors de la mise en service des transformateurs, ces structures isolantes peuvent être soumises à des contraintes électriques pouvant conduire à des

décharges électriques dans le volume de ces matériaux ou en surface, en présence d'un champ électrique intense. Le claquage de la totalité de l'isolation résulte d'interactions complexes [14-16].

Ainsi, l'objectif principal que nous nous sommes fixé dans notre thèse est l'étude de l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur, dans un système pointe-plan sous tension alternative de fréquence industrielle 50 Hz. Les moyens mis à notre disposition au Laboratoire de Haute Tension de L'Ecole Nationale Polytechnique nous ont permis d'effectuer un travail complémentaire aux études déjà effectuées par d'autres auteurs sous différents types de tensions, dans d'autres laboratoires.

Dans un premier chapitre, nous présentons les résultats des travaux d'investigation de nombreux chercheurs sur les phénomènes de claquage et de préclaquage dans les diélectriques liquides et solides. Nous décrivons dans un premier temps le rôle des huiles isolantes utilisées dans les transformateurs, les causes de leur altération ainsi que leurs principales propriétés physico-chimiques. Nous exposons, ensuite ; une synthèse sur les mécanismes de claquage et de préclaquage des deux milieux liquide et solide ainsi que les phénomènes se produisant à l'interface liquide/solide. Ce chapitre se termine en évoquant les travaux relatifs à l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique dans les grands intervalles d'air et d'huile.

Le second chapitre est consacré à l'étude expérimentale où sont présentés les matériaux utilisés (solides et huile minérale), la méthode et les divers dispositifs d'essai, ainsi que les caractéristiques des différents équipements utilisés pour la mesure de la charge et du courant. Nous présentons aussi la forme des signaux obtenus pour les deux grandeurs et les différents essais préliminaires que nous avons réalisés au laboratoire de l'entreprise SKMK/SONELGAZ de Blida sur l'huile de transformateur utilisée. Nous avons procédé aux analyses physico-chimiques et diélectriques des différentes propriétés de l'huile minérale soumise à une série de claquage, selon les normes internationales [17, 18]. Il s'agit de la permittivité, des facteurs de pertes diélectriques, de la viscosité, de l'acidité, du point d'éclair et de l'indice de couleur. Le but de ces analyses est de mettre en évidence l'influence du nombre de claquages sur l'altérabilité de l'huile minérale pendant les essais effectués. Suivant les résultats d'analyses obtenues, nous procédons aux changements de l'huile ou à son maintien pour le reste des essais. Les résultats sont confrontés aux recommandations des normes en vigueur [17-20].

Dans le troisième chapitre, nous présentons et interprétons les résultats expérimentaux concernant l'influence des différents paramètres de la barrière (nature, épaisseur, position entre les électrodes et dimension) sur la tension de claquage de l'huile de transformateur pour différentes longueurs d'intervalle pointe-plan. Nous comparons nos résultats à ceux obtenus dans le système sans barrière. Nous avons établi également une équivalence électro-géométrique entre les deux configurations avec et sans barrière. A la fin, nous achevons ce chapitre par une discussion des résultats obtenus et une conclusion.

L'analyse de l'insertion de la barrière sur le courant et la charge de préclaquage est développée dans le quatrième et dernier chapitre. L'étude est faite en tenant compte des différents paramètres de la barrière, pour différents niveaux de tension et différentes distances inter-électrodes. Par la suite, une discussion des résultats y est présentée.

Nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Phénomènes de claquage des structures isolantes mixtes

Introduction

Parmi les équipements électriques renfermant une combinaison de deux milieux isolants solide et liquide : les transformateurs. Ces derniers contiennent deux types de matériaux isolants majoritaires : de l'huile minérale et des écrans en carton comprimé ou en papier cellulosique. Lorsque l'huile est en contact avec les constituants cellulosiques, le complexe liquide-solide initialement neutre se polarise sous l'effet d'un phénomène physico-chimique à l'interface, des charges électriques apparaissent à l'interface : l'huile se trouve chargée positivement, le carton négativement [21]. En revanche, le carton étant très isolé, il accumule les charges négatives. Une accumulation trop importante de charges à sa surface peut engendrer des potentiels de surface élevés et des décharges superficielles. Ces décharges, plus ou moins importantes, détériorent les propriétés diélectriques de l'huile et du matériau cellulosique, et sont responsables de claquages destructifs.

La compréhension des mécanismes de claquage des deux milieux considérés différemment est fondamentale pour la conception et le dimensionnement des équipements. Il est donc primordial de s'approfondir dans l'étude des phénomènes intervenant dans la phase de pré claquage et de claquage. Une telle étude présente un grand intérêt du point de vue industriel (transformateurs, condensateurs, etc.), et du point de vue de la physique fondamentale (physique de la décharge, plasma, etc.)

Dans ce chapitre, nous abordons les phénomènes se produisant dans les systèmes stratifiés solide/liquide. Nous nous intéressons en premier lieu au rôle de l'huile minérale, sa composition, ces propriétés diélectriques, physiques et chimiques ainsi que les causes de son altération. Puis nous présentons les principaux mécanismes de claquage dans les deux milieux solide et liquide. A la fin, nous rappelons certains résultats relatifs à l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique des intervalles d'air et d'huile.

I.1 Huiles isolantes

Les huiles sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés et débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau, etc.). Ces pétroles bruts doivent passer par divers stades de raffinage pour donner des huiles isolantes conformes pour les applications électrotechniques. La composition des huiles minérales dépend de la composition des pétroles d'origine. Elles contiennent près de 3000 molécules différentes, dont 10% seulement sont caractérisées [21]. Ces huiles isolantes sont utilisées comme imprégnant d'isolants solides et produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs, condensateurs, disjoncteurs, etc....

Ces appareils présentent des pertes d'énergie qui, aussi faibles soient-elles, provoquent une élévation de la température. Celle-ci peut être limitée par l'emploi de l'huile minérale, refroidissement naturel (convection) ou forcé (circulation). La majorité des liquides isolants (90 à 95%) sont représentés par les huiles minérales, dont l'importance commerciale s'explique par la facilité à les obtenir (à partir de coupes pétrolières) et leur faible coût [2]. L'analyse de l'huile isolante peut renseigner sur l'état des parties actives du transformateur en cours d'exploitation. Les fonctions principales d'une huile isolante sont [22,33]:

la fonction de transfert de chaleur, la fonction d'isolation et la fonction diélectrique.

- ✓ Fonction de transfert de chaleur : Cette fonction concerne l'évacuation des pertes d'énergie, la chaleur évacuée est véhiculée par circulation naturelle (convection) ou forcée du liquide diélectrique vers les dispositifs de refroidissement. Un bon transfert de chaleur permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation bien répartie [23].

- ✓ Fonction isolation au sens strict : L'isolation au sens strict permet de ralentir l'oxydation de l'isolation solide.
- ✓ Fonction diélectrique (Isolation au sens électrique) : L'isolation dans la partie active d'un transformateur, des éléments portés à des potentiels différents, est assurée :
 - Soit par le diélectrique liquide seul (isolation entre deux pièces métalliques nues)
 - Soit par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide (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).

I.2 Composition chimique

L'huile minérale est un mélange complexe de composés naphthéniques, paraffiniques et aromatiques, tous dérivés de pétrole. La proportion de ces composés dans l'huile varie suivant le type d'huile [21, 23].

- ✓ Les composés paraffiniques :

Les molécules paraffiniques sont complexes et leur structure est linéaire ou ramifiée. Les alcanes de type linéaire (n-alcanes) sont connus sous le nom de paraffines. Elles ont une stabilité thermique plus faible que les molécules naphthéniques et aromatiques, un faible pouvoir solvant et une faible densité pour une viscosité donnée.

- ✓ Les composés naphthéniques :

Les molécules naphthéniques sont également appelées cycloalcanes de formule générale $C_{2n}H_{2n}$. Elles présentent d'excellentes propriétés à basse température et un meilleur pouvoir solvant que les n-alcanes. On peut trouver des cycles à cinq, six (majoritaires) ou sept atomes de carbone.

- ✓ Les composés aromatiques :

Ce sont des huiles composées de fonctions à noyau benzénique se caractérisant par une densité très élevée, un indice de viscosité très faible, une très faible résistance à l'oxydation, un pouvoir solvant très élevé et une facilité d'émulsion avec l'eau. Ils ont des structures à chaînes latérales ou polycycliques à deux, trois ou plus, noyaux condensés. Ces hydrocarbures sont réactifs et leur propriété de fixer l'hydrogène joue un rôle important dans la stabilité électrique des huiles minérales isolantes.

- ✓ Les hétéroatomes

Toutes les huiles contiennent un faible nombre de molécules d'hydrocarbures qui comportent dans leur structure, d'autres éléments comme le soufre, l'azote et l'oxygène. Ces atomes sont fixés sur les structures aromatiques. La teneur en azote des huiles isolantes est relativement faible mais elle a une forte influence sur leurs caractéristiques. Par contre certains types de molécules contenant du soufre peuvent agir comme inhibiteurs destructeurs de peroxydes au cours du processus d'oxydation et elles peuvent aussi provoquer la corrosion du cuivre.

Lorsque les huiles isolantes sont neuves, la teneur en oxygène lié à des hydrocarbures sous la forme d'hétéro molécule est faible. Lors du vieillissement des huiles, le phénomène d'oxydation produit des molécules contenant de l'oxygène. L'eau, qui est aussi produite pendant l'oxydation, joue un rôle destructeur dans les huiles et peut également détériorer le papier isolant avec une extrême rapidité.

I.3 Propriétés des huiles isolantes

Trois types de propriétés peuvent être étudiés pour caractériser les performances diélectriques des matériaux isolants :

- ✓ Les propriétés diélectriques ;
- ✓ Les propriétés physiques ;
- ✓ Les propriétés chimiques.

I.3.1 Propriétés diélectriques

Les éléments caractéristiques d'un isolant du point de vue électrique sont :

- ✓ La permittivité relative ou constante diélectrique ;
- ✓ La résistivité transversale ;
- ✓ La résistivité superficielle ;
- ✓ Le facteur de dissipation diélectrique ;
- ✓ La rigidité diélectrique et tension de claquage ;
- ✓ La conductivité.

Les caractéristiques des isolants dépendent de leur formulation, de leurs conditions d'utilisation ou conditionnement. L'étude de ces propriétés est un domaine qui se caractérise par sa pluridisciplinarité puisqu'il touche à la chimie, à l'électrostatique et à la mécanique des fluides.

I.3.1.1 La permittivité relative ou constante diélectrique ϵ_r

Comme pour un isolant solide, la permittivité relative ou constante diélectrique de l'huile est définie comme le rapport de la capacité C d'un condensateur dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement rempli d'huile isolante à la capacité C_0 de la même disposition d'électrodes dans le vide :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad [I. 1]$$

La permittivité est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule. Sa valeur est faible pour les hydrocarbures et comprise entre 2.0 et 2.5 pour les huiles minérales [24]. Elle est influencée par la température et la fréquence du courant. La contrainte électrique la plus élevée est toujours supportée par le milieu dont la permittivité est la plus faible.

I.3.1.2 La résistivité transversale

La résistivité transversale d'un matériau isolant est la résistance d'un élément de ce matériau de 1cm^2 de section et 1cm de long, elle s'exprime généralement en $(\Omega.\text{cm})$. 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 [25].

I.3.1.3 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).

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 [25].

I.3.1.4 La conductivité

La conductivité n'est pas une propriété intrinsèque d'un liquide isolant. Elle est due à la présence d'impuretés ionisables en très faible concentration. Sous l'effet d'un champ électrique, les ions se déplacent, provoquant ainsi un courant de conduction. Plus la température est élevée, plus la viscosité du liquide est faible et, par conséquent, plus la mobilité des ions est grande [26]. Donc la conductivité d'un liquide augmente quand la température augmente. Le vieillissement du liquide isolant conduit à la formation de sous-produits qui contribuent à l'augmentation de la conductivité.

Les huiles isolantes ont une conductivité de l'ordre de 10^{-11} à $10^{-13} \text{ S.m}^{-1}$.

I.3.1.5 La rigidité diélectrique et la tension de claquage

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximale du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique.

Dans l'industrie, la rigidité diélectrique est définie 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 U_c ».

Le claquage d'une huile conduit à la décomposition des molécules par rupture des liaisons chimiques entre les atomes. Ce phénomène appelé également rupture électrique, est l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles au cours de laquelle l'isolation est traversée soudainement par un arc électrique.

Les méthodes de mesure de la tension de claquage sont décrites par les normes internationales CEI :

- mesure à 50Hz : CEI 60 156 [18]

- mesure en onde de choc de foudre : CEI 60897 [27].

La tension de claquage d'un matériau dépend d'un grand nombre de facteurs dont sa mise en œuvre et la présence d'impuretés (eau, particules...). Plusieurs particularités du claquage sont communes à tous les matériaux :

- ✓ Le claquage est localisé ;
- ✓ C'est un processus électronique ;
- ✓ Il résulte de phénomènes divers (chimiques, thermiques, électro-hydrodynamiques,...)

Les solides diélectriques ont généralement une tension de claquage supérieure à celle des liquides, et les liquides une tension de claquage très supérieure à celle des gaz.

I.3.1.6 Le facteur de dissipation diélectrique

Ce paramètre appelé aussi la tangente de l'angle de pertes $\text{tg}\delta$ représente la tangente de l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte [28]. Il figure toujours dans les spécifications d'huiles isolantes. Le principe de mesure est identique à celui employé pour mesurer le facteur de dissipation d'un isolant solide.

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 ou de phénomènes de polarisation [24].

Ce facteur est également sensible aux impuretés et aux produits de vieillissement. 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 $\text{tg}\delta$, mais l'inverse n'est pas vérifié. Une valeur défavorable de $\text{tg}\delta$ peut être due à la dissolution dans l'huile des produits qui n'ont pas pour origine l'altération de l'huile. Une huile minérale neuve possède une valeur de $\text{tg}\delta$ inférieur ou égale à $5 \cdot 10^{-3}$ [17]. Une valeur élevée de $\text{tg}\delta$ pour une huile, indiquerait sa contamination par les impuretés et sa dégradation par vieillissement [2].

Différents dispositifs existent pour mesurer le facteur de dissipation diélectrique. La norme CEI 60247 [17] donne les détails sur la mesure.

I.3.2 Propriétés physiques

I.3.2.1 La Viscosité

La viscosité et sa variation avec la température, est un des paramètres de première importance pour le transfert thermique. Le choix d'une huile repose essentiellement sur la valeur de sa viscosité. Plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil pour refroidir les parties actives. La viscosité s'exprime par la relation suivante:

$$\text{CST} = \text{Ct} - \text{B/t} \quad \text{[I. 2]}$$

CST : viscosité en centiStokes ;
 C : constante de viscosité ;
 t : Durée de l'écoulement en secondes ;
 B : Coefficient du viscosimètre.

La viscosité des hydrocarbures est corrélée à leur masse moléculaire : plus un produit est léger, plus sa viscosité est faible. Cependant, un produit est volatil et inflammable si sa masse moléculaire est de plus en plus faible [1].

I.3.2.2 Point d'écoulement

La connaissance du point d'écoulement est également un paramètre important dans le choix d'un liquide destiné à évacuer des calories. Le point d'écoulement ne doit pas être considéré comme équivalent à une température de solidification de l'huile dans les équipements en exploitation. Il est défini comme la température maximale au dessous de laquelle la circulation du liquide ne peut s'établir [1].

Deux phénomènes peuvent être responsables de la perte d'écoulement :

- ✓ L'augmentation de viscosité à basse température
- ✓ La cristallisation de certains composants (notamment les paraffines dans l'huile minérale).
Des améliorants d'écoulement (APE) sont parfois utilisés dans ce cas.

Les huiles de point d'écoulement les plus bas sont obtenues à partir des coupes naphthéniques [1,29].

I.3.2.3 Le point d'éclair

C'est la température minimale, pour une huile chauffée, de dégagement de vapeur suffisant pour former un mélange inflammable avec l'air. Il est également un indicateur de la volatilité de l'huile.

I.3.2.4 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 de feu et le point d'éclair servent à caractériser l'inflammabilité d'une huile.

I.3.2.5 Capacité et conductivité thermique

La capacité thermique des huiles isolantes, exprimée en Joules par kilogramme Kelvin, *croît* avec la température et *décroit* avec la masse volumique [1].

$$C_p = 1684 - 3.39T / \sqrt{\rho_{15}} \quad \text{[I.3]}$$

ρ_{15} : masse volumique à 15°C.

A 20°C, la capacité thermique varie de 1000 à 2300J/(kg.K).

La conductivité thermique est inversement proportionnelle à la masse volumique et décroît avec la température. Elle est comprise entre 0.11 et 0.16 W.m⁻¹K⁻¹. Ces paramètres sont très importants car ils déterminent la capacité de l'huile à évacuer de la chaleur [28,29].

I.3.2.6 Aspect et couleur

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence de corps en suspension (poussière, humidité) et d'évacuer 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. L'aspect, la couleur ainsi que 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 [30].

I.3.3 Les propriétés chimiques

L'étude des caractéristiques chimiques d'un liquide, est très importante car d'une part, elle permet de connaître les composantes réelles qui constituent ce dernier et d'autre part, elle renseigne sur l'état d'évolution de ce liquide et son aptitude à remplir ses fonctions principales, à savoir l'isolation électrique et l'évacuation de chaleur.

I.3.3.1 L'acidité

Une huile neuve ne contient pas d'acide minéraux mais elle contient des acides organiques. 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.

L'acidité d'une huile en service résulte des produits d'oxydation, 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. Son dosage est réalisé suivant la norme NF EN 62021.

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 [31]. 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.

I.3.3.2 Oxydation des huiles minérales isolantes

L'Oxydation d'une huile est un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène moléculaire dissout. Les produits de dégradation issus de l'oxydation de l'huile entraînent un changement de couleur et d'odeur puis une apparition de dépôts accompagnée d'une augmentation de la viscosité. Il se forme dans un premier temps des produits de décomposition solubles (aldéhydes, cétones, acides organiques) puis par polymérisation des dépôts insolubles (boues) [21, 29].

L'oxydation est une fonction croissante de la température et de la concentration en oxygène. Les conséquences de l'oxydation sont :

- ✓ Augmentation des pertes diélectriques et la conductivité de l'huile.
- ✓ Dégradation plus rapide de l'isolation cellulosique, elle est activée par les produits de dégradation de l'huile.
- ✓ Augmentation de la viscosité par formation de boue, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité thermique de l'huile d'où formation de points chauds.

I.3.3.3 Teneur en eau

L'eau est le contaminant le plus courant qui affecte les huiles minérales, les propriétés diélectriques de l'huile sont fortement affectées par son humidité. Les huiles séchées peuvent avoir des teneurs en eau inférieures à 10ppm [1].

L'eau que renferme une huile peut se trouver sous deux formes :

- ✓ L'eau libre, en solution sous forme de vapeur d'eau, jusqu'à la concentration de saturation, concentration au-delà de laquelle se forment des gouttelettes. La concentration en eau libre est déterminée par la température et la tension de vapeur du gaz en équilibre avec l'huile. En présence d'eau libre, la conductivité de l'huile augmente fortement et sa rigidité diélectrique diminue.
- ✓ L'eau liée est fixée à certaines molécules du liquide par des liaisons chimiques faibles. La quantité d'eau liée est proportionnelle à la quantité d'impuretés contenues dans l'huile.

La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de l'état de l'huile, de la température et du type d'huile (tableau I.1). Une huile isolante âgée qui a commencé à s'oxyder, aura une teneur en eau à saturation plus élevée qu'une huile neuve. De l'eau est également produite pendant l'oxydation aussi bien de l'huile que du papier, facteur qui accélère encore la détérioration du papier dans un transformateur.

Nature du liquide	Solubilité de l'eau à température ambiante(ppm)
Huiles minérales	50
Huiles silicones	120
Hydrocarbures aromatiques	200 à 250
Esters	1500 à 2500

Tableau I.1: Solubilité de l'eau à température ambiante pour différents liquides isolants (Berger) [1].

I.4 Claquage des liquides diélectriques

Les diélectriques liquides utilisés traditionnellement dans beaucoup d'applications, sont des liquides non polaires, ils permettent d'obtenir une rigidité diélectrique améliorée et d'assurer une bonne dissipation thermique. Ils sont caractérisés par des permittivités et des pertes diélectriques très faibles ($\epsilon_r=2$ à 2.5 et $\text{tg}\delta \sim 10^{-4}$ respectivement). Leur tension de claquage est plusieurs fois supérieure à celle des gaz [32].

Les avantages techniques inhérents à leur utilisation ne se font pas sans entraîner un certain nombre de problèmes, pouvant conduire au claquage. Ce dernier est un phénomène destructif qui dégrade de façon irrémédiable la tenue diélectrique et il est la cause principale de la plupart des défaillances du matériel électrique. Le claquage des diélectriques liquides diffère de celui des gaz et des solides et l'étude de leur rupture diélectrique est très complexe puisqu'elle fait appel à des lois fondamentales sur la matière, raison pour laquelle certains mécanismes ont été avancés pour expliquer le claquage des milieux liquides dont les plus connus sont :

- ✓ Le claquage électronique,
- ✓ Le claquage faisant intervenir une phase gazeuse,
- ✓ Le claquage par pont.

Le claquage des diélectriques liquides n'est pas instantané, il est précédé d'un ensemble de phénomènes dits de pré claquage. La compréhension de ces derniers amènerait à éviter le claquage, ce qui présente un grand intérêt du point de vue industriel.

I.4.1 Mécanisme électronique

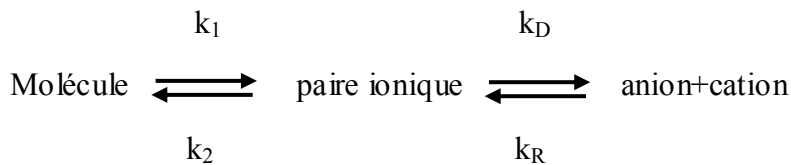
Les premiers travaux proposaient d'adopter les résultats acquis dans les gaz, pour expliquer le claquage dans les diélectriques liquides. Ils supposèrent que des mécanismes d'ionisation de type α basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications électroniques, intervenaient dans le claquage des diélectriques liquides [33].

Le processus de multiplication électronique a été proposé à l'origine par Townsend [34], pour décrire les phénomènes d'amorçage dans les gaz. Ce processus est une conséquence de l'accélération d'un ou plusieurs électrons par le champ, sur une distance égale au libre parcours moyen. Le gain d'énergie acquis par ces charges permet l'ionisation à la suite de collisions, d'une ou plusieurs molécules.

La connaissance de la conduction des liquides s'est améliorée, quand les liquides polaires tels que le nitrobenzène, ont été étudiés. L'aspect chimique des phénomènes de conduction et ses relations avec l'électrochimie furent alors les premiers compris. Plus tard les notions de cinétiques électrochimiques furent appliquées avec succès aux liquides polaires et non polaires [35].

La conduction électrique des liquides a pu être parfaitement comprise à partir du moment où des mesures de distribution du champ électrique entre les électrodes ont été faites à différents instants sous tension. On a pu alors connaître la provenance des porteurs de charge et leur vitesse de déplacement [36].

Les porteurs de charge sont créés au sein du liquide (création en volume) ou aux électrodes. En volume, l'apparition de nouveaux porteurs est due à une réaction que l'on peut schématiser comme suit [36]:



L'étape de formation de la paire ionique dépend du processus chimique plus au moins complexe.

Les constantes de vitesses K_1 et K_2 , indépendantes du champ électrique ne sont pas calculables à l'aide de modèle simple. Par contre, la formation des paires d'ions résultant des interactions coulombiennes K_R et de dissociation K_D de deux charges de signe opposé en interaction électrostatique peuvent être calculées.

L'application d'un champ électrique dans le liquide modifie les énergies d'interaction entre les ions dans le liquide. La théorie cinétique exacte du champ sur la dissociation des paires, est due à Onsager. Elle prévoit que K_D varie avec la valeur absolue du champ alors que K_R est indépendant du champ.

Des porteurs de charges peuvent être aussi créés aux électrodes, soit par décharge des ions du liquide sur les électrodes, soit par création de nouveaux ions. La décharge d'ions cause la formation dans le liquide, d'une charge d'espace de signe opposé (hétérogène) à l'électrode voisine, alors que l'injection s'accompagne d'une charge d'espace de même signe (homo charge). L'échange de charges à l'électrode peut donc être caractérisé par la mesure du champ électrique près des électrodes [37].

La décharge des ions ne pose pas de problèmes, ni théoriques car elle semble toujours se produire, ni pratique car elle élimine les ions de la solution. Par contre, l'injection qui est responsable de l'accroissement très rapide de la conduction des liquides aux champs élevés, dépend beaucoup du système liquide-électrodes.

Plusieurs mécanismes de création d'ions peuvent être envisagés :

- ✓ Injection d'électrons par la cathode et capture des électrons : les liquides ne sont pas suffisamment purs dans leurs conditions d'utilisation, pour que leur conduction soit électronique et les électrons soient immédiatement piégés par des composés accepteurs d'électrons (O_2 , etc....) ;
- ✓ Ionisation du liquide ;
- ✓ Réaction électrochimique.

La formation d'avalanches électroniques dans un liquide, susceptibles de conduire au claquage (comme dans les gaz) a été très controversée. Plusieurs arguments sont en défaveur d'une telle hypothèse. Dans la plupart des liquides [38],

- ✓ Le libre parcours moyen l_m est vraisemblablement de l'ordre des dimensions intermoléculaires (quelques dizaines de nanomètres), donc très inférieur à celui d'un électron dans un gaz à pression atmosphérique ;
- ✓ Une pression de quelques bars a un effet remarquable sur l'apparition des streamers, d'autant plus que de telles pressions sont incapables d'agir sur le libre parcours moyen des électrons dans les liquides, quasiment incompressibles.

I.4.2 Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse

La séquence de génération, croissance et disparition de bulles gazeuses a été, pour la première fois, mise en évidence dans l'huile de transformateur sous tension alternative, au voisinage d'une pointe fine essentiellement en polarité négative [39].

L'apparition d'une phase gazeuse (bulle) peut résulter d'une cavitation due à des écoulements électro hydrodynamiques induits par l'injection de charges dans le liquide, des poches de gaz au niveau des électrodes ou encore d'une vaporisation locale du liquide. Selon les conditions expérimentales (géométriques et physiques), les instabilités de l'interface entre la cavité gazeuse et le liquide environnant, peuvent conduire à un claquage soit par expansion de cette phase gazeuse, soit suite à la propagation d'une décharge (streamer) ayant pris naissance dans une zone de champ intense sur l'interface cavité gazeuse /liquide [40].

Dans les liquides ultra purs et en géométrie pointe-plan, sous tension continue, il a été observé qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan. Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation des bulles, soit de la cavitation. Certains auteurs supposent que les cavités gazeuses existent a priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités [35].

I.4.2.1 Mécanisme thermique

Le mécanisme thermique se traduit par le phénomène d'ébullition locale du liquide suite à une dissipation d'énergie, associée à de fortes impulsions de courant, à partir d'aspérités de l'électrode pointe [41].

Watson et Sharbaugh, partisans de l'opinion qui stipule que suite à une grande concentration d'ions près des électrodes, des échauffements locaux du liquide peuvent faire apparaître des bulles de vapeurs [42]. Le courant correspondant à l'injection de charges à partir de la cathode serait limité par la charge d'espace. Ce courant est donné sous forme suivante :

$$I = A V^n \quad \text{[I. 4]}$$

$$A = \text{Cste} \text{ et } 1.5 < n < 2$$

Le champ de claquage E_c est lié à l'énergie W nécessaire à la vaporisation du liquide par la relation :

$$W = \text{cte} E_c^n \tau \quad \text{[I. 5]}$$

Avec τ : temps de séjour du liquide dans la région de champ fort.

D'autre part, pour vaporiser un volume de liquide donné, il faut lui fournir une énergie :

$$W = C_p (T_b - T_a) + L_v \quad \text{[I. 6]}$$

C_p : Capacité thermique massique à pression constante ;

T_b : Température d'ébullition ;

T_a : Température ambiante ;

L_v : Chaleur latente de vaporisation à volume constant.

Watson et Sharbaugh ont établi un critère de claquage en identifiant les deux énergies ci-dessus. Ce modèle est qualitativement vérifié sur certains hydrocarbures, sous des tensions impulsionnelles de quelques micro secondes, mais demeure incomplet du fait qu'il utilise une équation relative à un état stationnaire alors que l'on est en présence d'un régime transitoire d'échauffement [40, 42].

Un modèle plus élaboré et tenant compte du régime transitoire a été proposé par Kao [43]. D'après cet auteur, si la densité de courant est suffisante pour ramener la température du liquide à son point d'ébullition, il y a claquage. Dans la théorie que Kao a formulée, le claquage se produit dans des bulles qui se formeraient de plusieurs façons :

- ✓ A partir de poches de gaz des électrodes.
- ✓ Par une répulsion électrostatique des charges d'espace qui dépasseraient la tension superficielle.
- ✓ En raison d'une dissociation des molécules du liquide par des électrodes, ou d'une vaporisation du liquide par le courant dû à des impuretés ou émis à partir d'aspérités sur les électrodes.

I.4.2.2 Mécanisme de cavitation

Un liquide, soumis à une dépression à température constante donnera naissance à une bulle si la pression devient inférieure à sa pression de vapeur saturante [44]. L'application d'un champ électrique au liquide peut engendrer une dépression soit par [45] :

- ✓ Le phénomène d'électrostriction du liquide, là où le champ est renforcé.
- ✓ La mise en mouvement du liquide.

I.4.2.2.1 Cavitation d'origine électrique

Le modèle est basé à la fois sur l'existence de particules en suspension et sur la formation de bulles par cavitation. Il prévoit les variations du champ disruptif avec la pression du liquide étudié.

Il assimile les zones instables à des bulles qui se formeraient en des points de pression nulle, liées à des particules solides en suspension ou éventuellement aux électrodes. Le phénomène de cavitation est d'origine électrique, c'est à dire que ce sont les forces interfaciales d'origine électrique qui auraient tendance à soulever le liquide des électrodes. Le décollement est si rapide que la cavité formée serait du vide. Le métal (coté cathode) émettrait des électrons dans la cavité. Ces électrons, accélérés par le champ électrique, bombarderaient le liquide dissipant ainsi, lors de l'impact, une énergie suffisante pour vaporiser assez de liquide pour que la bulle puisse se développer. Le claquage se produira lorsque la bulle aura dépassé une taille limite, désignée sous le nom de taille critique [36, 38].

I.4.2.2.2 Cavitation électro hydrodynamique

L'apparition d'une phase gazeuse pourrait résulter d'une cavitation due à une dépression locale dans le liquide. Cette dépression est induite, par la mise en mouvement du liquide, sous l'effet d'une tension appliquée au système. Les écoulements peuvent atteindre une vitesse [45] :

$$V_{EHD} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \quad [I. 7]$$

en un temps
$$t \cong \frac{\eta}{\varepsilon E_0^2} \quad [I. 8]$$

Ou ε : Permittivité du liquide ;

η : Viscosité du liquide ;

E_0 : Champ sur la pointe.

Ce mouvement induit une dépression dans le liquide donnée par la relation suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_{EHD}^2 \quad [I. 9]$$

ρ : Masse volumique du liquide

V_{EHD} : Vitesse d'écoulement électro hydrodynamique.

La dépression pourrait être suffisante pour générer une bulle par cavitation électro hydrodynamique.

I.4.3 Claquage par pont

Les grands volumes de liquides, utilisés dans l'industrie électrique, contiennent généralement des impuretés sous forme de particules en suspension : fibres, poussières, débris métalliques, gouttelettes d'eau, bulles de gaz. Ces particules (isolantes ou conductrices) présentes dans le liquide, sont responsables d'une diminution significative de sa rigidité diélectrique [46]. Dans le cas des particules isolantes solides, sous l'action d'un champ électrique, les particules sont attirées vers les zones de champ intense pour former des ponts entre les électrodes, facilitant ainsi le claquage du liquide [33]. Dans le cas des particules déformables (bulles de gaz, gouttelettes d'eau), le claquage peut intervenir suite à l'élongation de ces particules reliant ainsi les électrodes par un canal, après ionisation. Dans le cas des particules solides conductrices, ces dernières seront le siège de décharges partielles favorisant le claquage du liquide.

I.4.3.1 Origine des particules

Du point de vue de leur origine, les particules de faibles dimensions présentes dans les transformateurs peuvent être classées en trois catégories :

- ✓ Particules existant initialement dans l'huile de remplissage de la cuve ;
- ✓ Particules qui apparaissent ensuite dans l'huile, provenant des éléments du transformateur, comme les enroulements, les circuits magnétiques et autres parties solides et qui s'étaient trouvées fixées sur ceux-ci lors des opérations d'assemblage ;
- ✓ Particules apparaissant durant le service.

Les particules existant dans l'huile neuve sont très fines et ne sont pas éliminées par les opérations de filtrage et de rinçage. Il peut s'agir d'impuretés du pétrole brut lui même ou d'impuretés pouvant avoir été introduites durant les opérations de raffinage.

Les particules introduites durant les opérations de fabrication et d'assemblage, comprennent des fibres de cellulose, des particules de résine, de métal (acier, aluminium, cuivre) et des poussières.

I.4.3.2. Teneur des particules

D'après une analyse quantitative des particules recueillies en filtrant une huile de transformateur, 94% étaient combustibles (c'est à dire constituées de fibres de cellulose), le reste étant constitué de matériaux ou de poussières. Durant le service, la teneur en particules, telles que les fibres de cellulose, de métal et de résine, doit vraisemblablement augmenter lentement par suite de vieillissement des métaux et de l'usure due à la circulation forcée de huile pour le refroidissement. En outre, en cas de situation anormale, comme l'échauffement local ou l'existence de décharges partielles, la teneur en particules de carbone tend à augmenter [29].

I.4.3.3 Rôle des particules dans le claquage

La présence d'impuretés dans les liquides isolants conduit au renforcement local du champ électrique. La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme [29] :

- ✓ Formes, dimensions, permittivité et conductivité des impuretés ;
- ✓ Concentration des impuretés entre les électrodes ;

- ✓ Intervalles et formes des électrodes ;
- ✓ Valeurs des charges libres existant à la surface des particules.

I.4.3.3.1 Particules isolantes

Les particules isolantes, ayant la permittivité plus grande que celle du liquide, seraient attirées, sous l'action du champ électrique vers les régions de champ intense et formeraient des ponts entre les électrodes. La rupture, dans ce cas, serait le résultat soit de l'échauffement produit par effet joule dans le pont qui est plus conducteur que le liquide, soit par la grande intensité locale du champ qui apparaît juste avant l'achèvement du pont.

I.4.3.3.2 Particules conductrices

Les particules conductrices peuvent se charger facilement au contact d'une électrode et transporter leur charge sur l'autre électrode. Lorsque la distance entre la particule et l'électrode ayant le signe opposé est très petite, le champ est si élevé qu'une micro décharge s'amorçant entre la particule et l'électrode déclencherait la rupture.

La rupture diélectrique est, en général, précédée par des phénomènes impulsionnels appelés « pré disruptifs » ou « pré claquage ».

I.4.4 Longues décharges dans les liquides

Dans un liquide, des intervalles de quelques centimètres sont considérés comme longs intervalles. Le mécanisme d'évolution des décharges pour de tels intervalles est similaire dans ses caractéristiques générales, à celui observé dans l'air pour des intervalles de l'ordre de quelques mètres. Ce mécanisme est appelé comme dans le gaz : mécanisme de streamer- leader [37].

L'étude des mécanismes de streamers n'a cessé de se développer. De nombreux travaux ont porté sur la progression des streamers dans des géométries divergentes [47]. Il est généralement admis que quelles que soient la géométrie et la polarité des électrodes, le claquage est précédé d'une phase de pré claquage pouvant être elle même séparée en deux :

- ✓ Une phase de génération ou peuvent se manifester simultanément ou successivement des phénomènes de diverses natures (électrique, optique, hydraulique,...), caractérisée par un temps t_g dit de génération, pendant lequel apparaît au voisinage d'une électrode une perturbation revêtant la forme d'arborescence dénommée « streamer » dans la formulation anglaise.
- ✓ Une phase de propagation durant laquelle se développe la perturbation précédemment créée. Cette phase a été de loin la plus étudiée et est caractérisée par un temps t_p dit de propagation.
- ✓ Les streamers sont caractérisés par leur indice de réfraction qui est différent de celui du liquide. Ils produisent des courants et émettent de la lumière, de même que leur propagation est accompagnée d'ondes de choc quelles que soient leur vitesse.

I.5 Facteurs influant sur la rigidité diélectriques des liquides

I.5.1 Paramètres électro géométrique

L'augmentation de la distance inter-électrodes, engendre la croissance de la tension de claquage [42, 44] (Figure I.1). Par ailleurs la rigidité diélectrique du liquide diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes [33]. En champ non uniforme, lorsque la tension

appliquée dépasse un certain niveau, une densité d'énergie sous forme d'impulsions est injectée à partir d'aspérités de la cathode. Le rayon de courbure de la pointe joue un rôle important sur la nature et la durée des phénomènes pré disruptifs, plus ce rayon est faible, plus l'intensité du champ électrique obtenu est considérable.

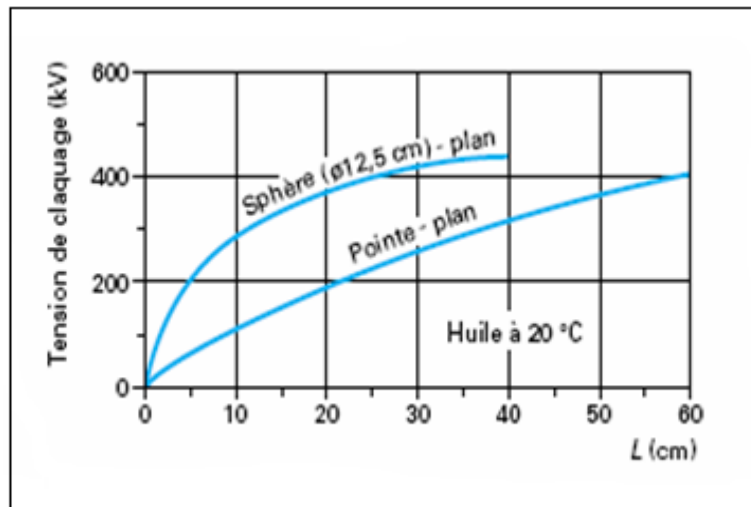


Figure I.1 : Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative, en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan [37]

I.5.2 Pression hydrostatique

Il est connu depuis longtemps que la pression hydrostatique a un effet considérable sur la tension de claquage des diélectriques liquides; celle-ci est d'autant plus élevée que la pression est accrue [48].

I.5.3 Température

L'augmentation de la température, entraîne généralement la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile [29]. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent.

I.5.4 La tension

Le temps de montée de la tension, sa polarité, sa durée et son amplitude affectent énormément la vitesse de propagation et la forme du streamer. Pour des niveaux de tension légèrement supérieurs à la tension seuil de génération, plusieurs auteurs confirment l'apparition de bulles gazeuses au voisinage de l'électrode pointe [45, 49, 50].

I.5.5 L'humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier (Figure II.3) [33, 51]. Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau-huile [24].

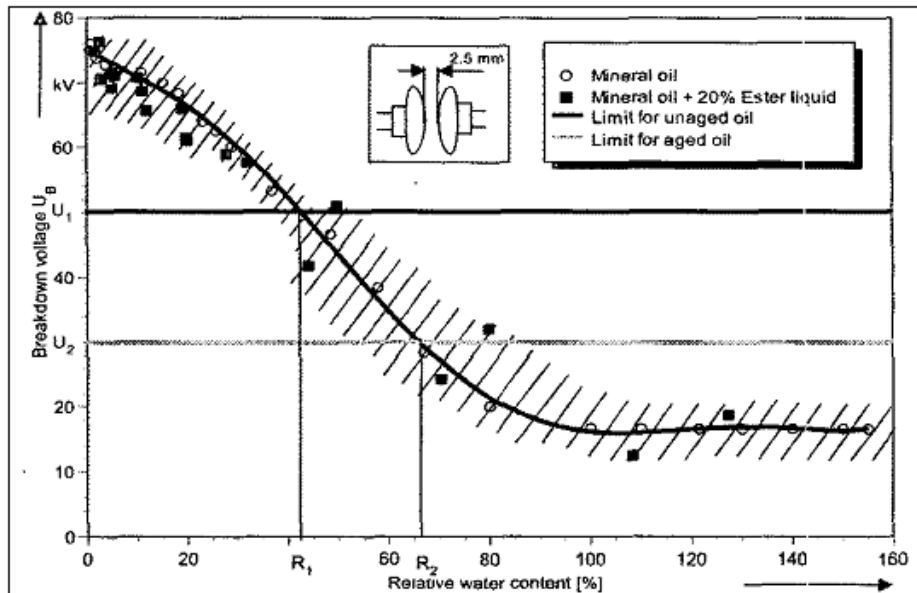


Figure I.2 : Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau, dans l'huile minérale et dans une solution composée de l'huile minérale avec 20% d'ester liquide [72].

I.6 Claquage des solides

Les matériaux diélectriques solides constituent un support mécanique pour les parties conductrices du transformateur et assurent l'isolation électrique entre ces différentes phases [33]. L'état solide se caractérise par sa grande tenue diélectrique, sa rigidité est définie comme étant la valeur de l'intensité de champ électrique pour laquelle s'établit un arc électrique entre les électrodes. Lorsqu'un diélectrique est placé dans un champ électrique, ce dernier s'en trouve modifié. Ce changement sera caractérisé par l'apparition de charges électriques. En effet, sur la partie du diélectrique voisine du corps créateur du champ apparaissent des charges de signe contraire à la charge de ce dernier et sur la partie éloignée du diélectrique des charges de même signe. En effet, l'apparition de ces charges est due à la formation de pôles électriques d'où l'appellation de polarisation des diélectriques.

I.6.1 Phénomènes de polarisation

L'effet de la polarisation diélectrique avait été découvert par Mickael Faraday en 1837. Les pertes diélectriques sont dues aux mouvements des porteurs de charges. L'effet de ces mouvements est appelé polarisation induite. On distingue plusieurs types de polarisation : électronique, ionique, par orientation et interfaciale ; celle-ci peut coexister ou apparaître séparément. La polarisation totale est la somme des différents types de polarisation [52].

- ✓ La polarisation électronique est présente dans tous les diélectriques sans exception. Elle est due au déplacement relatif du noyau de l'atome par rapport à l'ensemble des électrons qui l'entourent. La déformation de l'orbite qui l'accompagne est élastique, c'est-à-dire que le travail nécessaire à son apparition n'est pas converti mais stocké dans le champ électrique.
- ✓ La polarisation ionique ne se rencontre que dans les cristaux ioniques où les atomes du cristal ont une charge électronique. Dans un tel cas, la polarisation ionique se manifestera sous la forme d'un déplacement des atomes de charge positive dans la direction du champ électrique et du déplacement des atomes de charge négative en sens contraire. La polarisation ionique ne provoque pas de pertes d'énergie et disparaît avec la suppression du champ appliqué.

- ✓ La polarisation par orientation résulte d'une interaction moléculaire asymétrique. Une molécule est constituée de plusieurs atomes qui combinent leurs couches de valence en se regroupant. Une fois regroupés, ces atomes formeront naturellement un dipôle électrique qui aura tendance à s'orienter face à un champ électrique extérieur. En plus d'orienter la molécule, le champ électrique externe pourra déformer la molécule au point d'augmenter le moment dipolaire de celle-ci.
- ✓ La polarisation interfaciale apparaît dans les diélectriques non homogènes dont les permittivités et les conductivités du matériau constituant 1 et 2 sont telles que [53]:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \neq \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad \text{[[I.10]]}$$

ε_1 et ε_2 sont les permittivités respectives des milieux 1 et 2. σ_1 et σ_2 sont les conductivités respectives des milieux 1 et 2.

Elle résulte d'une accumulation de charges à la frontière des deux milieux. Elle s'affaiblit généralement au voisinage de fréquences supérieures aux fréquences acoustiques.

I.6.2 Mécanismes de claquage des isolants solides

Contrairement aux gaz et aux liquides, le claquage des isolants solides se traduit par des phénomènes complexes apparaissant lors de la phase de pré claquage rendant difficile l'énoncé d'une théorie unifiée pour expliquer le mécanisme de claquage. Ainsi, le claquage des solides entraîne la destruction du matériau et la mise hors service de l'appareil ou du système dont il fait partie. Par conséquent, selon le processus de pré claquage, on distingue trois types de mécanismes de claquage des isolants solides [7]:

- ✓ Le claquage électrique,
- ✓ Le claquage thermique,
- ✓ Le claquage électromécanique,

A ces phénomènes, nous pouvons ajouter d'autres mécanismes liés au vieillissement du matériau, aux défauts apparaissant dans le volume (cavités gazeuses ou impuretés) ou à la surface du matériau. Dans ce cas, on parle de :

- ✓ Claquage dû aux décharges partielles,
- ✓ Claquage dû à la charge d'espace.

I.6.2.1 Claquage électrique

Selon les processus de pré claquage, on distingue deux groupes de théories de claquage électrique : les théories de claquage intrinsèque et les théories de claquage par avalanches.

I.6.2.1.1 Claquage électrique intrinsèque

Ce type de claquage est lié à l'interaction des électrons et des atomes du corps considéré. Les théories de claquage intrinsèque considèrent un champ électrique uniforme appliqué à un diélectrique de dimensions infinies. On admet généralement que la valeur critique de claquage est atteinte lorsque les électrons de l'isolant acquièrent suffisamment d'énergie pour passer de la bande de valence à la bande de conduction. Pour les champs faibles, l'énergie que gagnent ainsi les électrons est néanmoins rapidement cédée aux atomes du matériau, ce qui conduit à un état d'équilibre. Cependant, à partir d'une certaine valeur du champ électrique, cet équilibre n'est plus possible car l'énergie gagnée par les électrons n'est pas complètement restituée au matériau : c'est la condition de claquage.

Le claquage peut également avoir lieu par avalanche. En effet, lorsque le nombre d'électrons dépasse une certaine limite, le courant de conduction électronique augmente de façon considérable jusqu'à rendre le diélectrique pratiquement conducteur.

Le claquage intrinsèque est accompli en une durée de formation de l'ordre de 10^{-8} s, ce mécanisme est de nature purement électronique.

I.6.2.1.2 Claquage électrique par avalanche

Les théories qui traitent le claquage par avalanche sont nombreuses, elles sont liées à la manière d'initiation de l'avalanche électronique et au critère de claquage considéré. La théorie de Stratton en 1961, considère l'initiation de l'avalanche par un électron libre émis par la cathode, qui gagnera suffisamment d'énergie pour produire un nouvel électron par collision et une avalanche semblable à celle observée dans les gaz prend place dans le solide. Cette avalanche conduit au claquage du diélectrique, si le nombre d'électrons sera suffisamment important, de manière à ce que le diélectrique commence à conduire.

I.6.2.2 Claquage thermique

L'existence de porteurs de charge dans un matériau isolant en présence d'un champ électrique, provoque un courant de conduction qui peut conduire à l'échauffement de cet isolant par effet Joule. Cependant, ce courant n'est pas la seule source de chaleur, les phénomènes de relaxation présents dans le diélectrique engendrent des mécanismes de pertes qui participent à leur tour à l'échauffement. Le claquage thermique se produit dans la région où la température du matériau atteint une valeur critique, au-delà de laquelle le courant croît très rapidement entraînant la rupture totale.

I.6.2.3 Claquage électromécanique

Ce mécanisme dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques de l'isolant et des contraintes électriques appliquées. Quand un champ électrique est appliqué au matériau isolant, une force mécanique due aux attractions coulombiennes mutuelles des électrodes, sera exercée sur le diélectrique et tend à réduire son épaisseur par déformation mécanique (figure I.2). Si cette déformation est importante, le champ se trouve renforcé et provoque le claquage du matériau.

La force de compression est donnée par la relation suivante [54, 55] :

$$P_c = \frac{1}{2} D.E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{d^2} \quad [I.11]$$

V: La tension appliquée; Y: module de Young; ε_0 : la constante diélectrique de l'air;

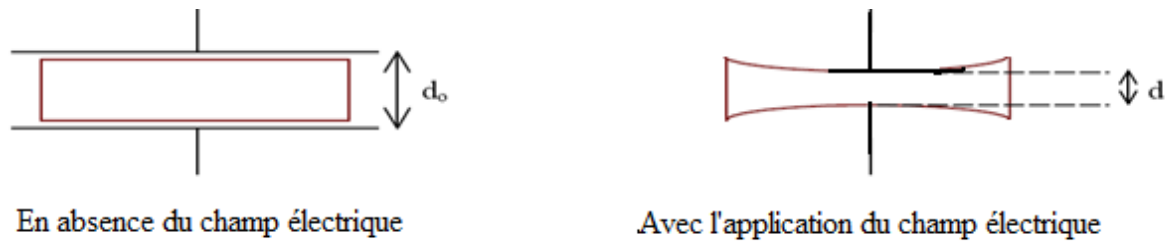
ε_r : La constante diélectrique relative du diélectrique; d_0 : Epaisseur initiale de l'isolant

Le système devient instable quand $d < 0.6.d_0$, d_0 étant l'épaisseur initiale de l'échantillon.

Ainsi quand le champ augmente, et l'épaisseur de matériau isolant diminue. Quand $d < 0.6.d_0$, l'augmentation du champ électrique causerait la rupture du diélectrique.

Par conséquent, aucune valeur réelle de V ne peut produire une valeur stable de d/d_0 en dessous de 0,6. Si le claquage ne se produit pas à cette valeur, un accroissement supplémentaire de V rend l'épaisseur instable et provoque le claquage de l'isolant. La plus grande valeur de la rigidité apparente est alors donnée par :

$$E_c = \frac{V}{d_0} = 0.6 \left[\frac{Y}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \right]^{1/2} \quad [I.12]$$



Figure(I.3): Processus de rupture électromécanique

I.6.2.4 Claquage dû aux décharges partielles

Ce type de décharges prend naissance aux bords des électrodes, dans des cavités gazeuses ou dans des inclusions que peut renfermer le matériau dès que la tension appliquée atteint la tension seuil correspondant au minimum de Paschen du gaz en présence (air ou autre). Les effets de ces décharges partielles peuvent être dramatiques aboutissant à la destruction complète du matériau et de l'équipement à la suite de l'un des processus suivants :

- ✓ Propagation à travers le matériau de canaux microscopiques (arborescence).
- ✓ Echauffement cumulatif par les décharges.
- ✓ Cheminement superficiel ou contournement.

D'une façon générale, la tension d'amorçage des décharges partielles dans les isolants est plus faible que la tension de claquage de ces derniers.

I.6.2.5 Claquage dû à la charge d'espace

La charge d'espace dans un diélectrique peut être due à plusieurs facteurs, parmi les plus importants, l'apparition de trous de grande densité lors de l'évolution d'une avalanche suffisamment grande, ou suite au piégeage d'électrons fournis au diélectrique par la cathode. Son effet est considérable quand le matériau est soumis à un champ divergent (pointe-plan par exemple). Dans ce cas, des charges d'espace apparaissent dans le volume du matériau et au voisinage des électrodes provoquant l'accroissement local du champ électrique ce qui peut conduire au claquage [56].

I.7 Phénomènes de décharge électrique 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 I.4 montre des décharges streamers à l'interface liquide/solide [16].

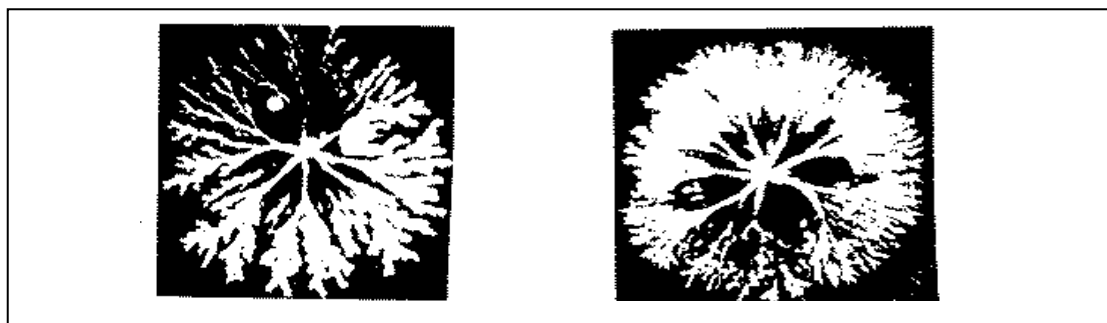


Figure I.4: décharges à l'interface liquide/solide dans un système pointe-plan [16]

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. 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.

I.7.1 Mise en évidence de l'effet d'interface

Lorsqu'un liquide est en contact avec une paroi solide, le complexe liquide-solide initialement neutre se polarise sous l'effet du phénomène physico-chimique à l'interface. Dans un système pointe-plan immergé dans l'huile minérale de transformateur, l'insertion d'une barrière isolante conduit à l'uniformisation du champ électrique entre elle et l'électrode plane. Des charges générées par l'électrode pointe s'étalent sur la surface de la barrière formant ainsi une surface équipotentielle [7, 14].

I.7.2 Double Couche

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'électro neutralité. 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 [57, 58]; il a été amélioré par Gouy et Chapman en 1910 et plus tard par Stern [59]. Dans ces modèles, 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 (Fig I.5). 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. Cette couche est appelée "sous couche ou couche compacte". Elle est caractérisée par son épaisseur.

La deuxième partie correspond à la différence de potentiel entre la couche compacte et le liquide. Cette couche est appelée "couche diffuse". 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.

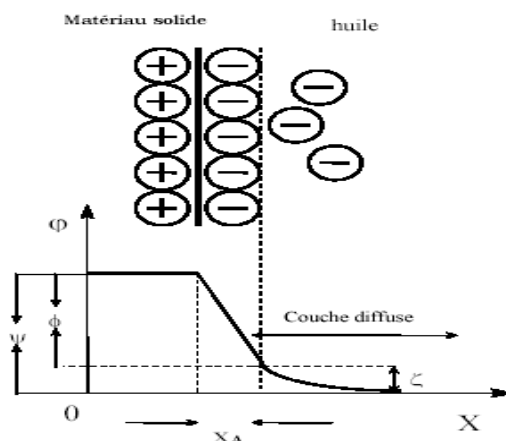


Figure I.5: Schéma de la double couche selon le modèle de Stern [59]

I.7.3 Contournement

Il est évident que la rigidité diélectrique des isolants solides est beaucoup plus grande que celle des isolants liquides et gazeux. Par conséquent, il peut se produire une décharge superficielle plutôt qu'une perforation dans le cas des systèmes stratifiés. Le contournement correspond à la décharge disruptive du système le long de la surface de séparation entre les deux milieux (solide-gaz ou solide-liquide) [60].

I.7.4 Décharges glissantes aux interfaces liquide/solide

En présence d'une isolation mixte (liquide /solide), lorsque l'isolant solide est utilisé comme barrière dans un intervalle de liquide, et son épaisseur est assez grande pour empêcher une perforation en volume, des décharges peuvent se propager sur la surface du diélectrique solide et le contourner. En se propageant, ces décharges peuvent creuser la surface du solide et laisser des traces telles des canaux ramifiés de faible diamètre appelées dans leur forme globale " figures de Lichtenberg. Ces figures prennent toujours naissance du côté de l'électrode acérée [14,16].

I.8 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'air

L'influence des barrières isolantes sur l'amélioration de la tension disruptive dans l'air a été remarquée par C.P Steinmetz vers 1920 [61, 62]. Il a constaté l'augmentation de la tension disruptive de l'air entre deux électrodes sphériques, séparées par une barrière perpendiculaire au champ axial pour différentes fréquences. La meilleure amélioration fut obtenue pour la fréquence 50Hz. Les principales recherches furent entreprises ensuite en 1930 par E.MARX [63] et H.ROSER [64], leurs travaux ont servi de base principale aux études futures.

Marx montra qu'une plaque isolante, insérée dans un champ divergent induit une modification de la forme des décharges ayant lieu dans l'intervalle inter-électrodes. Pour la rupture aux chocs (0.5/100 μ s) d'un intervalle d'air de 50cm, il a obtenu une amélioration de la tension quand la barrière est près de la pointe positive. Lorsque la pointe est négative, les décharges apparaissent des deux cotés de la barrière et la rende sans effet. En tension alternative 50Hz, l'amélioration de la tension disruptive a été remarquée pour des positions de la barrière située entre 20% et 60% de l'intervalle pointe-plan [12, 65, 66].

H. Roser [60] a été le premier à étudier l'influence des barrières à différentes constantes diélectriques sur la rupture de l'air aux chocs de foudre, en tension alternative et en continue pour divers systèmes d'électrodes. Il a montré que l'augmentation de la tension disruptive est due à la transformation du champ électrique qui tend à devenir uniforme entre la barrière et le plan, comme il a prouvé que les courants porteurs initiaux avant la rupture complète sont fortement réduits par rapport à ceux du système sans barrière. Son étude des barrières perforées a montré qu'elles n'entraînent aucune amélioration notable de la tension disruptive.

Wolochchenko [10] a vérifié les résultats d'E. Marx [63] et H. Roser [64] pour différents systèmes d'électrodes avec différentes sortes de barrières. L'amélioration de la tenue diélectrique n'a été obtenue que pour les systèmes d'électrodes à champ non uniforme. Le processus de rupture s'effectue en différentes étapes, il y'a d'abord la rupture de l'intervalle pointe-barrière ensuite celle de l'intervalle barrière -plan qui apparaît en même temps que la rupture totale.

M.P.Verma [37] en 1961-62, a effectué des recherches sur les chocs de foudre positifs des intervalles d'air pointe plan avec barrière de 4 à 14cm. La pente des caractéristiques tensions disruptive –distance inter électrodes variait entre 5kV/cm et 30kV/cm selon la position de la barrière dans l'intervalle.

Selon J.M.Meek et M.MC.Collins [67] en 1966, ont étudiés l'effet d'une barrière isolante aux chocs 0.4/30 μ s dans un intervalle d'air tige plan de 15cm. ils ont remarqué que l'intensité du champ électrique au plan atteint sa valeur de crête mais restera constante car les streamers n'arrivent plus au plan où ils devraient être normalement neutralisés.

J.Pilling [68] a étudié l'effet des barrières isolantes, en tension alternative des intervalles d'air pointe-plan et pointe-pointe allant jusqu'à 20cm. Il a vérifié que la tension disruptive est équivalente à la somme des tensions des deux cotés de la barrière et de la chute de tension sur la barrière. La constante diélectrique et l'épaisseur de la barrière influencent la distribution des porteurs de charges positifs et la chute de tension sur la barrière. Quand ces deux paramètres augmentent, la ramification des streamers s'élargit de plus en plus et le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme.

Une étude a été réalisée en 1975-77 par M. Awad [69] sur le comportement des barrières polluées dans des intervalles d'air pointe-pointe de longueur inférieure à 12cm pour des tensions alternative 50Hz et de chocs de manœuvres 23/2300 μ s. Il a montré que la tension de claquage diminue lorsque la conductivité superficielle augmente, puis tend vers une valeur constante pour une conductivité supérieure ou égale 3 μ S dans le cas où la surface polluée est en face de l'électrode pointe HT.

A.Boubakeur [79] a réalisé des travaux sur les intervalles d'air pointe plan de 40 à 200cm, en tensions de choc de foudre, de manœuvre positive et en tension alternative à fréquence industrielle. Il a montré que la barrière isolante à surfaces propres joue le rôle d'obstacle géométrique. Elle provoque l'allongement de la décharge disruptive et par conséquent l'augmentation de la tension disruptive. Cette amélioration de la tension est observée quand la barrière est proche de la pointe aux environs de 20% de la distance pointe- plan. L'évolution de la décharge peut être directe ou par étape. La décharge directe est obtenue lorsqu'aucune décharge superficielle à la surface de la barrière n'est observée. Cependant, la décharge contourne la barrière en empruntant le chemin pointe-bord de la barrière- plan. La décharge s'effectue par étapes lorsque la décharge est composée de l'étincelle pointe-milieu de la barrière suivie de la décharge, le contournement de la barrière par les décharges glissantes et de la décharge du bord de la barrière vers le plan [61].

Selon Li Ming et al [12], dans un système pointe-barrière-plan, l'augmentation de la largeur de la barrière isolante entraîne celle de la tension disruptive à 20% de l'intervalle inter-électrodes. Cette amélioration de la tension disruptive est faible pour les petites largeurs de la barrière. En mesurant cette tension de rupture, en un système pointe-plan sous tension impulsionnelle, Li Ming et al a obtenu une augmentation de 30 à 45% pour une barrière de forme hémisphérique et dont la cavité est en face de la pointe, par rapport à la valeur de la tension de claquage d'une barrière plane. La présence de particules entraîne une dégradation plus ou moins importante de la tenue diélectrique du système. L'effet de ces particules est plus significatif lorsqu'elles sont situées au centre de la barrière et lorsque cette dernière est située entre 0 et 20% de l'intervalle inter-électrodes.

F.V.Topalis et I.A. Stathopoulos [65] ont étudié l'influence de la position de la barrière dans l'intervalle pointe-plan et du nombre de barrières sur la tenue diélectrique du système. Ils ont obtenus une amélioration de la rigidité diélectrique pour une barrière située à 60% de la distance inter-électrodes à partir de la pointe. En tension impulsionnelle et en géométrie d'électrodes pointe-pointe, l'insertion de deux barrières de manière à ce que l'une soit fixe et l'autre mobile ne change presque pas la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, mais reste toutefois supérieure à celle de l'intervalle d'air ayant une seule barrière.

Selon S. Mouhoubi [25], dans un système pointe-plan, la valeur maximale de la tension disruptive est obtenue pour une position optimale de la barrière comprise entre 0 et 20% de l'intervalle inter-électrodes. L'augmentation de la largeur de la barrière engendre l'accroissement de la tenue diélectrique du système. Ce phénomène est lié à l'allongement de la décharge. Par contre l'épaisseur de la barrière n'a pas d'influence sur la tension disruptive. En tension continue positive, l'utilisation de deux barrières isolantes donne une meilleure tenue diélectrique du système, ce qui n'est pas le cas pour une tension alternative (50Hz). Mouhoubi a montré que l'effet de la perforation de la barrière dépend de la position de cette dernière. L'efficacité de la barrière diminue d'une manière considérable quand l'ouverture dans la barrière est située au voisinage de l'électrode pointe et son rayon est grand. Son effet est négligeable lorsque la barrière est près du plan.

Mouhoubi a également montré que l'insertion d'une barrière métallique invoquant le cas d'une barrière fortement polluée, a un effet négatif sur la rigidité diélectrique du système pointe-plan. Par contre, l'utilisation d'une barrière métallique à bords arrondis vers la pointe, améliore légèrement la tension disruptive.

I.8.1 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 [61, 66].

I.8.2 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 s'effectue par 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 [61,70].

I.8.3 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. 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 [7, 9, 61].

I.8.4 Influence des dimensions et du nombre de barrière

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 [7,12].

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.

I.8.5 Influence de la perforation de la barrière

La présence d'une perforation sur la barrière affecte considérablement sa qualité d'isolation. L'effet de la perforation dépend de la position de la barrière dans l'intervalle, du rayon de l'ouverture et de sa position sur la barrière. 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 [7, 61]. Pour une barrière située près de l'électrode pointe, la présence d'une perforation diminue significativement son efficacité [25, 61]. Par rapport à la barrière sans trou, il a été remarqué par A. Boubakeur [61], que quand la barrière est percée, la tension disruptive de l'arrangement pointe-barrière plan reste constante jusqu'à une certaine valeur du diamètre des trous au delà de laquelle elle commence à diminuer. Ceci justifie l'effet électrostatique de la charge d'espace accumulée à la surface de la barrière, conduisant la décharge disruptive à contourner la barrière au lieu de passer à travers le trou.

I.8.6 Influence du matériau de la barrière

M. V. Sokolova [71] 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, qui 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 ($\epsilon_r \text{ verre} > \epsilon_r \text{ plexiglas}$).

I.8.7 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.

I.8.8 Formes des décharges observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante

L'évolution et la forme des décharges [61, 63] peuvent être classées en deux types différents:

➤ Décharge directe :

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

a - Cas où la décharge perce la barrière : Ce cas est rencontré surtout quand la barrière est très large, assez mince et située à une distance proche de la pointe (électrode près de laquelle le champ est très intense). Quand la barrière est perforée, la décharge se prolonge comme dans le système sans barrière.

b - Cas où la décharge contourne la barrière : Pour un système pointe positive-plan avec barrière, les streamers [73] 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 (figure I.6-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) [73].

➤ Décharges 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 [61].

En premier lieu, on distingue l'effet couronne suivi de la décharge pointe-barrière qui constitue la première étape de l'amorçage. Ensuite, pour un niveau de tension supérieur, on arrive à la seconde étape qui est le contournement de la barrière par les décharges glissantes (Figure I.6-b), et finalement, la troisième et dernière étape est atteinte quand la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan (figure I.6-c). Pour une pointe négative, on a quatre étapes [73], 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 (figure I.6-d).

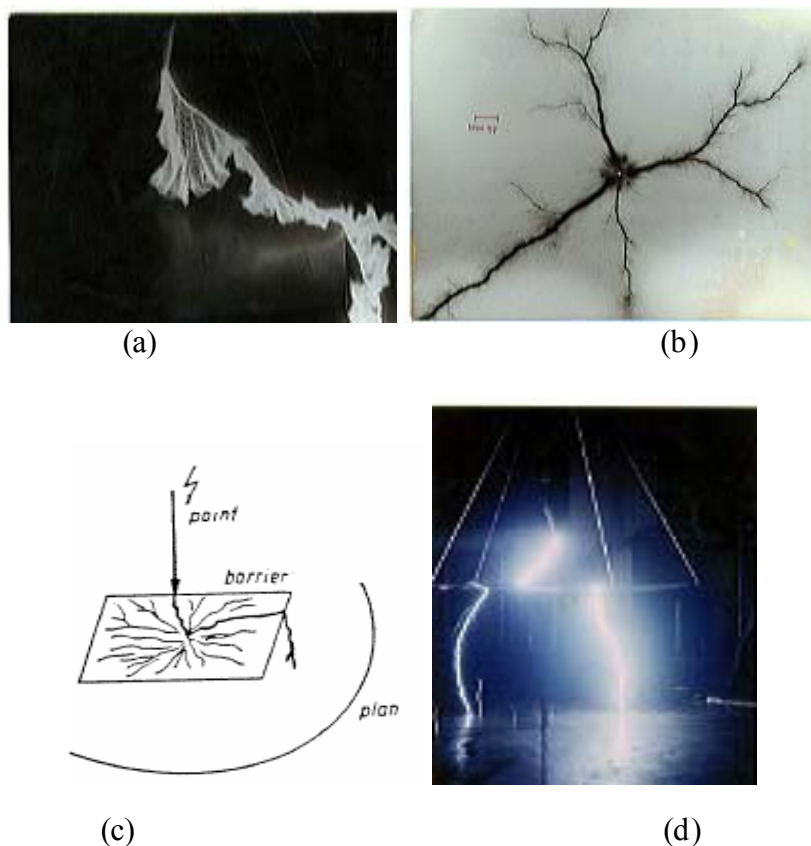


Figure I.6 : Décharge directe et par étapes (décharge glissante) [61]

- (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

I.9 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'huile

L'avantage fourni par l'utilisation des barrières isolantes dans un intervalle d'huile est l'amélioration de la rigidité diélectrique de l'huile minérale. L'amélioration peut être attribuée à l'uniformisation du champ dans l'espace barrière - plan, liée à la charge positive déposée sur la surface de la barrière en face de la pointe. Une barrière à surface propre (grande résistivité superficielle), entraîne une augmentation considérable de la tension disruptive quand elle est située près de la pointe. Cette augmentation est causée surtout par l'allongement du canal de la décharge disruptive qui suit un chemin allant de la pointe vers le bord de la barrière et de ce bord vers le plan mis à la terre [8]. A. Zouaghi a montré qu'une barrière montée perpendiculairement aux lignes du champ augmente significativement la rigidité du système [7]. Cependant, lorsque la barrière est montée en parallèle avec les lignes du champ, elle facilite le déplacement de la décharge et provoque des claquages à des tensions plus basses, inférieures à celles du système sans barrière.

I.9.1 Influence de la polarité

Dans son travail A. Zouaghi [7] a analysé l'influence de la polarité de la tension et l'efficacité de la barrière en chocs de foudre. Des études ont été d'abord effectuées en l'absence de la barrière isolante ensuite en sa présence. Il ressort des résultats expérimentaux qu'en polarité positive, avec une distance inter-électrodes de 50 mm, la tension de claquage d'un système pointe plan sans barrière est de 94 kV contre 161 kV en polarité négative. La présence d'une barrière isolante améliore la rigidité diélectrique de la structure quelle que soit la polarité. D'autre part, la tension de claquage de l'ensemble dépend largement de la position de la barrière dans l'intervalle inter-électrodes.

Sur la figure (I.7) sont présentées les caractéristiques $U_{50} = f(a_1/a)$ en fonction de la polarité, pour une barrière en Bakélite ; a étant la distance inter-électrode et a_1 la distance entre la pointe et la barrière. Il a été observé que lorsque la barrière est placée au voisinage de la pointe, son efficacité qui est définie par le rapport de la tension de claquage en présence de la barrière à celle sans barrière, en polarité négative est de $\zeta=1,4$ contre $\zeta=1,7$ en polarité positive pour un rayon donné de la barrière; l'efficacité de la barrière varie avec son rayon et sa nature.

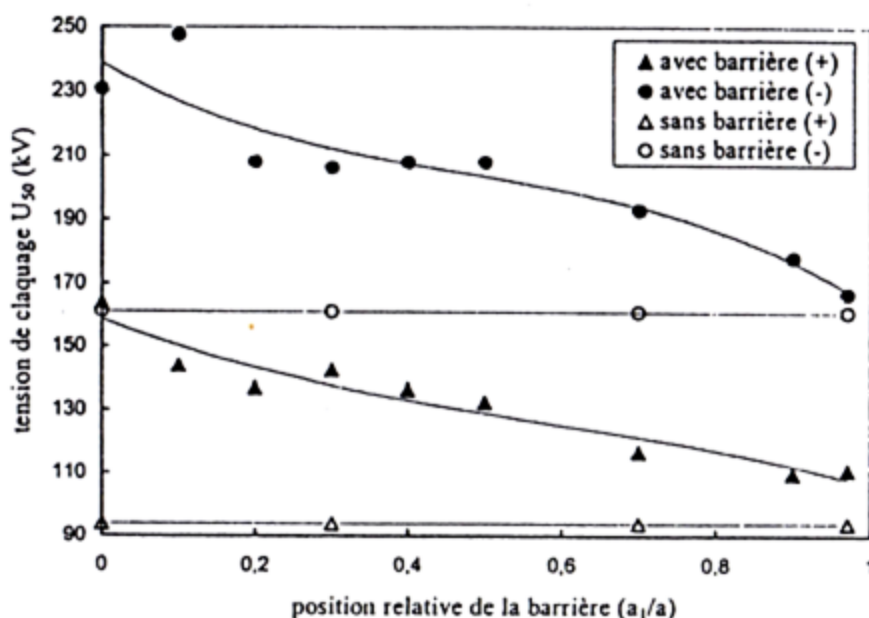


Figure I.7 : Tension du claquage U_{50} en fonction de la position de la barrière pour les deux polarités. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière en Bakélite de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=2$ mm; rayon de la pointe $=0.25$ mm

I.9.2 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 [7]. Les niveaux de tensions de claquages supérieurs sont obtenus dans l'huile minérale, quand la barrière est au voisinage de la pointe. Dans un système pointe-plan, en tension continue, plus la distance pointe-barrière est faible, plus la tension de claquage est élevée. La barrière placée tout près de l'électrode pointe se comporte comme une électrode plane.

I.9.3 Influence de la distance inter-électrodes

Pour une distance inter-électrodes de 100mm, soit le double de celle considérée dans le cas précédent ($a=50$ mm), nous remarquons que dans les cas des grands intervalles, l'efficacité de la barrière est plus importante quand celle-ci est au voisinage de l'électrode acérée. Elle diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes quelles que soient la nature de la barrière et la polarité de la tension appliquée, par contre elle est négligeable au voisinage de l'électrode plane (figure I.8) [7].

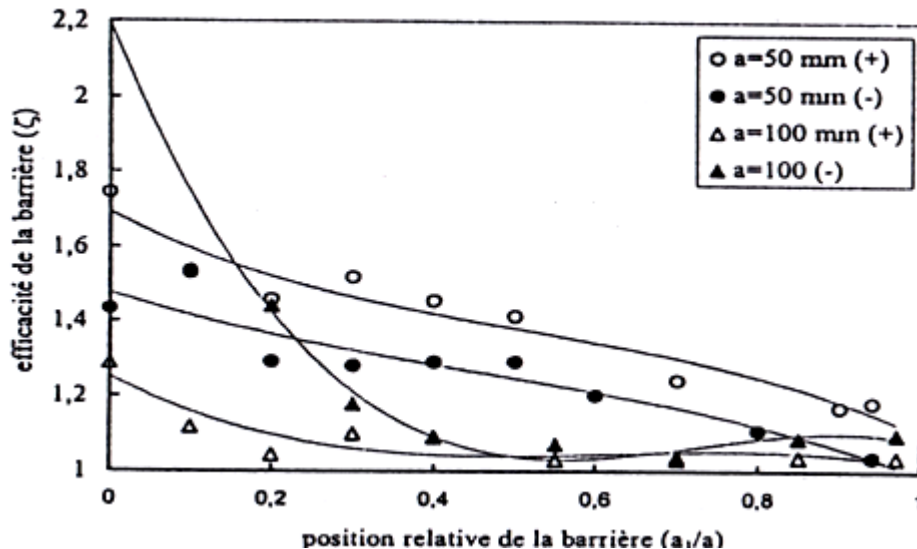


Figure I.8 Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de la barrière pour les deux polarités. Barrière en bakélite de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=2$ mm; rayon de la Pointe $=0,25$ mm.

I.9.4 Influence des dimensions et du nombre de barrières

Il a été montré que la rigidité diélectrique de la structure dépend de la nature de la barrière et de la polarité et cela pour différentes épaisseurs. En chocs de foudre, pour une barrière en Bakélite, l'augmentation de son épaisseur entraîne une augmentation de la tension de claquage quelles que soient sa position entre les électrodes, la polarité de la tension appliquée et la distance inter électrodes (figure I.6). Le même effet a été obtenu pour une barrière en polyéthylène en polarité positive (figure I.7). Cependant, en polarité négative, toute augmentation de l'épaisseur de la barrière diminue la rigidité du système quelles que soient la position de la barrière dans l'intervalle et la distance inter-électrodes (figure I.8) [7].

Toutefois l'épaisseur 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 [6]. 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 [7,12].

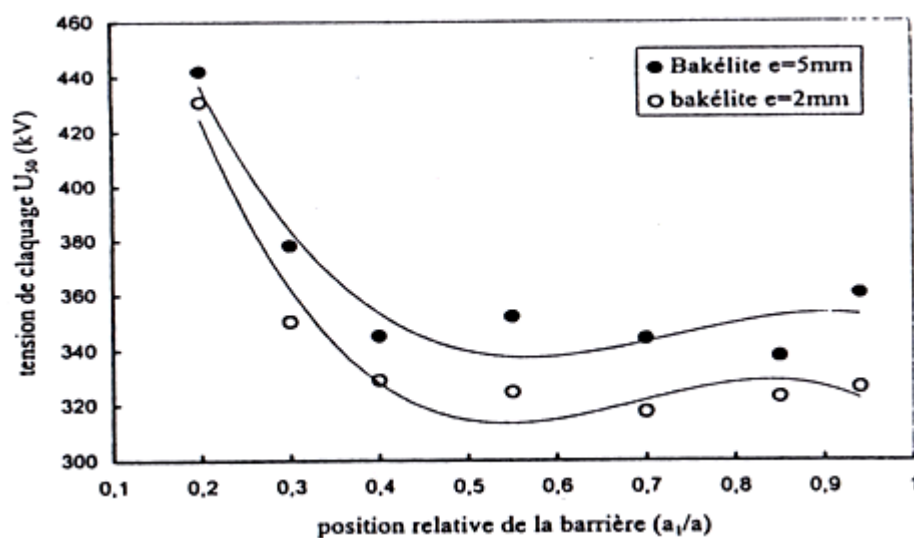


Figure I.9: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative. Distance inter-électrodes $a = 100$ mm; barrière en Bakélite de diamètre $D = 50$ mm; rayon de la pointe = 0,25mm

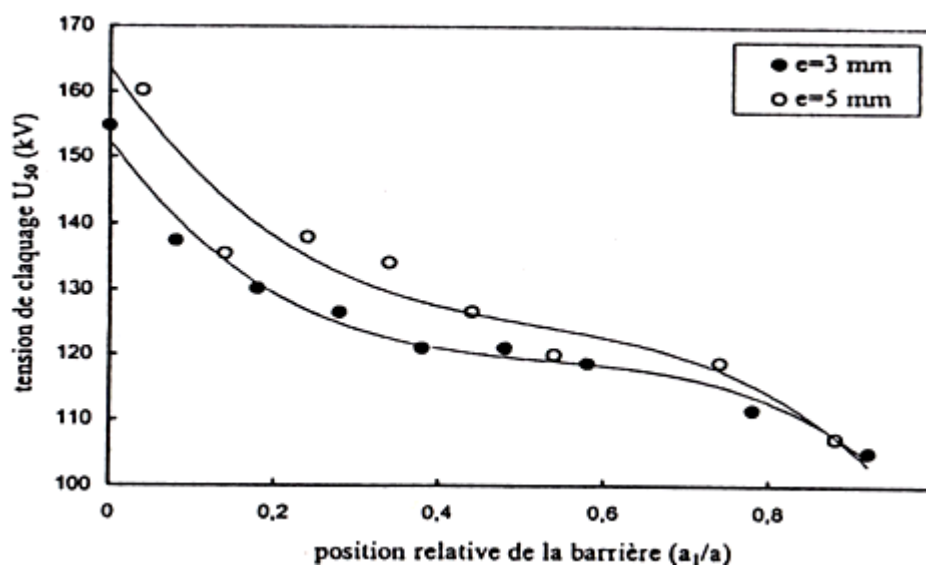


Figure I.10: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière en polyéthylène de diamètre $D=50$ mm; rayon de la pointe=0,25mm.

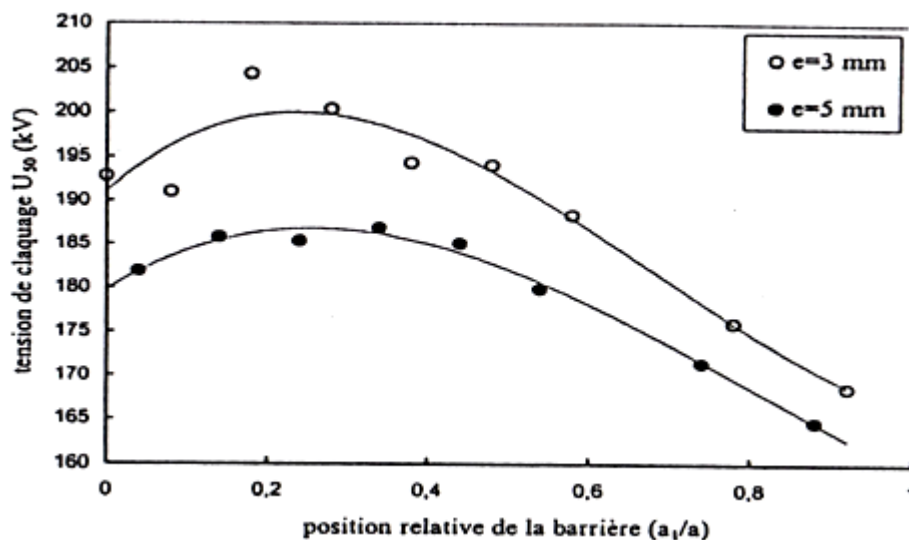


Figure I.11 : Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative, Distance inter-électrodes $a=50$ mm ; barrière en polyéthylène de diamètre $D=50$ mm; rayon de La pointe $=0,25$ mm

La rigidité diélectrique de l'arrangement pointe-barrière-plan augmente significativement avec la largeur de la barrière (de 1,25 à 1,5 selon la polarité). 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 [7]. Lorsque la position relative de la barrière augmente, la longueur minimale de la décharge diminue ainsi que la tension de claquage.

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 [7]

I.9.5 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 [7]. Cette diminution est fonction de la position de la barrière et du rayon de l'ouverture.

L'importance du rayon du trou est significative uniquement lorsque la barrière est placée au voisinage de la pointe. En effet, au-delà de cette position son influence devient négligeable. L'influence des perforations est d'autant plus marquée pour les petits intervalles que pour les grands intervalles [7,9].

I.9.6 Influence de la nature de la barrière

L'efficacité de la barrière dépend également de sa nature, sous tension de choc, il a été observé que pour des distances $d < 50$ cm, en polarité négative comme en polarité positive, une barrière en bakélite est plus efficace qu'une barrière en polyéthylène (figure I.10). En augmentant la distance inter électrodes, une barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite [7].

La différence entre une barrière en bakélite et en autre en polyéthylène réside, en plus des valeurs de leur permittivité et des pertes diélectriques, dans la résistance mécanique aux chocs de chaque matériau.

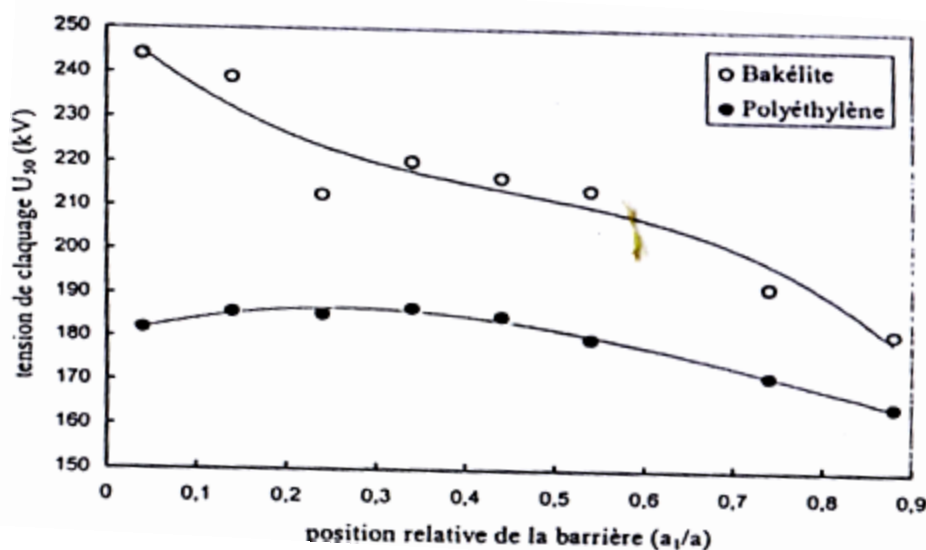


Figure I.12 : Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=5$ mm; rayon de la pointe $=0.25$ mm.

Par ailleurs, l'auteur [7] a remarqué qu'en augmentant la distance inter-électrodes ($a=100$ mm), une barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite. Cette efficacité est d'autant plus importante que la barrière est proche du plan.

I.10 Conclusion

Il ressort de cette analyse bibliographique que les mécanismes de pré claquage et de claquage dans les structures d'isolation mixtes sont très complexes. Cette complexité des phénomènes réside dans le comportement des interfaces isolantes solide /liquide. Les phénomènes liés à l'insertion d'une barrière isolante dans les grands intervalles d'huile dépendent des différents processus physico-chimiques apparaissant à l'interface solide/huile. Les matériaux constituant cette dernière et le champ électrique jouent un rôle important dans les deux phases de claquage et de pré claquage. Les barrières isolantes augmentent la rigidité diélectrique dans un système pointe-plan en modifiant la distribution du champ électrique. En effet le système pointe-barrière-plan est équivalent à deux systèmes d'électrodes pointe-barrière et barrière - plan, dont le champ électrique dans le second système est quasi-uniforme.

Suite à ces travaux, notre étude s'inscrit dans le même axe de recherche. Elle concerne la caractérisation de la rigidité diélectrique du système pointe-plan avec et sans barrière sous tension alternative en fonction des paramètres physiques et géométriques. Nous nous intéressons à l'interprétation des phénomènes responsables de claquage et de préclaquage dans ces structures d'isolation mixtes en se basant sur les travaux déjà effectués dans l'air et dans les intervalles d'huile.

Chapitre II
***Techniques et méthodes de
mesures expérimentales***

II.1 Introduction

Au cours de ce travail de recherche, nous avons utilisé différentes techniques de mesures et montages expérimentaux que nous allons décrire dans ce chapitre. Tout d'abord, nous donnons des informations sur la cellule d'essai, le circuit d'essai et les caractéristiques des échantillons solides et l'huile minérale considérés. Nous nous intéressons à l'étude de la tension de claquage de l'huile de transformateur, des courants et de la charge de pré claquage, dans un système pointe-plan, avec et sans barrière, sous tension alternative. Nous présentons les différents signaux de courants et de la charge enregistrés par l'oscilloscope numérique, pour les deux systèmes avec et sans barrière.

Compte tenu de l'importance de l'état de l'huile minérale dans la détermination des paramètres de claquage et de pré claquage, il est intéressant de connaître les caractéristiques de l'huile minérale de transformateur avant et après son utilisation. Il faut suivre l'évolution de son état lorsqu'elle est soumise à une série de claquage, afin de mettre en évidence l'influence du vieillissement électrique sur l'altérabilité de cette dernière. Nous présentons les différentes techniques de mesures selon les normes internationales, qui concernent l'huile minérale et ses caractéristiques physiques, chimiques et électriques, en fonction du nombre de claquage ainsi que les résultats obtenus.

La plupart des équipements utilisant des diélectriques ou isolants liquides sont destinés à un fonctionnement en alternatif. L'assurance de la fiabilité totale dans les appareils haute tension mettant en jeu de grands volumes de liquides diélectriques rend nécessaire la compréhension des phénomènes qui conduisent à la rupture diélectrique et des mécanismes qui en sont à l'origine. La majorité des travaux sur l'influence des barrières isolantes dans les grands intervalles d'huile ont été effectués en tension continue et en chocs de foudre, ce qui nous a incités à étudier les phénomènes de claquage et de pré claquage de l'huile de transformateur dans les grands intervalles sous tension alternative où différents types de charges interviennent dans le développement de la décharge électrique.

II.2 Techniques expérimentales

II.2.1 Cellule d'essais

La cellule d'essais est une cuve en plexiglas, de 50cm de longueur, 50cm de largeur et 71.5cm de hauteur. Ses parois transparentes sont d'épaisseur 1.5cm, servant à la visualisation de phénomènes de la décharge. La cellule contient 175 litre d'huile de transformateur et un système d'électrodes pointe-plan, monté horizontalement dans la cuve. Cette dernière est posée sur un support à 80cm du sol (Figures II.1 et II.2).

La configuration pointe-plan donne lieu aux tensions de claquage les plus basses, et est ainsi recommandée dans la pratique pour le dimensionnement des isolations (les champs moyens de claquage sont relativement faibles : quelques dizaines de kilovolts par centimètre [37]).

L'électrode pointe de forme conique est en laiton de différents rayons de courbures (1, 2, 3, 4, 5 et 6mm), Son diamètre est vérifié après chaque essai. L'utilisation du laiton permet d'effectuer un très grand nombre d'essais sans trop éroder la tête de la pointe. Cette dernière est montée sur une tige mobile en acier.

L'électrode plane est un disque en acier de 35cm de diamètre dont les bords ont été arrondis selon le profil de Rogowski. La distance inter-électrodes est ajustable et peut varier de 0 jusqu'à 12cm.

Nous remplissons la cellule d'essai d'huile minérale; cette dernière est versée lentement pour éviter la formation de bulles d'air. Ensuite, une barrière isolante est insérée dans l'intervalle inter-électrodes de telle manière qu'elle soit bloquée entre les électrodes (Figure II.2).



Figure (II.1) : Vue de la cellule d'essais

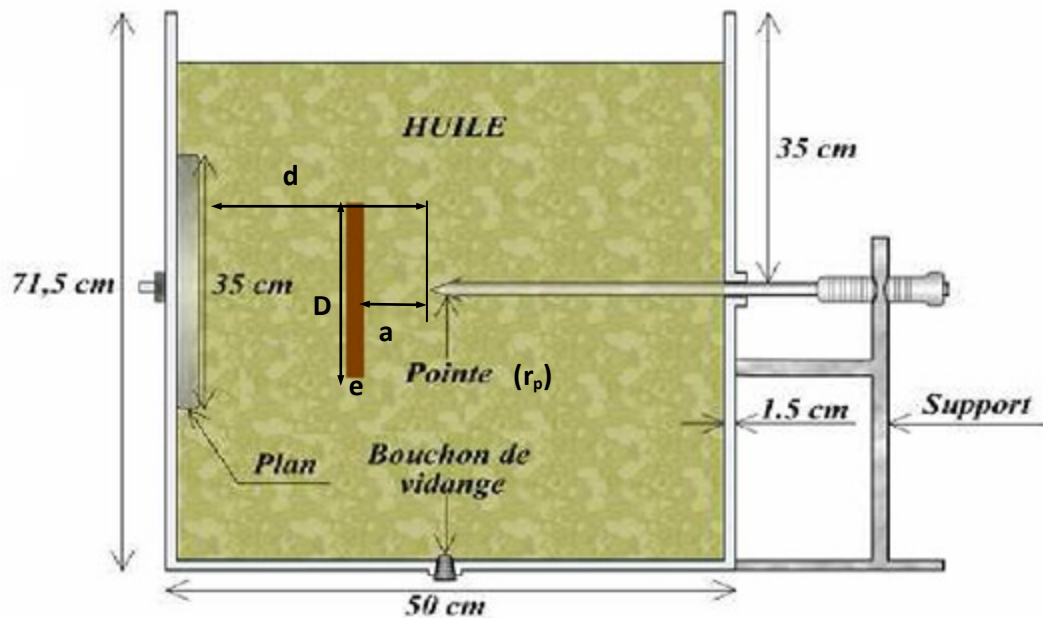


Figure (II.2) : Schéma de la cellule d'essais, vue de face

II.2.2 Barrières isolantes

Dans nos essais, nous avons utilisé des barrières isolantes de forme circulaire en bakélite ($\epsilon_r=5$) et en presspahn ($\epsilon_r=3$) (figure II.3). Les matériaux sont fournis par l'entreprise SKMK (Sharikat Khadamat Mouhaouilat Kahrabaia) SONELGAZ de Blida et de Gué de Constantine. Elles sont maintenues verticalement entre les électrodes, à différentes positions « a/d » par rapport à la pointe. Leur état de surface est contrôlé après chaque claquage. Elles sont changées après chaque perforation.

Pour chaque essai, la barrière est maintenue perpendiculaire à l'axe portant l'électrode pointe. Cette dernière est réalisée de telle manière qu'elle s'accroche sur les parois supérieures de la cellule et se déplace facilement le long de ces parois.

Nous avons pris en considération l'ensemble des caractéristiques géométriques relatives à la barrière telles que sa position dans l'intervalle inter-électrodes, son épaisseur et sa largeur.

La position relative de la barrière est définie par la distance (a/d). Cette distance prend différentes valeurs entre zéro et d (figure II.2).

a : étant la distance entre l'électrode pointe et la barrière.

d : étant la longueur axiale de l'intervalle pointe –plan.

Les positions choisies sont: $a/d=0$; $a/d=0.2$; $a/d=0.4$; $a/d=0.6$; $a/d=0.8$; $a/d=1$.

Les distances d étudiées sont égales à : 4cm, 6cm, 8cm, 10cm et 12cm.

Pour les deux types de matériaux utilisés, les barrières sont de diamètres $D=10, 14$ et 20 cm et d'épaisseurs $e = 2$ et 4 mm.

Tous les essais sont effectués avec une pointe de rayon de courbure constant ($r_p = 6$ mm).

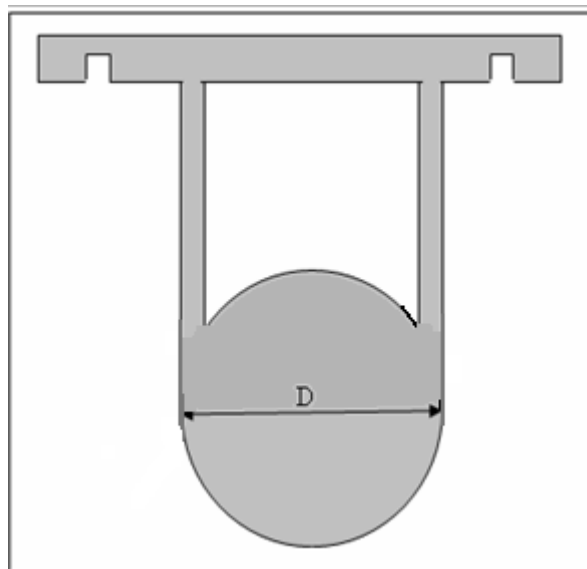


Figure (II.3) : Forme de la barrière utilisée

II.2.3 Caractéristiques des matériaux utilisés

Avant d'effectuer les essais, les barrières sont bien nettoyées avec de l'alcool isopropylique puis insérées entre les électrodes. Les différentes caractéristiques des matériaux utilisés sont données dans le tableau (II.1).

Matériaux isolants	Permittivité relative	Rigidité diélectrique (kV/mm)
Presspahn	3	25
Bakélite	5	30
Huile minérale	2.12	>30

Tableau II.1 : Propriétés Diélectriques des matériaux utilisés

II.2.4 Présentation de l'huile

Le liquide utilisé dénommé « Borak 22 », est une huile minérale, de type naphénique de permittivité ($\epsilon_r = 2.12$). Celle-ci est employée par la SONELGAZ pour le remplissage des transformateurs. Les propriétés diélectriques sont présentées dans le tableau (II.1). Cette huile obéit à des conditions de stockage rigoureuses dans des fûts étanches, en vue de sa protection de la dégradation et de l'humidité.

II.2.5 Circuits d'essais et de mesure

Le circuit d'essais comprend les équipements suivants (figure II.4):

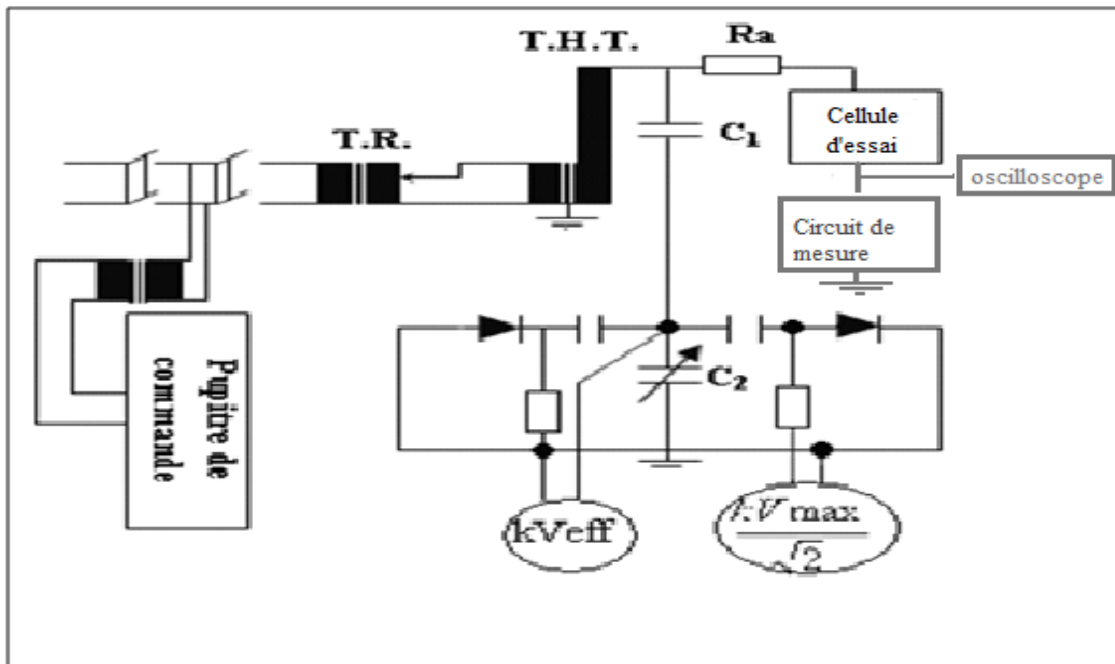


Figure II.4: Circuit d'essai

1) Un transformateur de réglage (TR)

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

- Tension primaire nominale : 220 V (50 Hz).
- Tension secondaire réglable de 0 à 500 V.
- Puissance apparente nominale : 50 kVA.

2) Un transformateur d'essais

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

- Tension primaire : 0.5 kV (50Hz).
- Tension secondaire nominale : 300 kV.
- Puissance apparente nominale : 50 kVA.
- Tension de court-circuit : 5.46 %.
- Résistance d'amortissement: $R_a \cong 30\Omega$, la résistance de l'enroulement BT = 0.0365Ω , celle de l'enroulement HT = 4893Ω .

3) 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 HT ($C_1 = 400\text{pF}$), en série avec une capacité C_2 variable permettant de réduire de 1/1000 la tension d'essai. 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 crête de la tension.

4) 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 de la tension au secondaire du transformateur de réglage, ainsi que des tensions de crête et efficace au secondaire du transformateur d'essai.

5) Des appareils annexes de protection

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire 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 250A. Ces protections sont liées au circuit de la bobine du contacteur principal. La protection est suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

II. 3 Circuits de mesure

II. 3.1 Mesure de la tension de claquage

La mesure de la tension de claquage a été effectuée pour chaque configuration à l'aide d'un voltmètre électrostatique, donnant la valeur de la tension en kilovolts efficaces. Cette mesure permet de déterminer les paliers des tensions à appliquer, pour l'enregistrement du courant. La tension de claquage est déterminée sur une moyenne de six essais pour chaque valeur (CEI 156) [18]. L'analyse statistique des données sur les graphiques a montré que l'écart type des valeurs mesurées est insignifiant (de l'ordre de 0.1%).

II.3. 2 Mesure du courant et de la charge

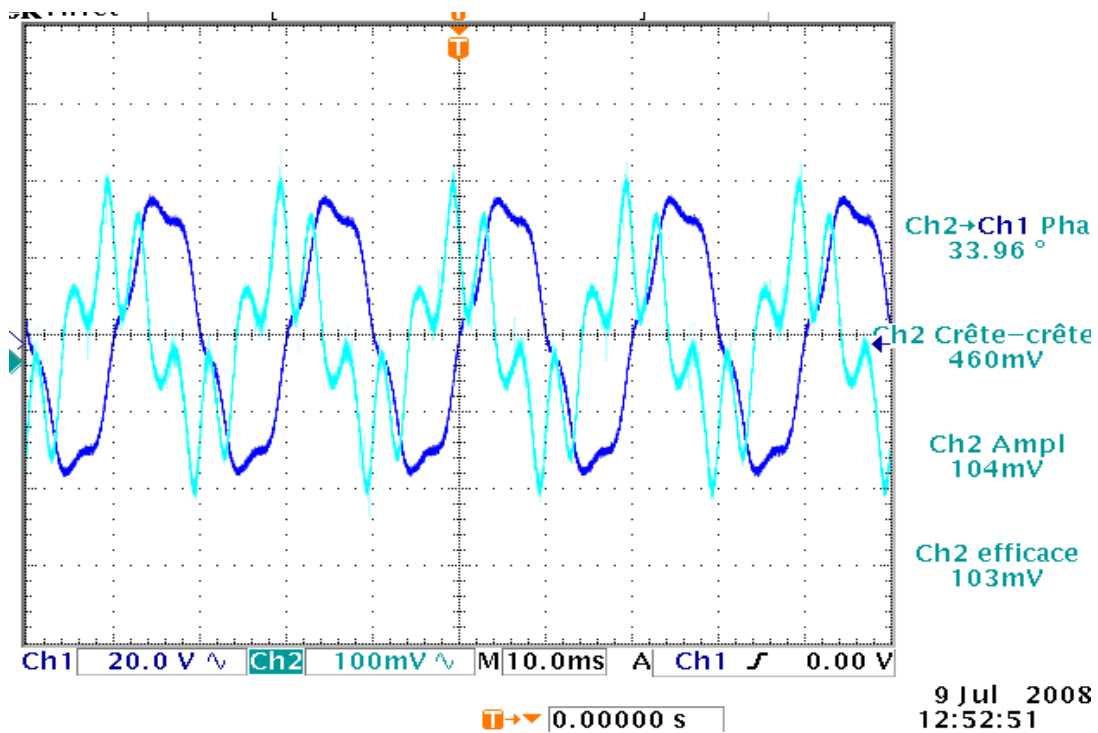
Le courant est mesuré à travers une résistance R de $1k\Omega$, non inductive, connectée entre l'électrode plane et la terre. L'onde est reportée à l'aide d'un câble coaxial, permettant la visualisation de la tension (image du courant) sur un oscilloscope numérique (TEKTRONIX TDS 3052B) d'une bande passante de 500 MHz. Les informations obtenues sont enregistrées par l'oscilloscope et transmises à un ordinateur pour y être traitées. Pour éviter l'influence des parasites dans le signal recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique couverte avec du papier aluminium et mise à la terre, formant ainsi un écran électrostatique.

Pour la mesure de la charge de pré claquage, nous avons utilisé le même circuit que celui de la mesure du courant, en remplaçant la résistance par une capacité de $0.02 \mu\text{F}$. La charge et le courant obtenu représentent la moyenne de six valeurs.

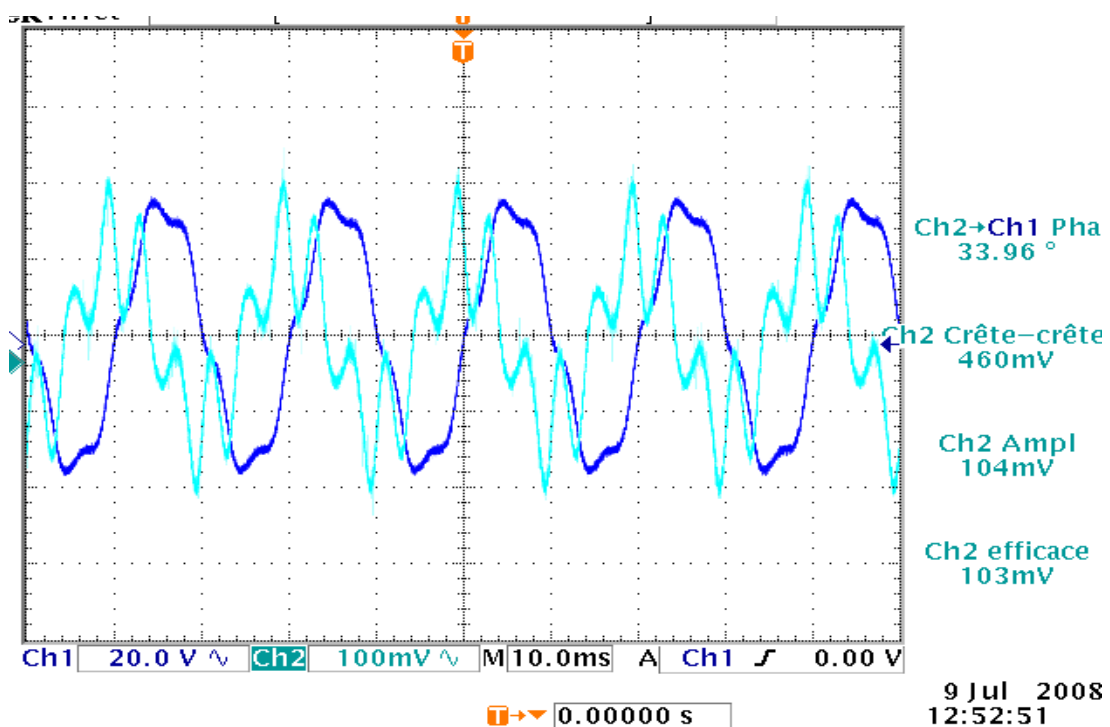
Afin de recueillir totalement le signal de la tension aux bornes de la capacité ou de la résistance, nous avons utilisé un adaptateur à l'entrée de l'oscilloscope.

II.4 Forme du courant

Le courant obtenu est un signal périodique présentant des "déformations". Ces dernières se présentent sous la forme de pics au niveau des deux alternances (positive et négative), et deviennent plus importantes avec l'accroissement de la tension appliquée (Figures II.5 et II.6). Pour déduire le caractère du courant traversant entre les électrodes, nous visualisons simultanément le courant et la tension d'alimentation.



Figure(II.5): Signaux courant-tension, pour une tension appliquée de 10kV, d=4cm



Figure(II.6): Signaux courant-tension, pour une tension appliquée de 25kV, d=4cm.

Les deux figures (II.5 et II.6) illustrent les deux signaux relatifs à la tension délivrée par le transformateur haute tension et le signal aux bornes de la résistance représentant ainsi l'image du courant de préclaquage. Nous observons que le signal de courant est périodique, il présente des distorsions par rapport au signal de la tension appliquée. En effet, nous remarquons aussi une légère distorsion de la sinusoïde de cette tension délivrée au secondaire du transformateur d'essais à Haute Tension. Cette distorsion provient de l'onde non sinusoïdale du réseau d'alimentation [32].

Pour tous les niveaux de tension appliquée et toutes les distances inter-électrodes, nous observons un déphasage entre le courant et la tension approximativement de 90° . Ce déphasage reflète le caractère purement capacitif du courant confirmant les résultats déjà obtenus par d'autres chercheurs [14].

II.5 Forme de la charge.

La démarche de mesure est de prendre pour chaque niveau de tension, la valeur moyenne de six mesures pour chaque essai, après nous enregistrons l'image donnée par l'oscilloscope. Aux figures (II.7 et II.8), nous présentons simultanément les oscillogrammes de la tension aux bornes de la capacité de mesure qui représentent une image de la charge et la tension appliquée. Les deux courbes sont pratiquement en phase et possèdent approximativement la même allure.

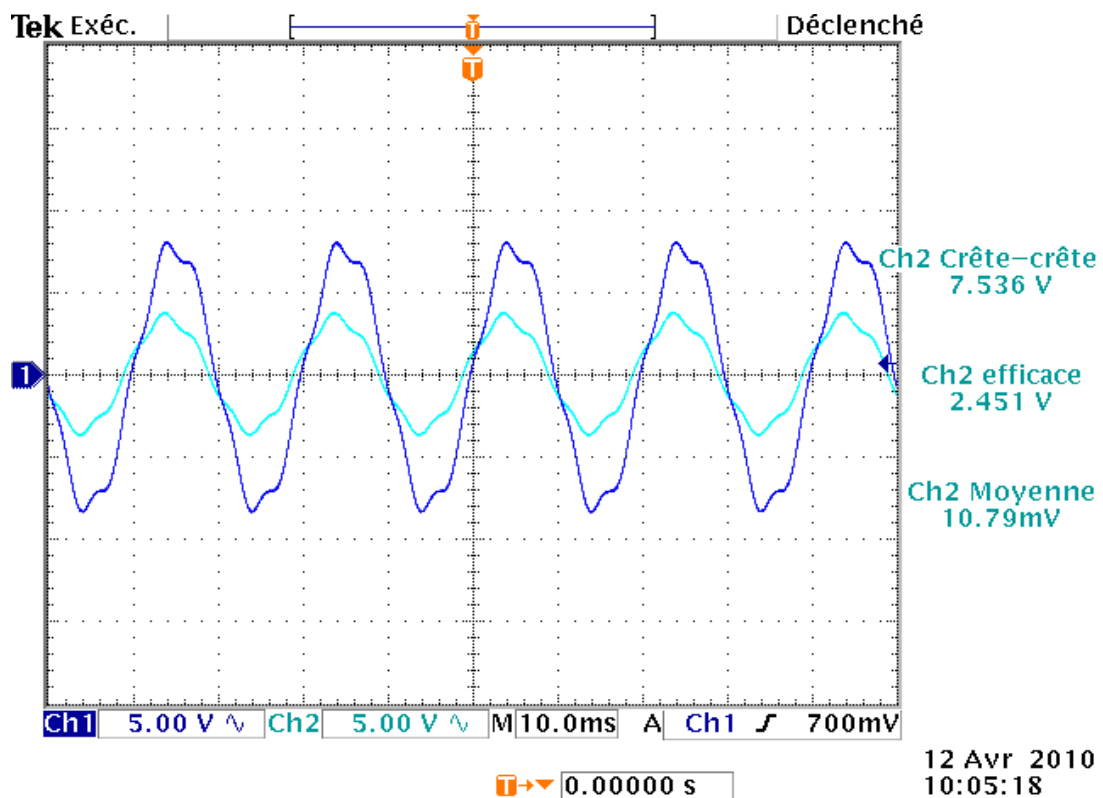


Figure II.7 : Signaux charge- tension pour une tension appliquée système $U=5\text{kV}$ $d=6\text{cm}$, système sans barrière.

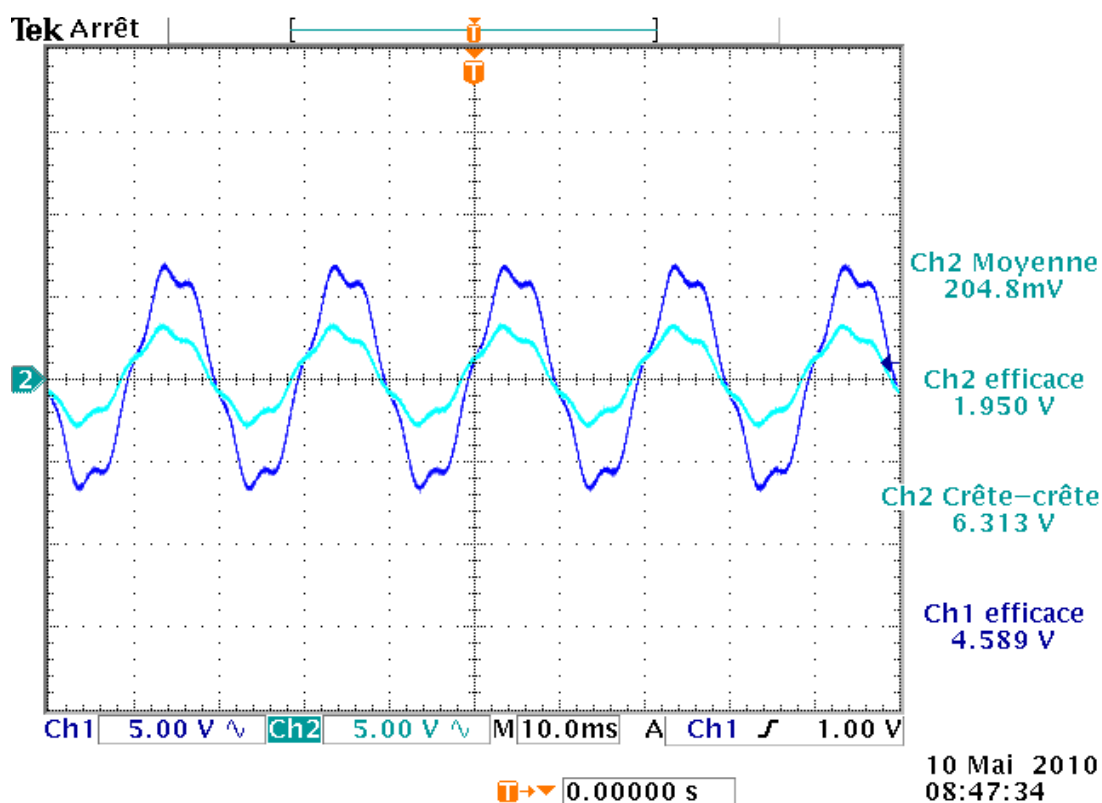


Figure II.8: Signaux charge- tension pour une tension appliquée système $U=5\text{kV}$ $d=4\text{cm}$, système avec barrière.

II.6 Analyses physico-chimiques

Afin de mettre en évidence l'influence du vieillissement électrique sur l'altérabilité de l'huile en service et ses répercussions sur les performances d'un transformateur, nous avons procédé aux analyses physico-chimiques et diélectriques des différentes propriétés de l'huile isolante en fonction du nombre de claquages, selon des normes internationales [17-20]. Nos échantillons d'huile ont été prélevés en essayant d'atteindre les régions les plus affectées c'est à dire au milieu du bac (au niveau des électrodes). Les échantillons sont mis dans des bouteilles opaques, lavées avec de l'eau, puis séchées. Ces dernières portent la date du prélèvement et le nombre de claquages effectués.

Par ailleurs, pour suivre l'évolution de ces propriétés, nous avons eu recours à la manipulation des différents appareils de mesure du laboratoire d'analyse des huiles de transformateurs de Sharikat Khadamet Mouhaouilat Kahrabaia (SKMK) SONELGAZ Blida.

Nous avons étudié, en premier lieu, certaines des caractéristiques de l'huile obtenues à partir des analyses physico-chimiques, et ce à l'état neuf puis après stockage. En deuxième lieu, nous avons prélevé ces mêmes caractéristiques après les différentes séries de claquages.

II.6.1 Mesure de la viscosité cinématique à 20°C

Les mesures de la viscosité cinématique ont été réalisées à l'aide d'un viscosimètre de type TAMSON (PMT) conformément aux recommandations de la norme ISO 03104 [19]. L'appareil (Figure II.9) est muni d'un éclairage, d'un bain d'huile, d'un thermomètre et d'un régulateur de température. On remplit le viscosimètre à capillaires en verres avec le volume d'huile à examiner et pour une température de 20 °C. Il est aspiré à l'aide d'un aspirateur de

l'huile dans le tube capillaire jusqu'au niveau supérieure. A l'aide d'un chronomètre, on mesure le temps (t) nécessaire à l'écoulement du produit entre les deux traits repères. La valeur de la viscosité cinématique est le produit du temps mesuré précédemment en secondes par la constante d'étalonnage de l'appareil.



Figure II.9 : Viscosimètre TAMSON (PMT) utilisé dans la mesure de la viscosité

La viscosité d'une huile est un paramètre important pour le refroidissement du transformateur. Plus la viscosité est faible, meilleur est le refroidissement [1].

L'analyse des différents échantillons d'huile montre que la viscosité cinématique est pratiquement constante en fonction du nombre de claquages (Figure II.10), Donc l'huile est toujours en bon état et pourrait être maintenue pour le reste des essais.

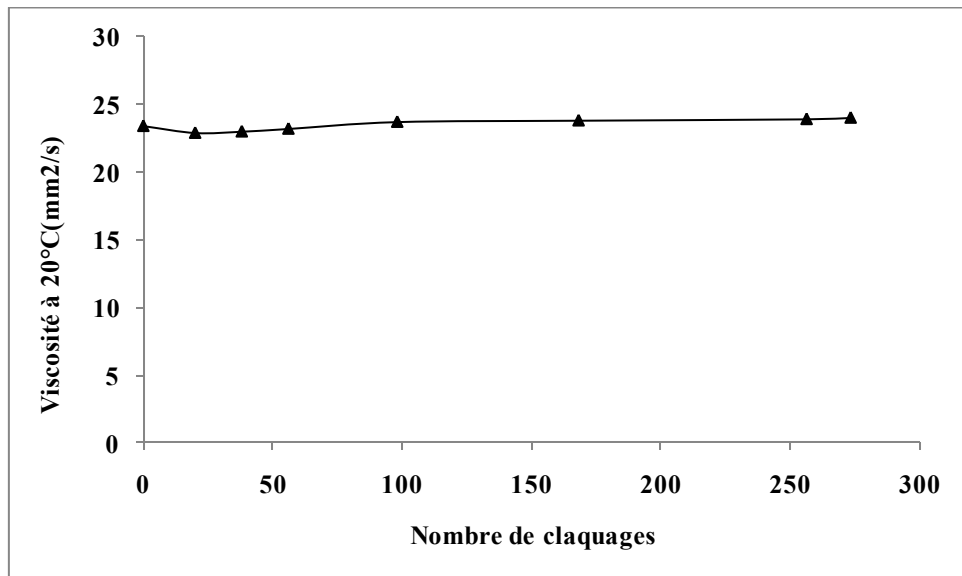


Figure II.10 : Variation de la viscosité cinématique en fonction du nombre de claquages

II.6. 2 Mesure de l'indice de couleur

La mesure de la couleur d'une huile isolante est déterminée à l'aide d'un colorimètre (Figure II.11) ayant pour étalons des verres colorés. La détermination de la couleur est évaluée

par comparaison optique (lumière transmise) à ces verres normalisés, qui donnent la même teinte que l'échantillon ou celui dont la couleur est juste supérieure.



Figure II.11 : Colorimètre LOVIBOND utilisé dans la mesure de l'indice de couleur

L'augmentation du nombre de claques entraîne la croissance de l'indice de couleur (Figure II.12). En effet, cette élévation est due à l'oxydation de l'huile, qui a pour conséquence la formation de produits acides [30]. Les valeurs de l'indice de couleur obtenues dans les analyses restent conformes à la norme ASTM D 1500. La détermination de la couleur pour l'huile neuve permet d'apprécier sa qualité. Par ailleurs, pour l'huile en service, sa détermination constitue un moyen efficace pour suivre son oxydation.

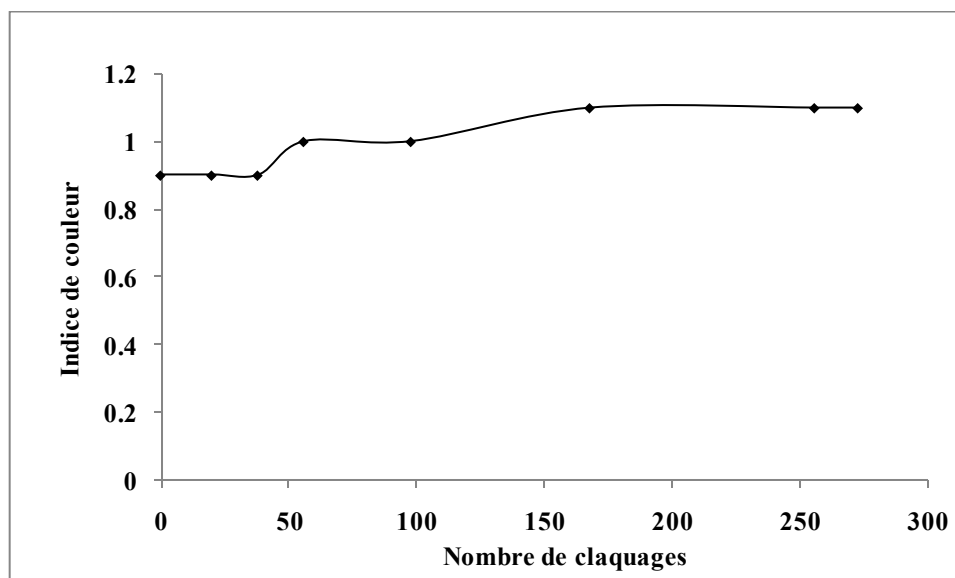


Figure II.12 : Variation de l'indice de couleur en fonction du nombre de claques

II.6.3 Mesure du point d'éclair

Le point d'éclair a été déterminé par la méthode en coupe fermée telle que la méthode de Depensky - Martens. Pour cela, nous avons eu recours à un appareil auto flash de marque GALLENKAMP (Figure II.13), conformément aux recommandations de la norme ISO 2719

[70]. Dès que la concentration des vapeurs émises par le chauffage progressif du liquide devient suffisante, pour former un mélange inflammable dans l'air, celui-ci brûle à l'approche d'une flamme, le système se déclenche automatiquement et la température affichée correspond au point d'éclair.



Figure II.13 : Auto flash GALLEKAMP utilisé dans la mesure du point d'éclair

La détermination du point d'éclair nous renseigne quant à la présence d'hydrocarbures gazeux dissous dans l'huile, par suite de défauts électriques ou thermiques. Le nombre de claquages n'a pratiquement pas d'effet sur le point d'éclair (Figure II.14), d'où la non formation d'hydrocarbures gazeux.

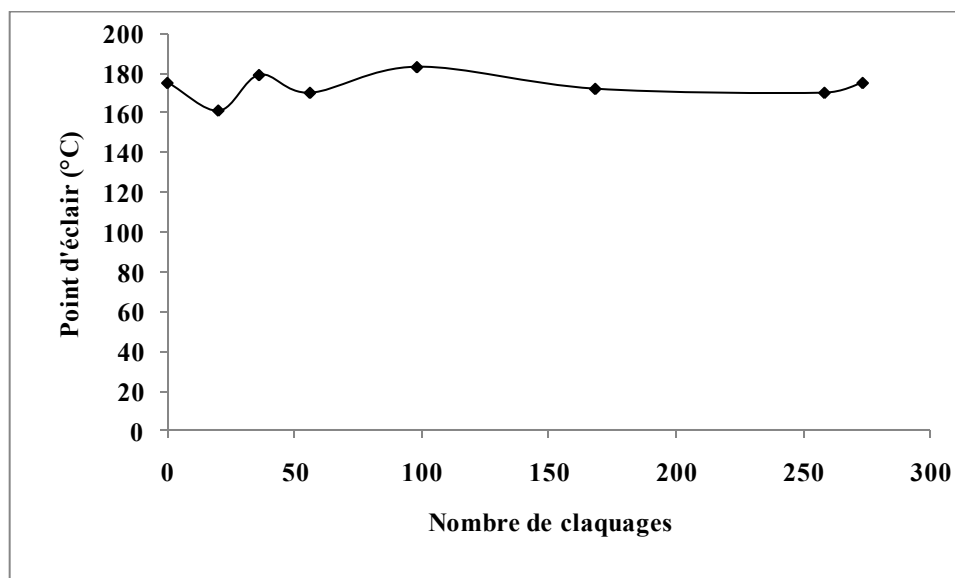


Figure II.14 : Variation du point d'éclair en fonction du nombre de claquages

IV.6. 4 Mesure de l'indice de réfraction

On appelle réfraction, le changement de direction que subit un rayon lumineux en passant d'un milieu optique donné à un autre. Ce changement est dû à une modification de la vitesse de propagation à partir du point appelé point d'incidence, où le rayon lumineux incident frappe

l'interface. L'indice de réfraction d'une huile isolante dépend en partie de sa composition chimique. Pour la mesure de l'indice de réfraction, nous avons eu recours à un réfractomètre (Figure II.15) de type CONVEX.



Figure II.15: Réfractomètre utilisé dans la mesure de l'indice de réfraction

L'indice de réfraction reste constant (Figure II.16) pour tous les échantillons d'huiles étudiés. Ce paramètre est une caractéristique de l'huile qui sert à identifier sa tendance naphténiq ue, paraffinique ou aromatique ainsi qu'il permet de contrôler sa pureté.

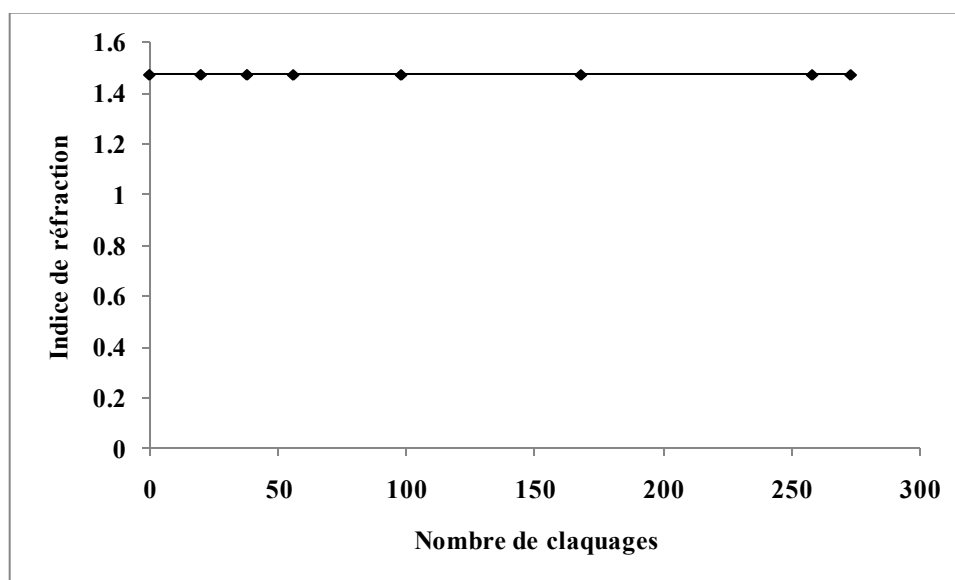


Figure II.16 : Variation de l'indice de réfraction en fonction du nombre de claquages.

II.6.5 Mesure de l'indice d'acidité

La mesure de l'acidité a été réalisée par le procédé chimique simple : la neutralisation, conformément aux recommandations de la norme CEI 296 [20].

L'acidité est exprimée en mg de KOH par g d'huile, c'est-à-dire le nombre de mg d'une solution de potasse alcoolique de normalité 0.1, nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile.

L'indice d'acidité est calculé au moyen de l'expression [20]:

$$IA = 0.1M V / m \quad (III.18)$$

Où :

0.1 : normalité de la solution KOH (g/l).

M : masse moléculaire de la solution KOH (56.1 g/moles).

m : masse de l'huile (g).

V : volume en ml de KOH, nécessaire pour avoir le virage du mélange (huile+solvant) neutralisé.

L'indice d'acidité d'une huile est une mesure de constituants ou agents contaminants, acides minéraux et/ou organiques, 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.

Les résultats obtenus (Figure II.17) indiquent une augmentation de l'indice d'acidité au début des claquages entre zéro et 20 claquages. Celui-ci se stabilise pour les autres claquages. A titre d'illustration, l'indice d'acidité passe de 0.016 (mg KOH/g) pour une huile neuve après stockage à 0.026 (mg KOH/g) après 258 claquages. Par ailleurs, l'indice d'acidité est inférieur à la limite fixée par la norme CEI 296 [20].

L'effet de la température joue un rôle prépondérant dans la réaction d'oxydation. La formation de grandes proportions d'acides a été constatée en vieillissement thermique dans des travaux antérieurs [29].

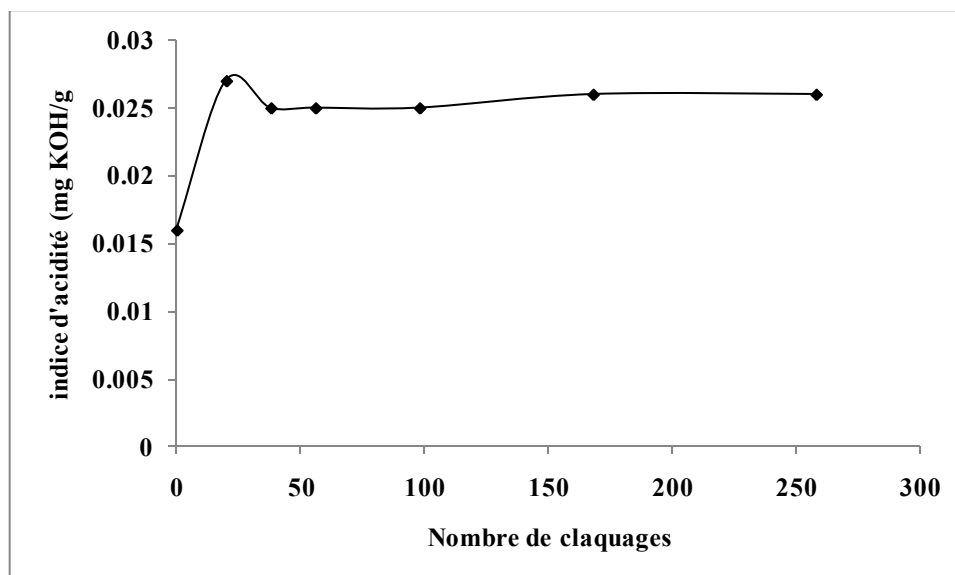


Figure II.17 : Variation de l'indice d'acidité en fonction du nombre de claquages

II.6.6 Mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité à 90°C

Le facteur de pertes diélectrique ($\text{tg } \delta$) et la permittivité relative (ϵ_r) ont été mesurés à l'aide d'un pont de Schering de type Dieltest DLT (Figure II.18), selon la norme CEI 247 [17].

La cellule d'essais contenant l'échantillon d'huile est constituée de deux cylindres coaxiaux de distance inter-électrodes de 5 mm. Le principe consiste à remplir la cellule d'huile, puis la chauffer jusqu'à 90° C sous une tension de 2 kV. Les résultats d'essais sont affichés et imprimés automatiquement.

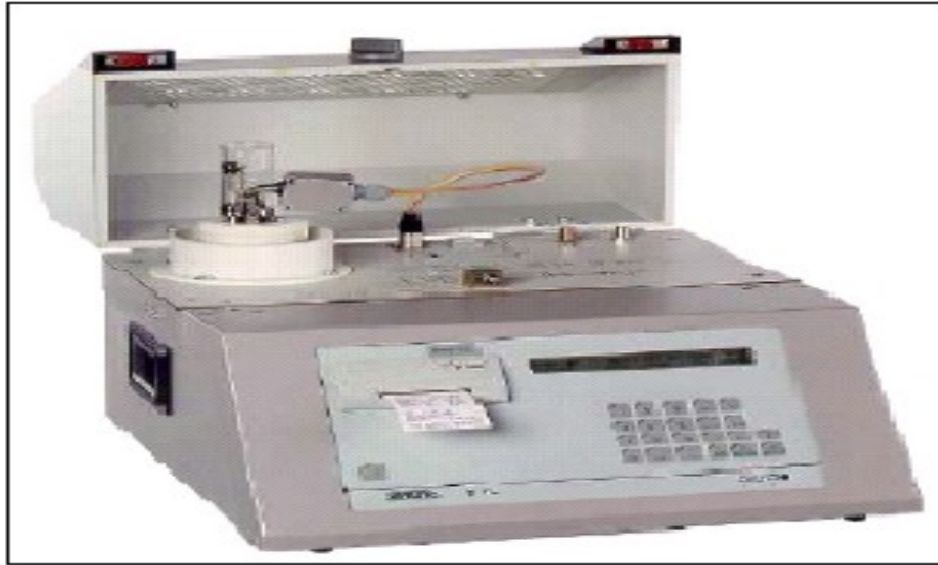


Figure II.18 : Dieltest DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité relative

II.6.6.1 Permittivité relative

Les résultats obtenus (Figure II.19) montrent que la permittivité relative reste pratiquement inchangée avec le nombre de claquages. En effet, ce paramètre non affecté par l'usage est une caractéristique intrinsèque du liquide. Ce résultat s'accorde avec ceux trouvés par d'autres auteurs en vieillissement thermique et en vieillissement en service [29, 78]. Notons que les faibles valeurs de la permittivité de l'huile obtenues à 20°C sont caractéristiques de l'huile minérale. En effet, les huiles minérales pour transformateurs sont considérées comme liquides non polaires, c'est-à-dire qu'elles ne possèdent pas de moments dipolaires permanents et dont la permittivité relative est inférieure à 2,5.

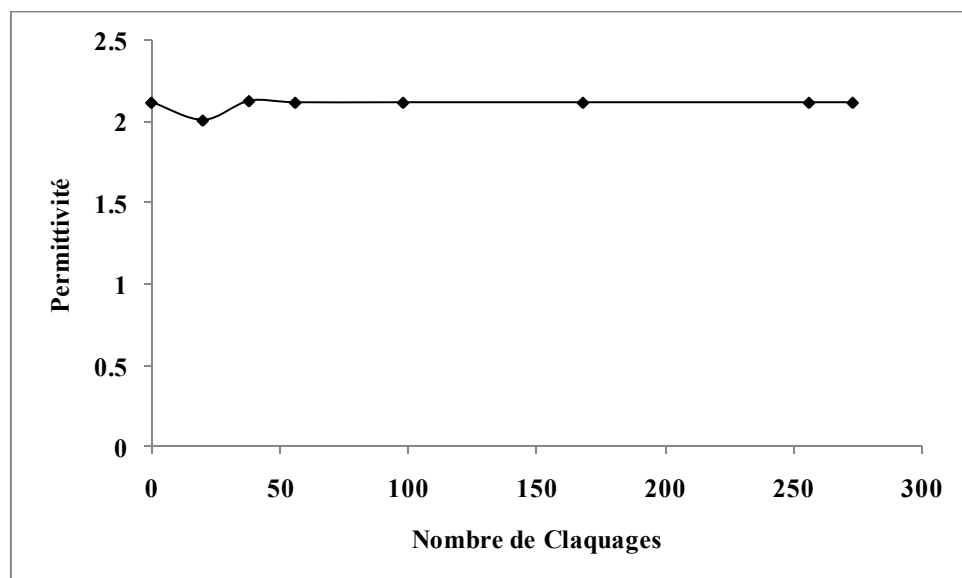


Figure II.19 : Variation de la permittivité relative en fonction du nombre de claquages

II.6.6.2 Facteur de pertes diélectriques

La caractéristique représentée à la figure (II.20) montre que le facteur de pertes diélectriques augmente en fonction du nombre de claquages de l'huile. La croissance des pertes diélectriques peut se justifier par la création de porteurs de charges divers. Nous citons les ions formés par des molécules d'huile isolante, les composés d'oxydation polaires et l'existence d'agents contaminants tels que les impuretés polarisables.

L'augmentation du facteur de dissipation électrique résulte de ces multiples facteurs. Souvent les traitements de filtrage et de déshydratation, ont une action bénéfique sur le facteur de dissipation [29].

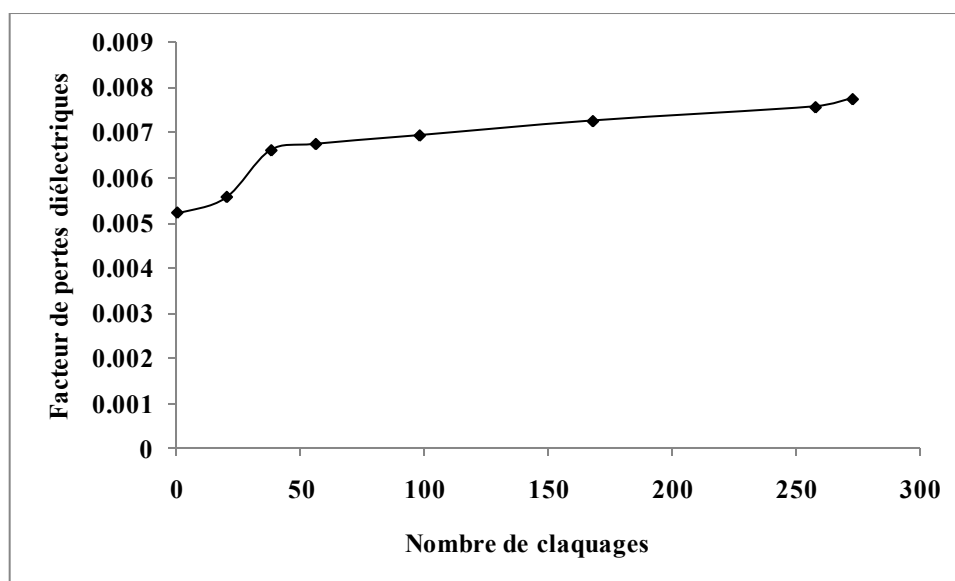


Figure II.20 : Variation du facteur de pertes diélectriques à 90°C en fonction du nombre de Claquages.

II.7 Conclusion

Les résultats d'analyses des différents échantillons de l'huile minérale isolante, neuve et usagée sont conformes aux recommandations des normes utilisées. Ces résultats confirment uniquement une variation de quelques caractéristiques physico-chimiques et diélectriques durant le vieillissement électrique. En effet, nous avons pu tirer les constatations suivantes :

- ✓ La permittivité relative reste inchangée au nombre de claquages. Contrairement au facteur de pertes diélectriques qui augmente durant le vieillissement électrique.
- ✓ L'indice d'acidité et la couleur augmentent en fonction du nombre de claquages, conséquence de produits d'oxydation en présence.
- ✓ La viscosité cinématique croît légèrement. Cela s'explique par l'évolution du temps d'écoulement de cette huile polluée.

- ✓ Le point d'éclair et l'indice de réfraction sont peu sensibles au nombre de claquages.

- ✓ La combinaison de tous les résultats obtenus se traduit par une faible pollution de l'huile pour une série d'essais de 273 claquages.

Chapitre III

Influence des barrières isolantes sur la tension de claquage

III.1 Introduction

Nous nous proposons dans ce chapitre, de présenter les principaux travaux que nous avons effectués au sein du laboratoire de Haute Tension de l'ENP concernant l'effet des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur sous tension alternative 50Hz.

Nous présentons d'abord les résultats concernant la tension de claquage dans le système pointe-plan sans barrière, qui servira de référence pour la comparaison des résultats expérimentaux du système avec barrière. Nous décrivons l'évolution de la rigidité diélectrique et de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes ainsi que l'influence du rayon de courbure de l'électrode pointe. Par la suite, nous nous intéressons à l'évolution de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes et de la position relative de la barrière, pour les deux types de matériaux et les épaisseurs choisis. Une comparaison sera effectuée entre le système avec barrière et un autre sans barrière dont la distance inter-électrodes est égale à la somme des distances pointe-bord de la barrière, et bord de la barrière -plan.

III.2 Essais sans barrière

Les essais effectués sans barrière sont des essais de référence, ils nous permettent de connaître la tension de claquage du système pointe-plan, afin de la comparer à celle du système avec barrière. De plus, nous exploitons ces résultats pour voir l'influence des différents paramètres tels que la distance inter-électrodes et le rayon de courbure de la pointe sur la rigidité diélectrique du système. Les résultats obtenus sont reportés aux figures (III.1 à III.4). Ces essais sont réalisés pour une distance inter-électrodes variant de 1 à 12cm.

III.2.1 Influence de la distance inter-électrodes

La figure (III.1) représente la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour les différents rayons de courbures de l'électrode pointe. L'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne un accroissement de la tension de claquage. Ceci est attribué à la diminution de l'effet du champ électrique. Nos résultats concordent avec ceux obtenus par d'autres chercheurs sous tension impulsionnelle en polarité positive [44].

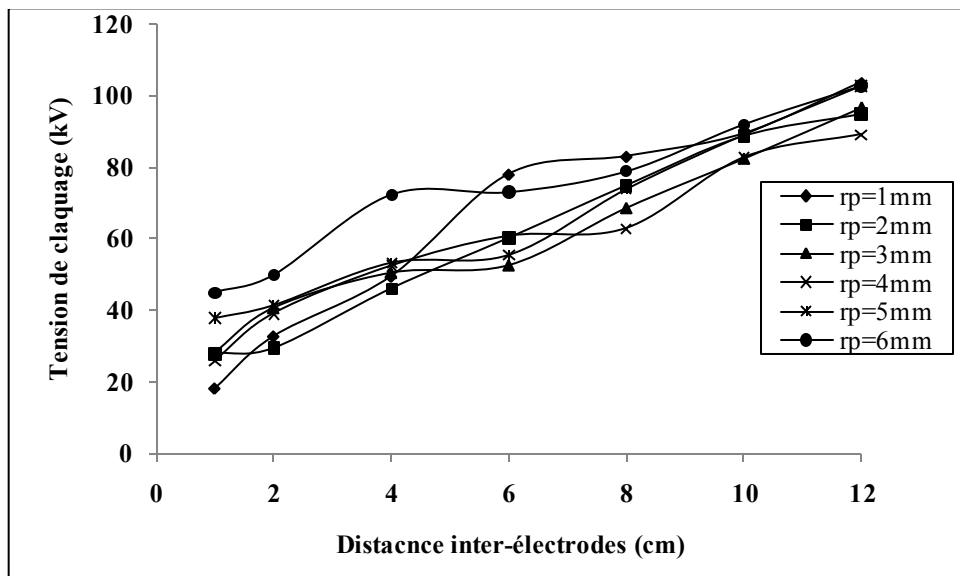


Figure III.1 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour différents rayons de courbures de la pointe

III.2.2 Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe

A la figure (III.2) nous représentons la variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes.

Nous constatons que la tension de claquage dépend du rayon de courbure de la pointe. Elle est d'autant plus importante que le rayon de courbure de la pointe est élevé. Cette augmentation s'accroît pour les grands rayons et les petites distances inter-électrodes. L'effet du rayon de courbure est faible et presque constant pour les intervalles inter-électrodes relativement grands (supérieurs à 6cm).

En conséquence, l'accroissement du rayon de courbure de la pointe engendre une diminution de l'intensité du champ électrique et devient moins non uniforme.

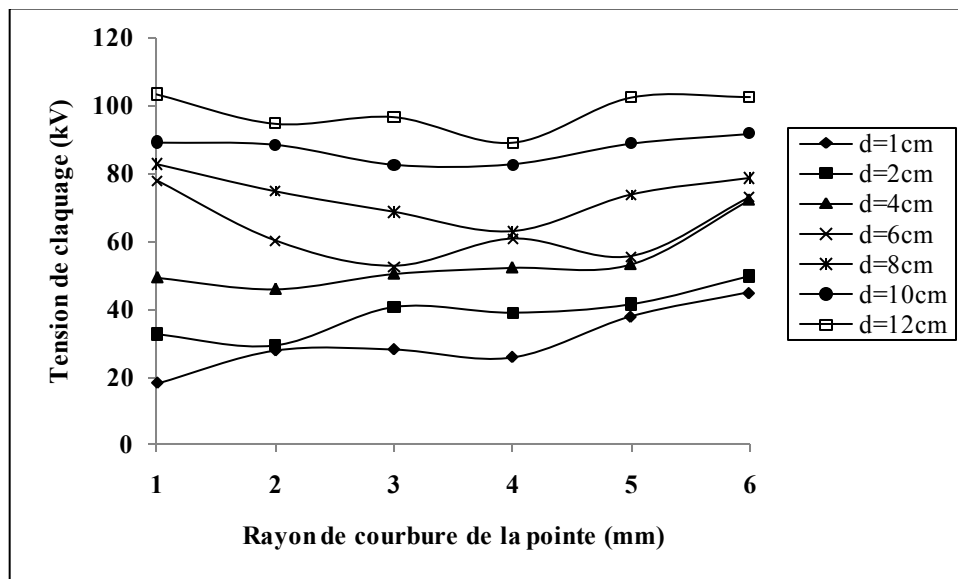


Figure III.2 : Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes

III.2.3 Rigidité diélectrique

Les figures (III.3) et (III.4) représentent la variation de la rigidité diélectrique moyenne définie par le rapport de la tension de claquage sur la distance inter-électrodes, respectivement en fonction de l'intervalle inter-électrodes et du rayon de courbure de l'électrode pointe.

D'après la figure(III.3), la rigidité diélectrique diminue quand la distance inter-électrodes augmente.

Par ailleurs, l'augmentation du rayon de courbure de l'électrode pointe engendre un accroissement de la rigidité diélectrique pour les petites distances ($d=1, 2$ et 4 cm) (fig. III.4), cet accroissement est la conséquence de l'uniformisation du champ électrique. Ce dernier, avec l'augmentation du rayon de courbure et la diminution de l'intervalle entre les électrodes, tend vers l'uniformité.

Pour les distances supérieures à 6cm, la rigidité diélectrique est pratiquement constante.

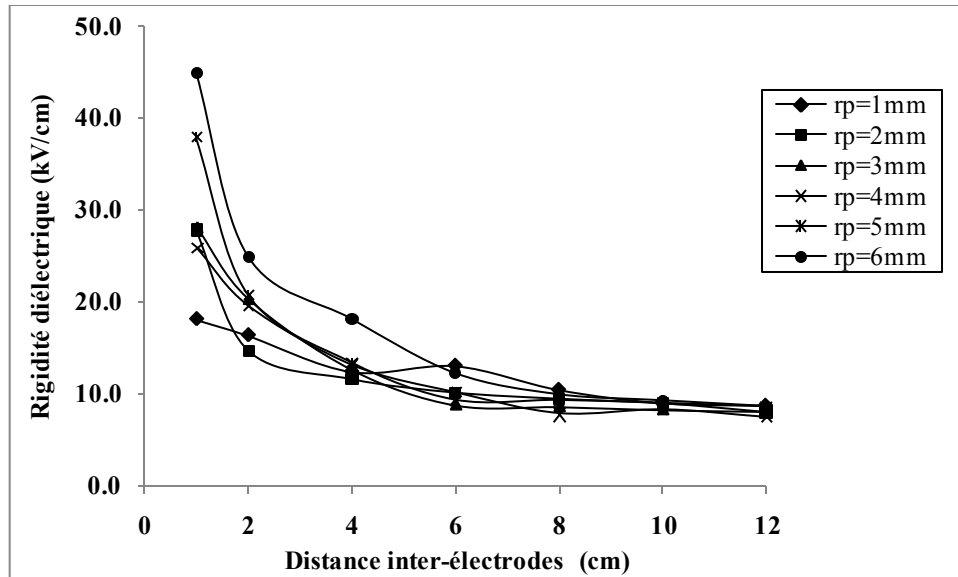


Figure III.3: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour différents rayons de courbure

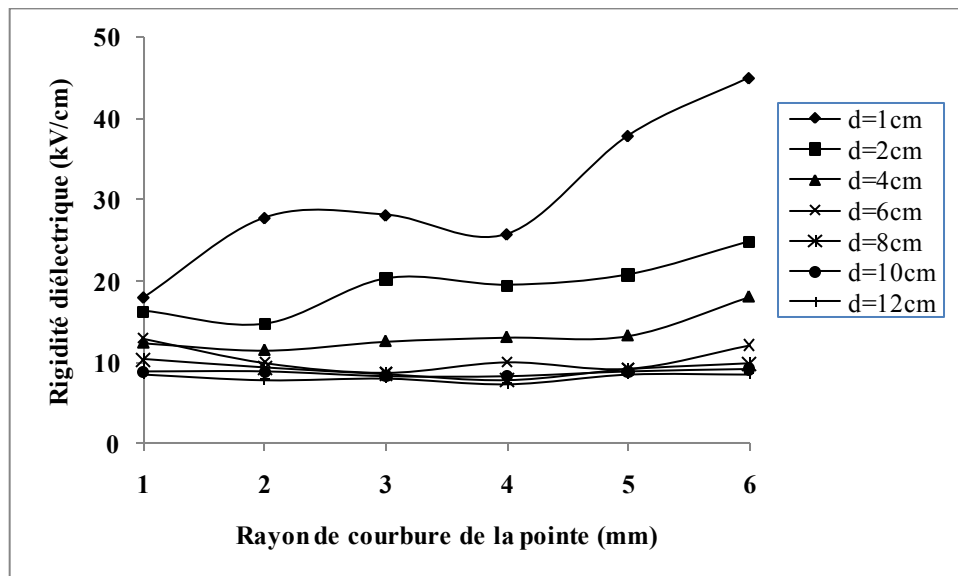


Figure III.4 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes

III.3 Essais avec barrière

Dans ce qui va suivre, nous considérons l'influence des caractéristiques physiques (permittivité en particulier) et géométriques (épaisseur, largeur et position de la barrière dans l'intervalle) sur la rigidité diélectrique d'intervalle d'huile dans un système d'électrodes divergents pointe-plan.

III.3.1 Influence de la position de la barrière

Il apparaît d'après les résultats expérimentaux que la position optimale de la barrière, relative à la valeur maximale de la tension de claquage, est entre 20 et 40% de l'intervalle inter-électrodes (Figures III.6 et III.7). Ce résultat rappelle celui obtenu par d'autres chercheurs sous tension continue et impulsionnelle [77]. En effet quand la barrière isolante s'approche de la pointe, la tension de claquage des intervalles d'huile augmente considérablement et atteint une

valeur maximale entre 20 et 40% de l'intervalle pointe-plan pour les deux types de barrière. Lorsque la barrière est au voisinage du plan, la tension de claquage décroît jusqu'à atteindre une valeur proche ou inférieure à celle du système sans barrière. L'augmentation de la tension de claquage est la conséquence de l'allongement du canal de la décharge disruptive [7,66].

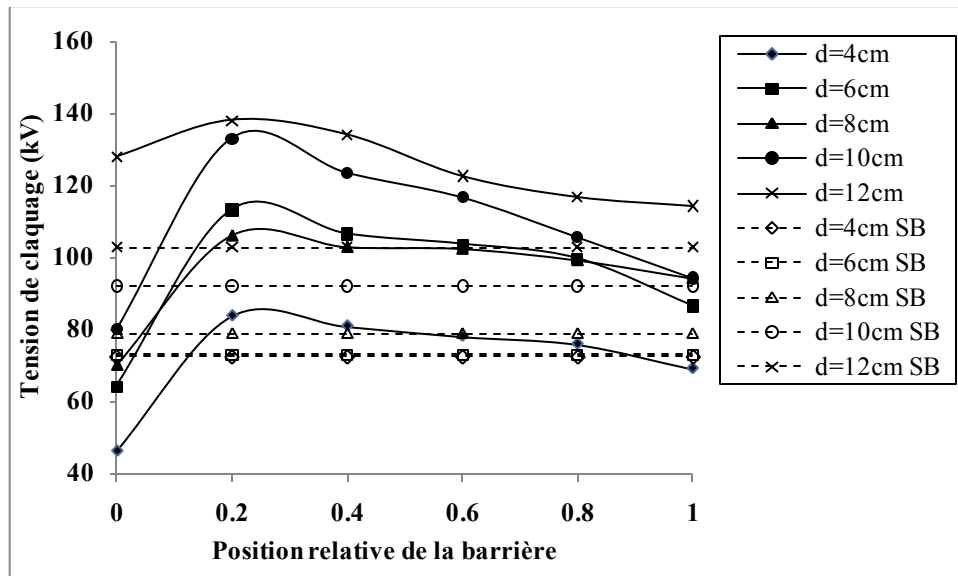


Figure III.6 : Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en presspahn $\epsilon=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes.

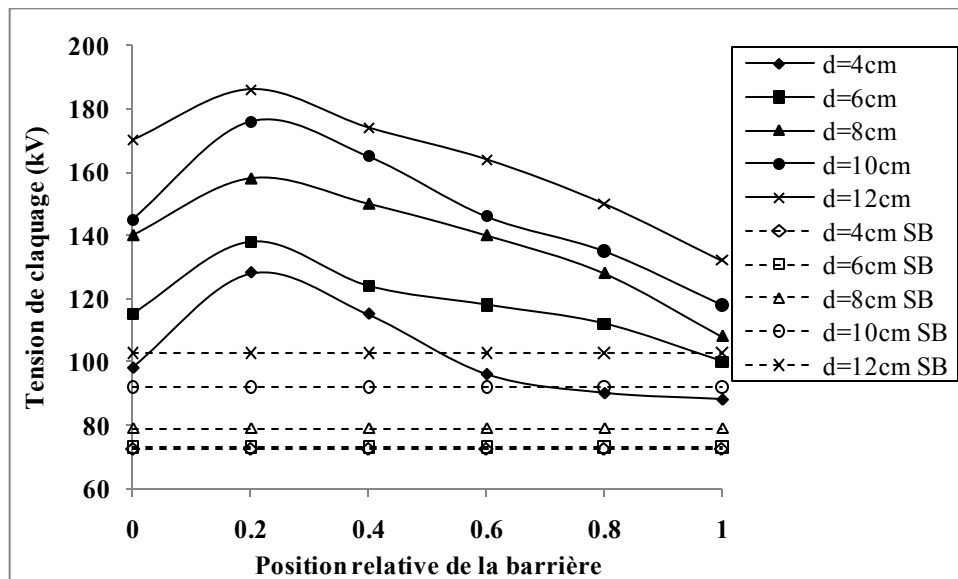


Figure III.7 : Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite $\epsilon=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes

Selon les figures (III.8 à III.11), l'efficacité de la barrière U_{ab}/U_{sb} (définie par le rapport de la tension de claquage avec barrière sur celle du système sans barrière) présente une position optimale de la barrière à 20% de l'intervalle inter-électrodes. Elle diminue pour les positions de la barrière comprises entre $a/d = 0.4$ et $a/d = 1$.

Dans le cas où la barrière est en contact avec l'une des électrodes, l'efficacité de la barrière est proche ou inférieure à 1, particulièrement pour la barrière en presspahn (Figures III.8 et III.9). Dans de tels cas, la décharge est généralement précédée de décharges préliminaires provoquant l'augmentation de la quantité de charge, facilitant ainsi l'apparition de décharges glissantes sur la

surface de la barrière ensuite le claquage. La charge superficielle a une influence sur le phénomène de claquage de l'isolant soumis à un champ électrique élevé. Dans le cas des grands intervalles ($d=10\text{cm}$ et $d=12\text{cm}$), une diminution de l'efficacité de la barrière pour les deux types de barrière est observée. Elle est maximale à une position comprise entre $a/d=20$ et $a/d=40\%$ de l'intervalle inter-électrodes, et minimale proche du plan à $a/d=1$ (Figures III.8 et III.9).

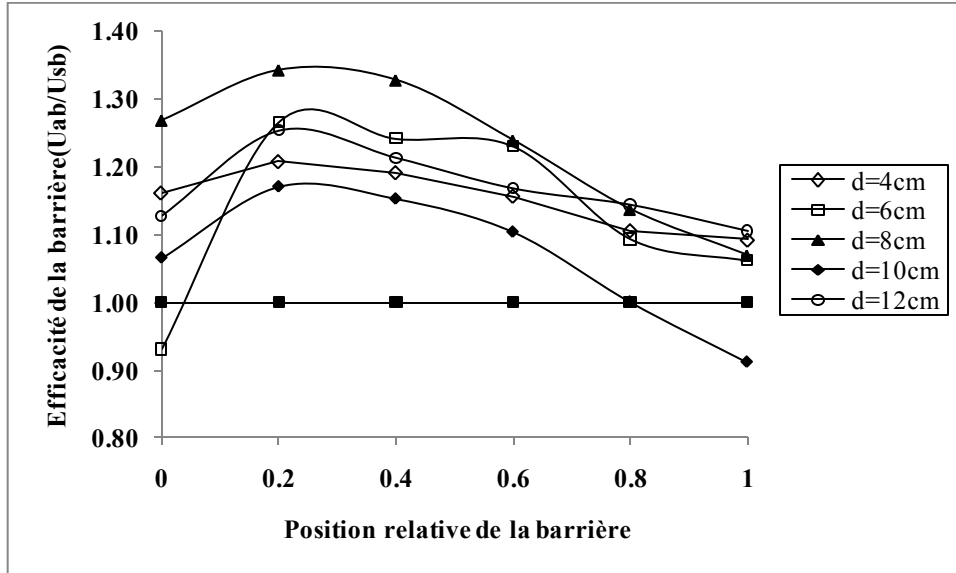


Figure III.8 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes.

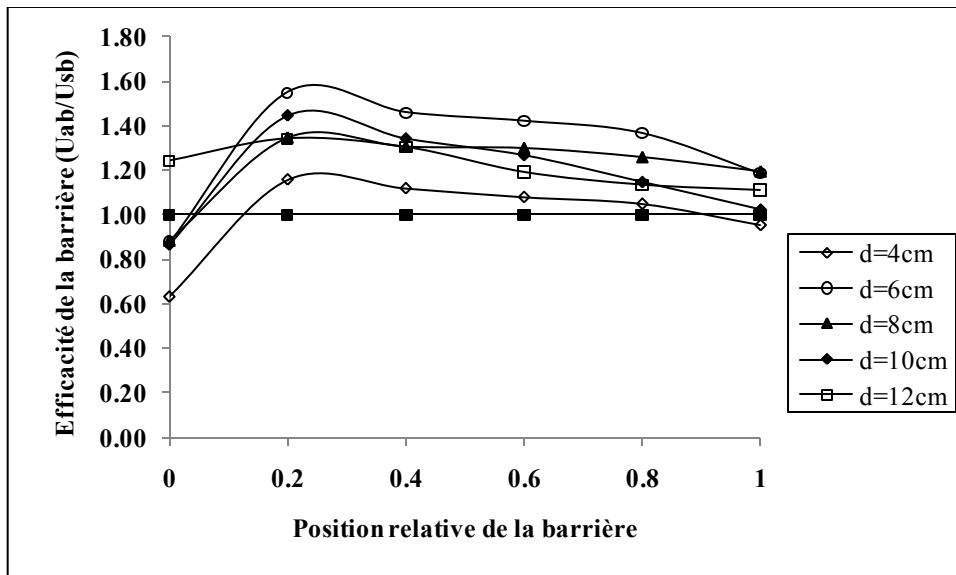


Figure III.9 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes

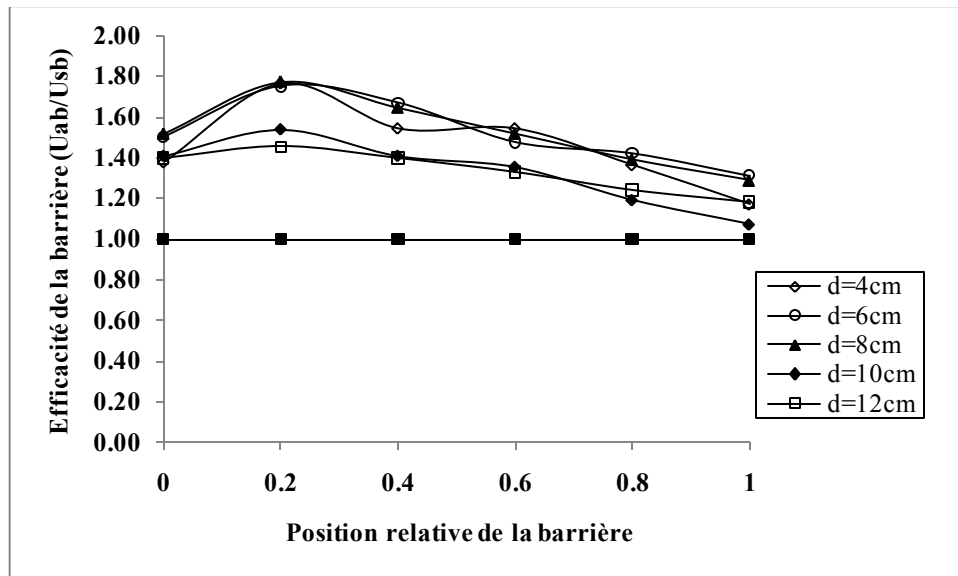


Figure III.10 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes

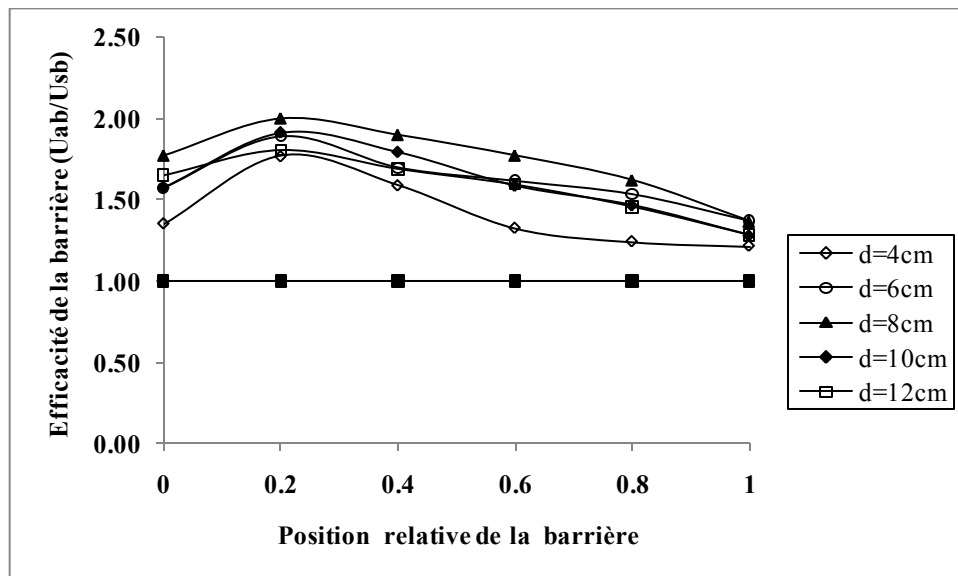


Figure III.11 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes

III.3.2 Influence de la distance inter-électrodes

Nous observons pour les distances inter-électrodes supérieures à 8cm, une diminution de l'efficacité de la barrière pour les deux types de matériau de la barrière choisis. Elle est maximale à la position $a/d=20\%$ et minimale proche du plan à $a/d=1$ (Figures III.12 et III.13).

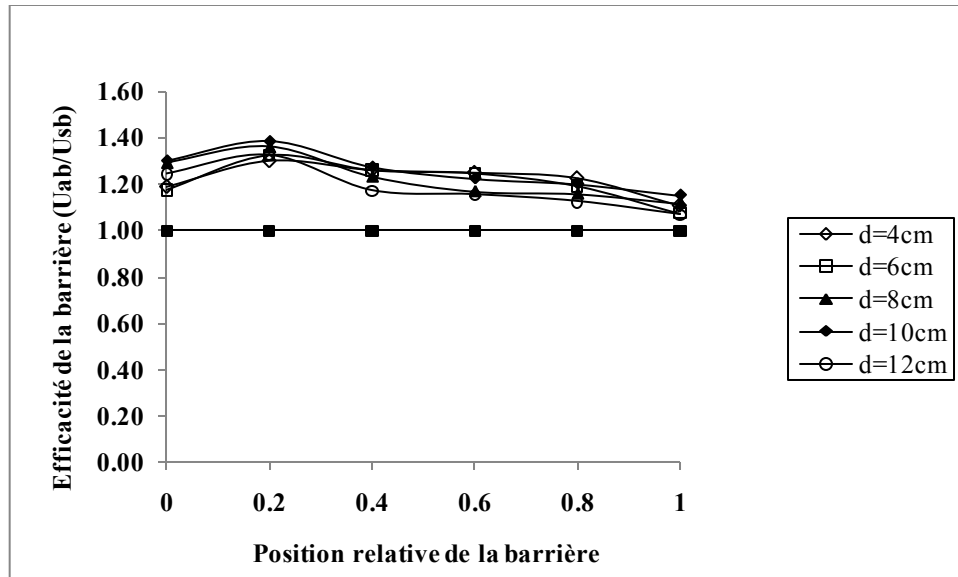


Figure III.12 : Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes

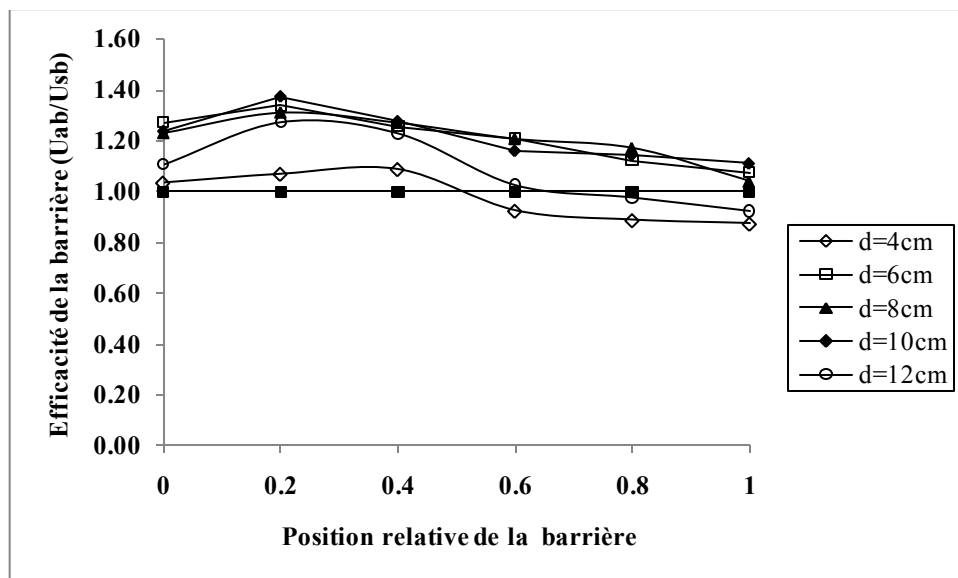


Figure III.13 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$ pour différentes distances inter-électrodes

L'insertion de la barrière conduit toujours à uniformiser le champ électrique entre la barrière et le plan. Elle modifie la distribution de la charge déposée, les ions positifs créant la charge sont alors freinés par la barrière et se répartissent à sa surface constituant une surface équipotentielle [7,14]. Dans ce cas, la présence de la barrière entre les électrodes transforme l'intervalle d'huile en un système stratifié composé de deux diélectriques en série (huile – barrière). Le système pointe-plan se compose de deux sous systèmes: l'un pointe - barrière et l'autre barrière – plan. Ce dernier est considéré comme un système plan-plan qui est le système le plus rigide. Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [7].

III .3.3 Influence des dimensions de la barrière

III.3.3.1 Influence du diamètre de la barrière

Afin d'évaluer l'influence du diamètre de la barrière sur la tenue diélectrique, nous avons regroupé l'ensemble des caractéristiques concernant les barrières utilisées de même nature, de même épaisseur mais de diamètres différents.

En analysant ces courbes (figures III.14 à III.19), nous remarquons que l'efficacité de la barrière (U_{ab}/U_{sb}) est plus importante pour la barrière la plus large, cela pour les deux types de barrières choisis. La position optimale de la barrière est toujours obtenue entre 20 et 40% de l'intervalle inter-électrodes. Cependant, l'augmentation de la tension de claquage avec le diamètre de la barrière est due à l'allongement de la trajectoire de la décharge. A partir de cette position optimale, l'efficacité de la barrière décroît pour tendre vers une valeur proche de celle du système sans barrière. Cette diminution de l'efficacité lors de l'éloignement de la barrière de la pointe, peut être attribuée à la réduction de la longueur minimale de la décharge (définie par la somme des distances pointe- bord de la barrière, épaisseur de la barrière et distance entre la barrière et le plan). A l'approche de la barrière de l'une des électrodes, la tension de claquage du système avec barrière est inférieure à celle du système sans barrière. Ceci serait surtout dû à l'effet des bords de la barrière. En effet, quand l'intervalle pointe barrière est court-circuité par la décharge, la poursuite de la décharge est plus facile à partir des bords de la barrière où le champ électrique intense engendre l'apparition des décharges préliminaires, ces dernières provoquent l'augmentation de la quantité de charges sur la surface de la barrière facilitant ainsi le claquage. Des résultats similaires ont été obtenus par d'autres chercheurs [7].

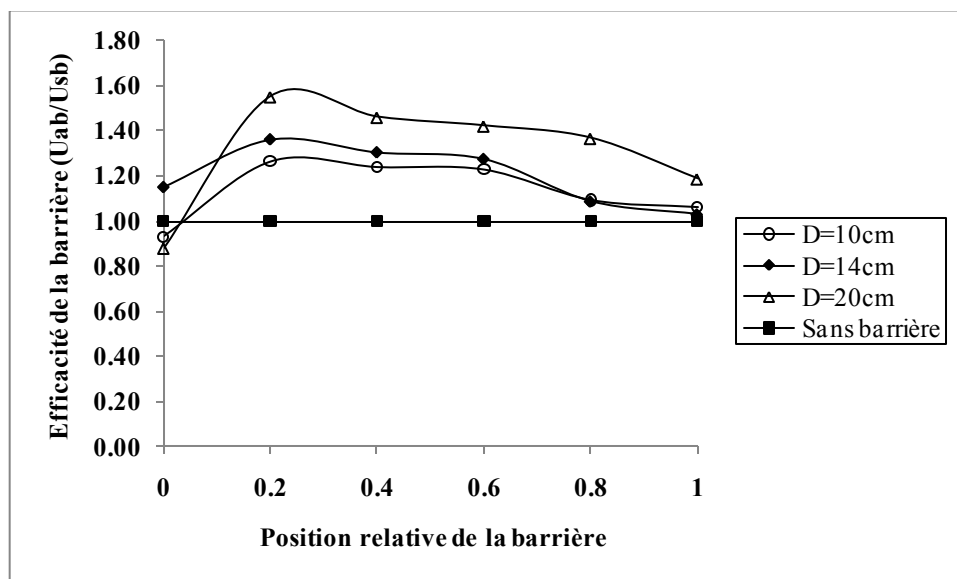


Figure III.14 : Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différents diamètres $e=2\text{mm}$, $d=6\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

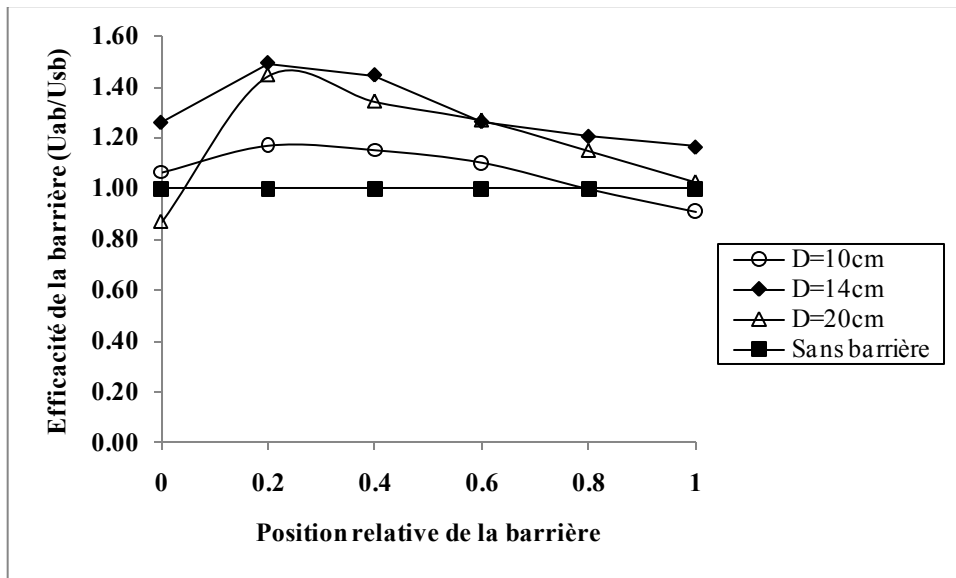


Figure III.15: Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différents diamètres $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

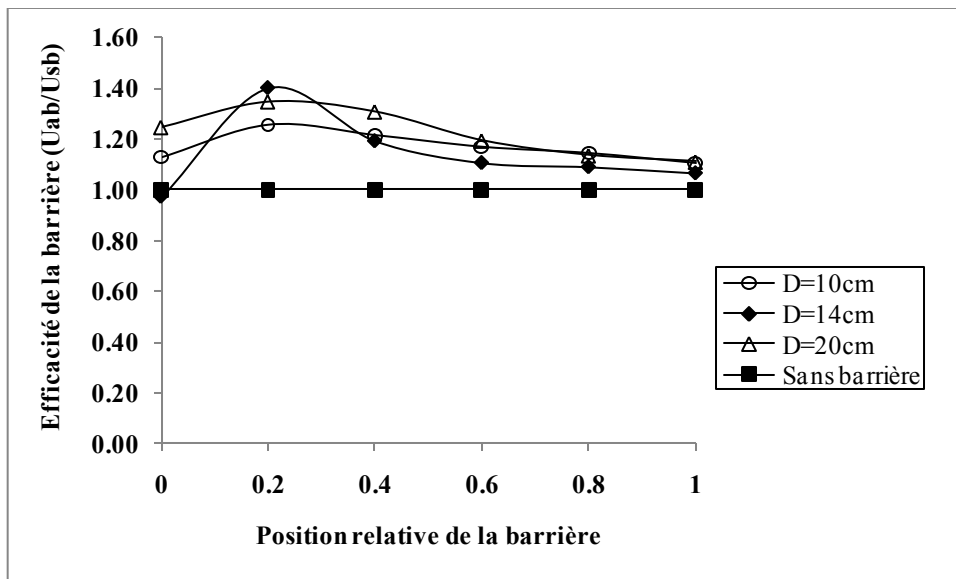


Figure III.16: Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différents diamètres $e=2\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

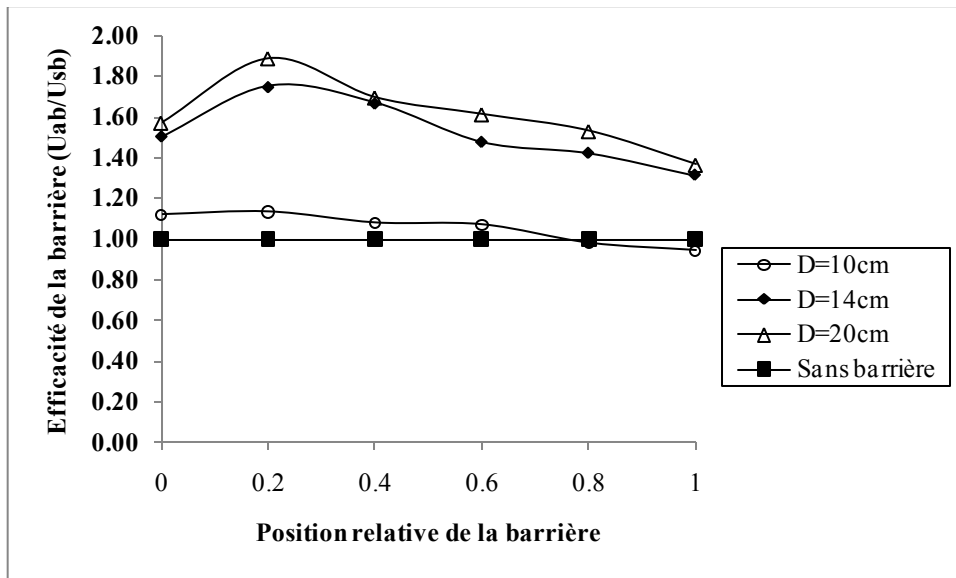


Figure III.17: Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différents diamètres $e=2\text{mm}$, $d=6\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

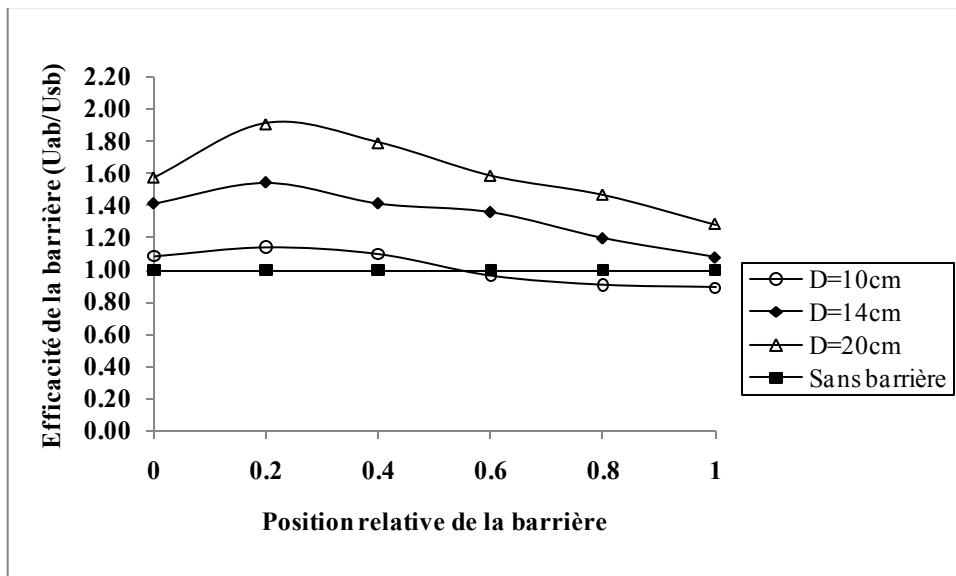


Figure III.18: Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différents diamètres $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

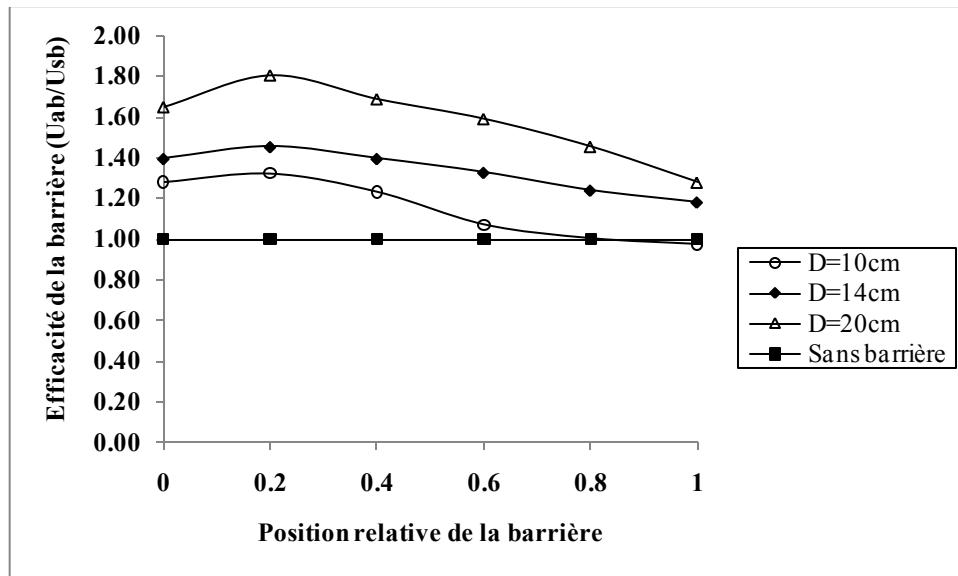


Figure III.19: Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différents diamètres $e=2\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

III.3.3.2 Influence de l'épaisseur de la barrière

Dans ces essais, nous considérons deux barrières de même diamètre mais d'épaisseurs différentes $e=2\text{mm}$ et $e=4\text{mm}$.

D'après les figures III.20 à III.23), pour une barrière de même dimension, de même nature mais d'épaisseurs différentes, la position optimale de la barrière (entre $a/d=0.2$ et $a/d=0.4$) n'a pas changé avec la variation de l'épaisseur. L'analyse des courbes montre que l'augmentation de l'épaisseur engendre l'accroissement de la tension de claquage pour toutes les positions de la barrière et une distance inter-électrodes donnée. Cette amélioration n'est pas trop significative pour les deux épaisseurs considérées, ceci est dû au fait que la variation de l'épaisseur de la barrière n'est pas trop grande. Nous pouvons en déduire que l'efficacité de la barrière est plus importante pour la barrière d'épaisseur la plus élevée [72].

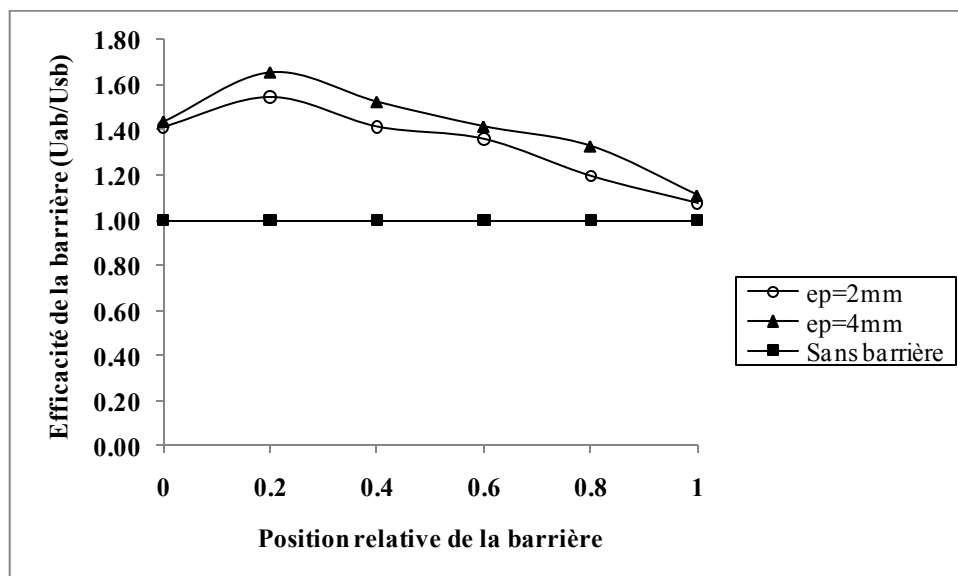


Figure III.20: Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs $d=10\text{cm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

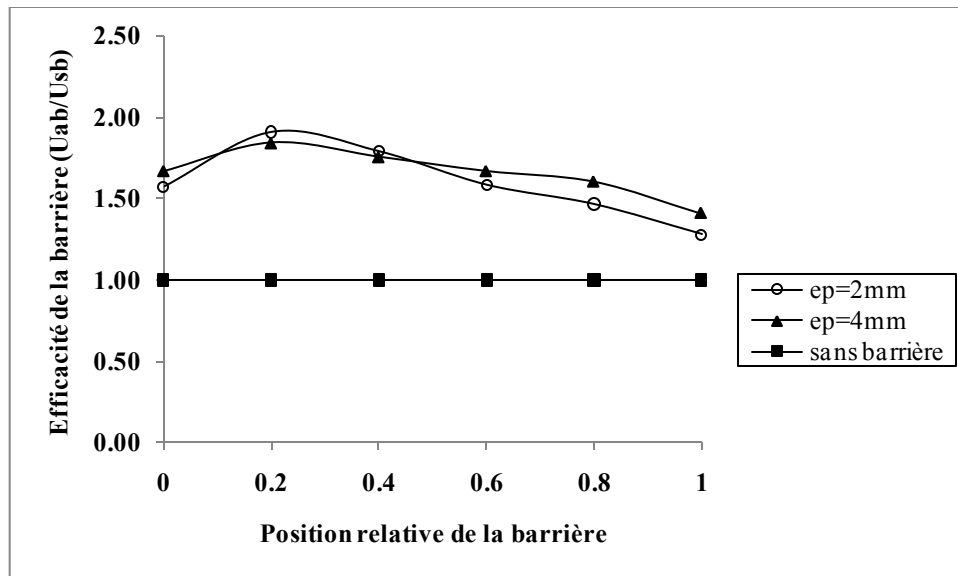


Figure III.21: Efficacité de la barrière en bakélite en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs $d=10\text{cm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

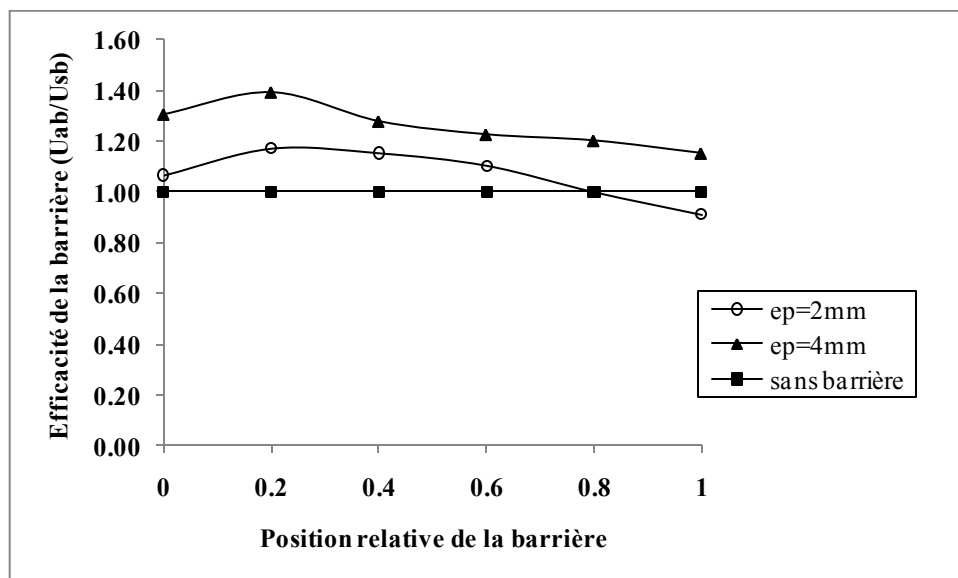


Figure III.22: Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs $d=10\text{cm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$,

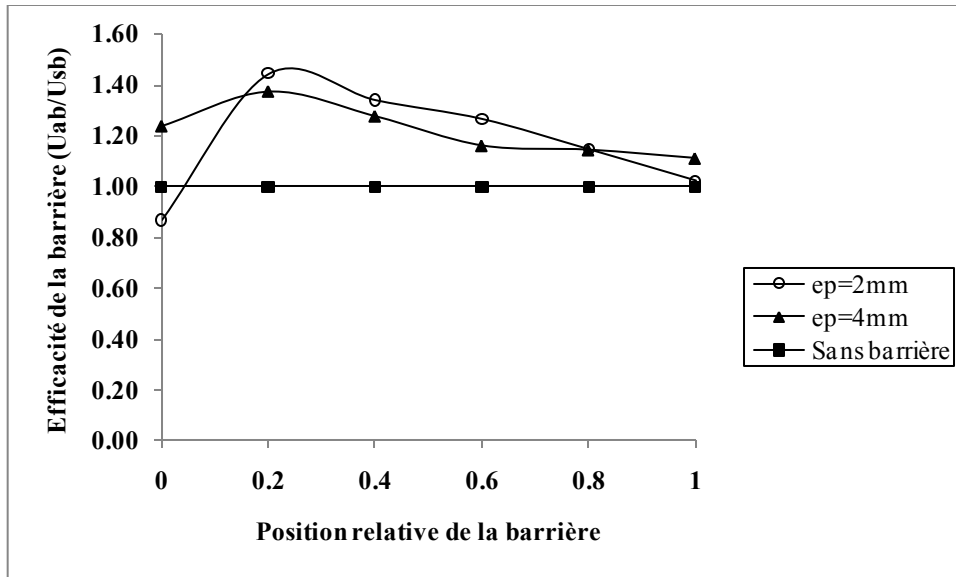


Figure III.23: Efficacité de la barrière en presspahn en fonction de la position relative pour différentes épaisseurs $d=10\text{cm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

III.3.3.3 Influence de la nature de la barrière

Vu que la nature du matériau constituant la barrière joue un rôle primordial dans la génération de la charge, nous avons considéré deux matériaux différents le presspahn ($\epsilon_r=3$) et la bakélite ($\epsilon_r=5$). Il apparaît d'après les résultats obtenus (figures (III.24 à III.26) que la tension de claquage est plus importante dans le cas de la bakélite que dans celui du presspahn. Nous pouvons dire que l'interaction des deux milieux solide et liquide engendre des phénomènes liés à leur nature. Contrairement à la bakélite qui présente une surface lisse, le presspahn se caractérise par sa grande porosité. Cette dernière conduit à l'absorption d'une quantité appréciable d'huile et facilite le déplacement des ions de l'huile à travers le presspahn, qui altère complètement la conduction et modifie de façon défavorable les propriétés de claquage. Nous pouvons déduire que la permittivité, influence la distribution des porteurs de la charge sur la surface de la barrière et puis sur la tension de claquage. Le champ électrique correspondant au claquage varie avec la permittivité, résultats en accord avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [78].

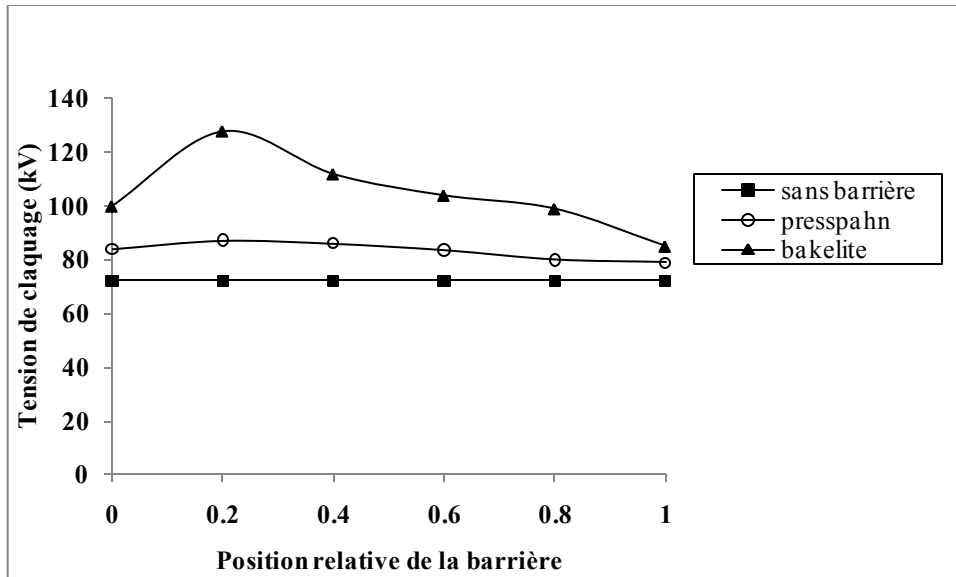


Figure III.24: Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, $e=2\text{mm}$, $d=4\text{cm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

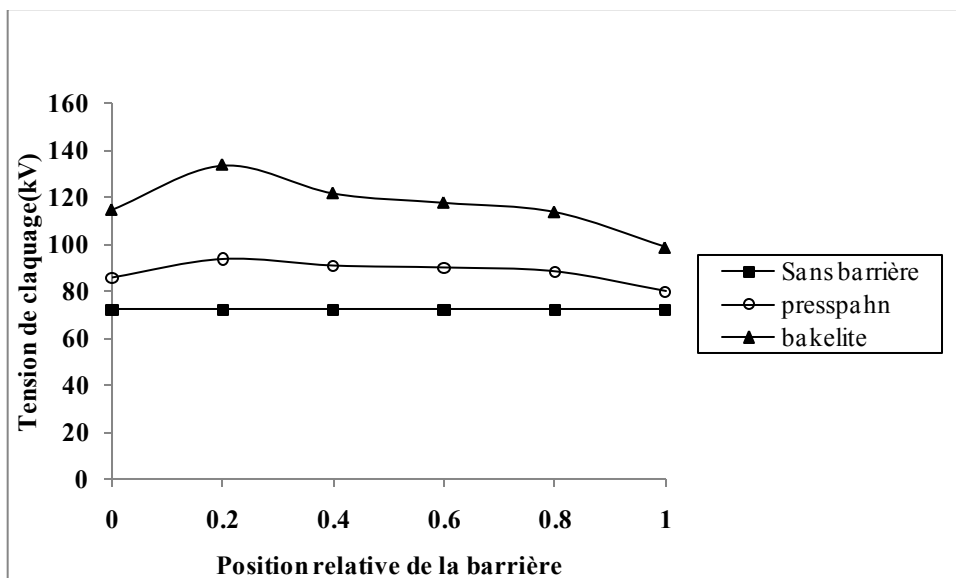


Figure III.25: Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, $e=4\text{mm}$, $d=4\text{cm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

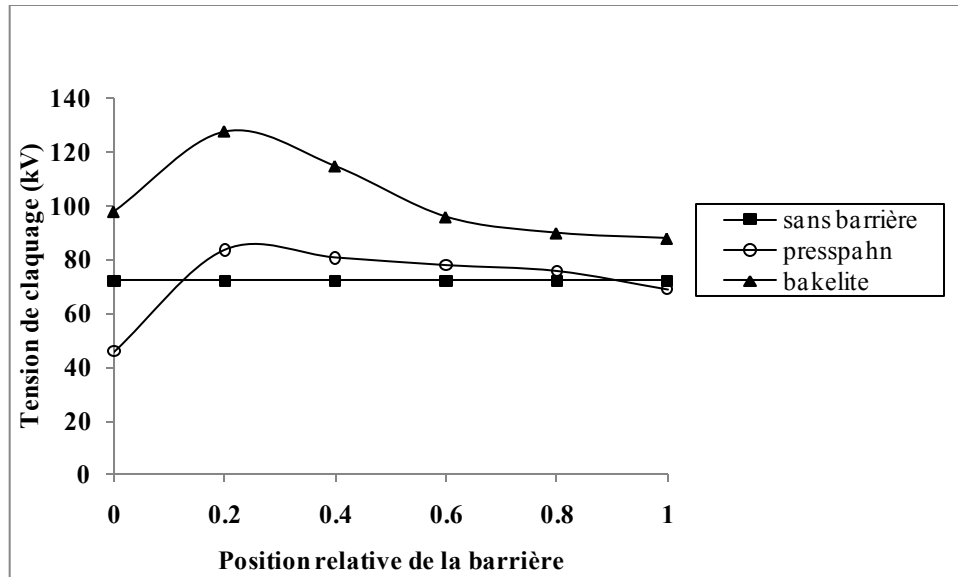


Figure III.26 : Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, $e=2\text{mm}$, $d=4\text{cm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

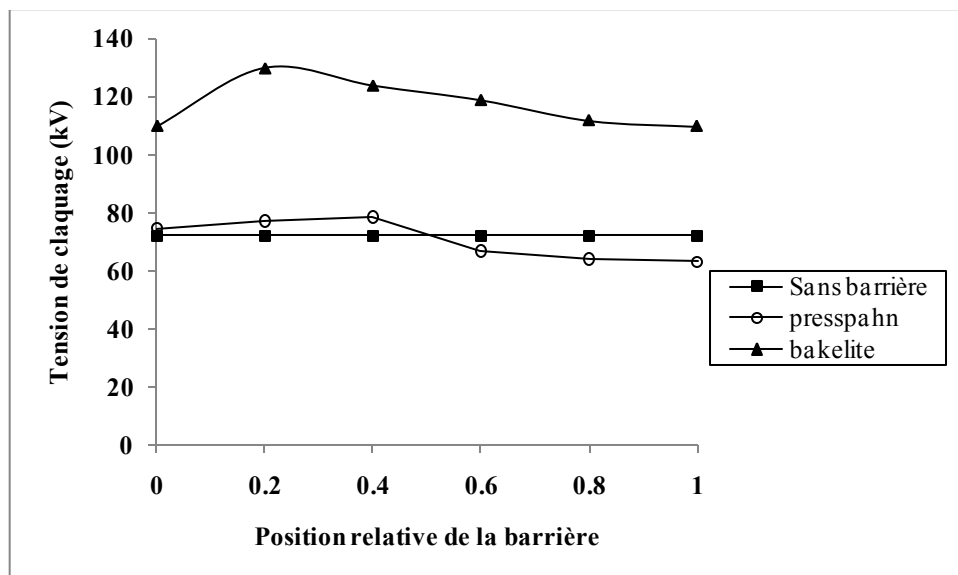


Figure III.27 : Variation de la tension de claquage en fonction de la nature de la barrière en fonction pour différentes position de la barrière, $e=4\text{mm}$, $d=4\text{cm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

III.4 Influence de la barrière sur la trajectoire de la décharge

Dans un système pointe-plan, en présence d'une décharge électrique, la décharge électrique peut se propager de deux manières différentes [66, 78, 79] elle peut se développer de manière directe de la pointe vers le bord de la barrière et du bord de la barrière vers l'électrode plane (Figure III.28). Comme elle peut s'effectuer par étapes dont la première est constituée par la décharge se propageant de la pointe vers le centre de la barrière, la seconde par l'apparition de décharges glissantes contournant la surface en face de la pointe, et la troisième par le claquage de l'intervalle d'huile entre le bord de la barrière et l'électrode plane entraînant la rupture totale.

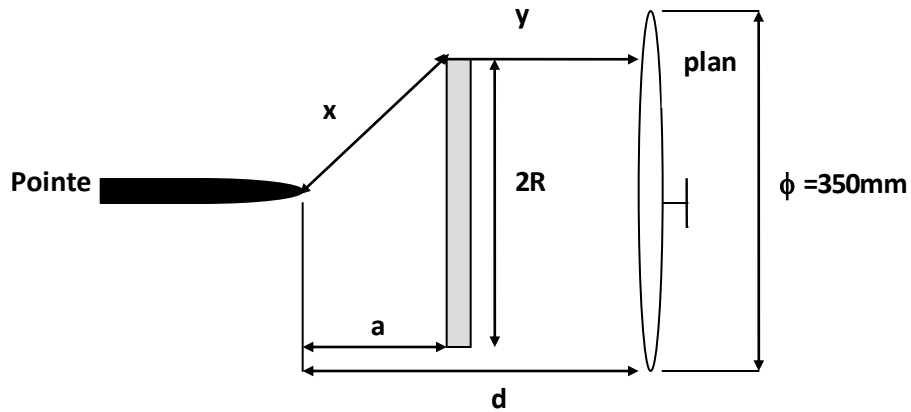


Figure III.28 : Arrangement des électrodes et la barrière

Pour interpréter les observations expérimentales, nous établissons une équivalence entre les deux configurations, pointe-barrière-plan et pointe-plan (Figure III.29) dans le cas de la décharge directe. Cette équivalence consiste à déterminer la longueur géométrique de la décharge disruptive « d'_{gm} » (Figure III.29) et la comparer avec la longueur obtenue graphiquement « d'_{gr} » des figures (III.30 et III.31).

D'après la figure (III.28), d'_{gm} est donnée par la relation suivante :

$$d'_{gm} = x + y = \sqrt{a^2 + R^2} + y.$$

Où a : distance entre la pointe et la barrière ; R : le rayon de la barrière;

y : distance entre la barrière et l'électrode plane

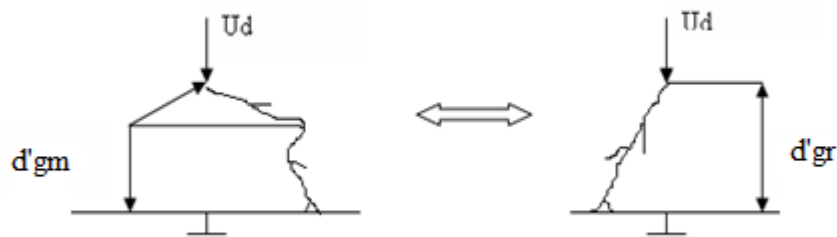


Figure III.29 : Equivalence géométrique entre les distances inter-électrodes avec et sans barrière.

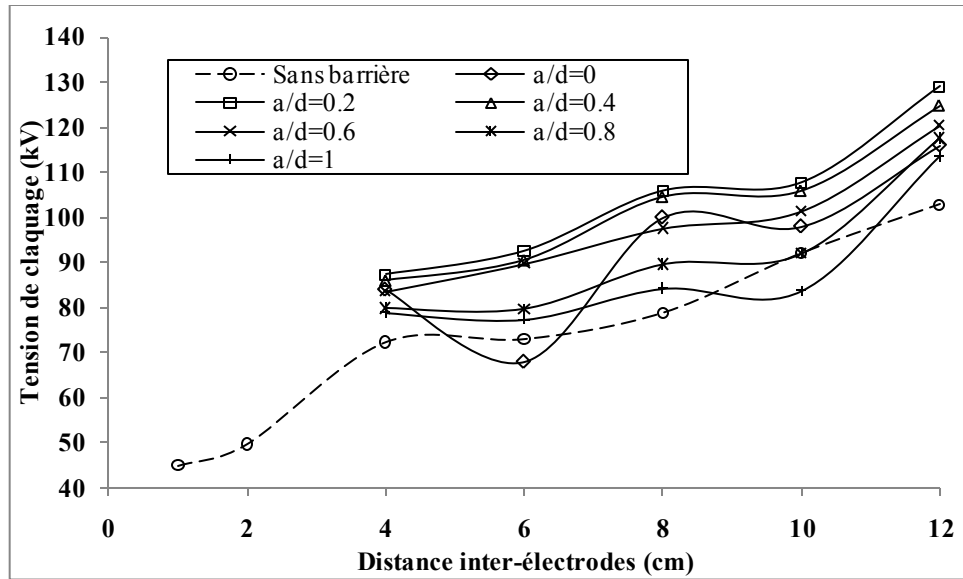


Figure III.30: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes positions de la barrière en presspahn, $ep=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

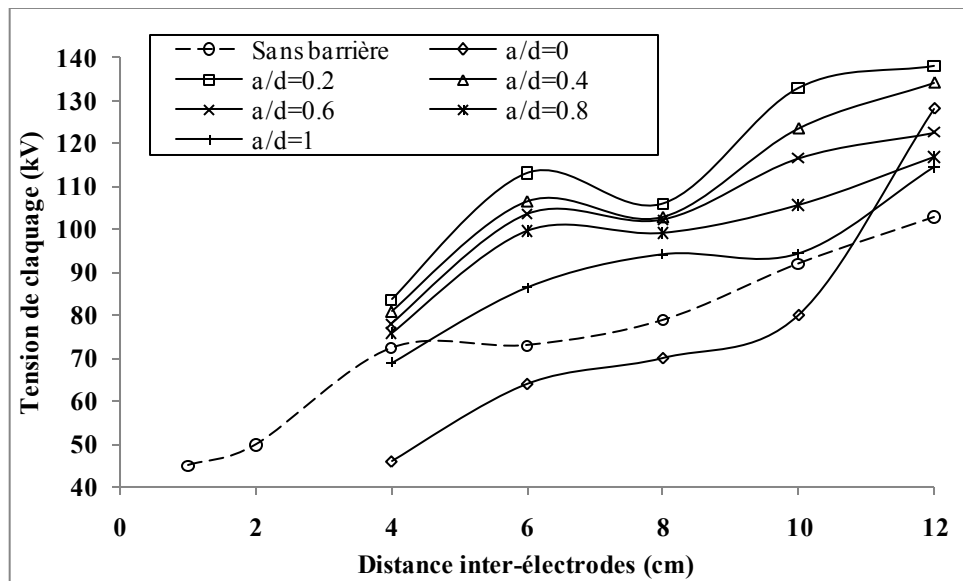


Figure III.31 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes positions de la barrière en presspahn, $ep=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

Pour la détermination de « $d'gr$ » correspondant à la longueur de l'intervalle pointe-plan sans barrière, nous avons procédé de la manière suivante. Pour chaque distance inter-électrodes « d » du système avec barrière, et une position de la barrière « a/d » connue, (point « m » sur la figure III.32) correspond une tension de claquage U_m à partir de laquelle nous cherchons la distance « $d'gr$ » qui lui correspond sur la caractéristique de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes du système pointe- plan sans barrière. Cette dernière distance correspond à la distance $d'gr$ (figure III.32).

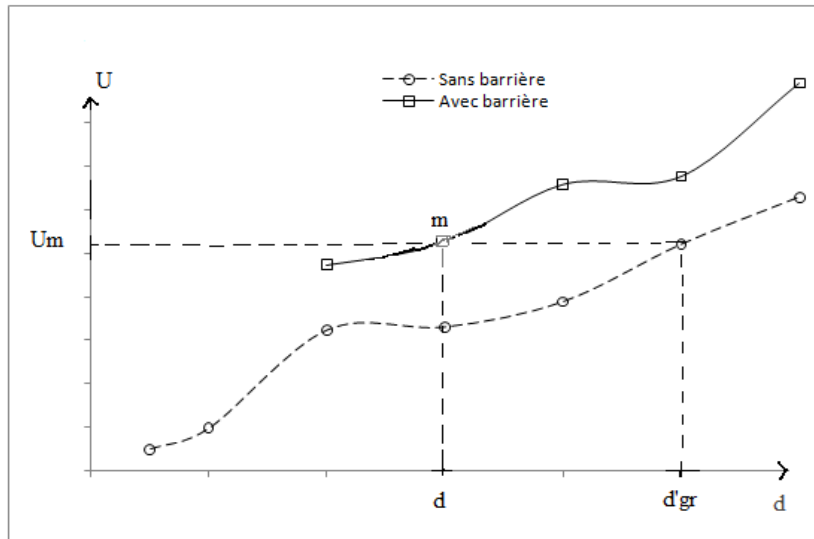


Figure III.32 : Détermination des distances d'gr

En effet, si les distances « d'gr » et « d'gm » sont égales, nous pouvons conclure dans ce cas, que l'augmentation de la rigidité diélectrique du système en présence d'une barrière est due à l'allongement de la longueur minimale de la décharge.

Les tableaux (III.1 et III. 2) montrent la différence la différence entre « d'gr » et « d'gm » pour deux barrières en presspahn de 10cm et 20cm de diamètre. Dans ces tableaux le facteur K est donné par la relation suivante :

$$k = \left| \frac{d'gr - d'gm}{d'gm} \right| \times 100$$

d(cm)	4			6			8			10			12		
a/d	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)
0	9	9	0,00	6	11	45,45	11,5	13	11,54	11	15	26,67	16	17	5,88
0,2	9,4	8,3	13,80	10	9,9	0,60	12,5	12	7,30	13	13,4	2,91	17	15,2	8,91
0,4	9	7,8	16,13	10	9,2	9,29	12,5	11	16,39	13	12,4	2,42	15	14,1	6,16
0,6	8,9	7,2	24,48	9,6	8,6	12,15	11	10	8,59	12	11,8	0,76	15	13,6	9,06
0,8	8	6,7	18,69	8,2	8,1	0,86	9,7	9,7	0,21	10	11,4	12,51	15	13,2	13,46
1	8,2	6,4	28,13	7,8	7,8	0,13	9	9,4	4,56	11	11,2	3,40	14	13	7,69

Tableau III.1 : Comparaison entre les distances d'gm et d'gr pour une barrière en presspahn de diamètre D=10cm

d(cm)	4			6			8			10			12		
a/d	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)	d'gr	d'gm	K(%)
0	4	14	71,43	3	16	81,25	3,7	18	79,4	8	20	60	16	21,8	26,61
0,2	9	13	31,97	14	15	9,21	12,4	17	24,98	16	18,2	12,09	17	19,7	13,62
0,4	8,2	13	34,56	13	14	9,94	12	15	21,57	16	16,8	7,57	17	18,1	6,03
0,6	8	12	32,66	12	13	7,90	12	14	16,03	15	15,7	7,41	16	16,9	8,39
0,8	7,4	11	34,51	12	12	6,43	11,3	13	16,11	13	14,8	15,60	15	16,1	6,60
1	4	10,77	62,86	9,1	12	21,96	10,4	13	18,81	11	14,1	25,74	14	15,4	9,21

Tableau III. 2 : Comparaison entre les distances d'gm et d'gr pour une barrière en presspahn de diamètre D=20cm

Concernant la trajectoire de la décharge, il y'a une équivalence géométrique entre la longueur de l'intervalle pointe-barrière-plan « d'gr » et la longueur équivalente de l'intervalle pointe-plan sans barrière « d'gm ».

Dans le tableau (tableau III. 1), pour une largeur de la barrière $D=10\text{cm}$, nous remarquons une bonne corrélation entre les valeurs de « d'gr » et « d'gm » pour toute les positions de la barrière. Dans ce cas, la décharge se développe de la pointe vers le bord de la barrière, et du bord vers le plan [11,76]. Pour les positions de la barrière comprise entre $a/d=0.2$ et $a/d=0.6$, « d'gr » reste supérieure à d'gm.

Nous constatons aussi que de fortes déviations peuvent avoir lieu entre « d'gr » et « d'gm », plus particulièrement pour la position $a/d=0$, ceci est du surtout à l'importance de la charge déposée sur la surface de la barrière face à l'électrode pointe favorisant l'apparition des décharges glissantes et par conséquent influe sur la tension de claquage (tableau III.2).

La différence entre d'gr et d'gm peut avoir lieu aussi quand la barrière est tout près du plan, la décharge ne suit plus le chemin entre la pointe - le bord de la barrière et le plan mais se prolonge plutôt verticalement et contourne la barrière sous forme de décharge glissante. La différence entre d'gr et d'gm peut atteindre dans ce cas 60% pour $a/d=1$ et 80% pour $a/d=0$ (tableau III.2)

De plus, l'équivalence géométrique entre les deux configurations n'est pas valable pour les grandes largeurs de la barrière ($D=20\text{cm}$, $d=4\text{cm}$). Ainsi, nous constatons que « d'gr » est inférieur à « d'gm » pour toutes les positions de la barrière.

III.5 Discussion

Le but principal de cette étude, est l'influence des paramètres géométriques et physiques de la barrière isolante sur la tension de claquage dans un système pointe plan sous tension alternative. L'insertion de la barrière isolante augmente significativement la rigidité diélectrique des grands intervalles d'huile, conséquence de l'augmentation de la longueur minimale de la décharge disruptive.

En éloignant progressivement la barrière de la pointe, quand celle-ci touche le plan (position $a/d=1$), son influence devient négligeable et la tension de claquage correspond approximativement à celle obtenue dans le système pointe-plan sans barrière. Ce résultat est similaire à celui obtenu par d'autres chercheurs sous tension continue et en chocs de foudre [7]. En effet, des travaux d'investigations d'autres auteurs, sous tension continue et impulsionnelle, ont montré que l'augmentation de la tension de claquage dans le système pointe-barrière-plan est due à l'uniformisation du champ électrique entre la barrière et l'électrode plane. En comparant nos résultats à ceux rapportés dans la littérature, l'efficacité des barrières isolantes sous tension alternative est plus faible que celle obtenue sous chocs de foudre [77]. Par ailleurs, la tension de claquage augmente en fonction du diamètre de la barrière. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres auteurs [25,79]. Ceci est dû à l'allongement de la décharge disruptive.

Concernant la trajectoire emprunté par la décharge, nous avons établi une équivalence géométrique entre la longueur d'intervalle pointe-barrière-plan « d'gm » et celle équivalente pointe-plan sans barrière dénommée « d'gr ». Généralement « d'gm » est approximativement égal à d'gr déduite graphiquement (tableau III.1 et III.2). Dans ce cas, la décharge se développe de la pointe vers le bord de la barrière, et du bord vers l'électrode plane [11].

Notons que lorsque la barrière est située près de la pointe ($a/d=0$), nous observons dans la plupart des cas, une différence entre « d'gr » et « d'gm ». Ceci est probablement du à l'importance de la charge déposée sur la surface de la barrière face à l'électrode pointe, qui facilite l'apparition des décharges glissantes conduisant ainsi à la diminution de la tension de claquage (tableau III.2).

L'équivalence géométrique entre les deux configurations pointe-barrière-plan et pointe-plan n'est pas assurée quand la dimension de la barrière est trop importante devant la distance inter-

électrodes (diamètre de la barrière $D=20\text{cm}$, distance inter-électrodes $d=4\text{cm}$). Dans ce cas, « $d'gr$ » est inférieur à « $d'gm$ » pour chaque position (tableau III.2).

Selon les résultats expérimentaux, l'efficacité de la barrière U_{ab}/U_{sb} (définie par le rapport de la tension de claquage avec barrière sur celle du système sans barrière) présente une position optimale de la barrière comprise entre $a/d=0.2$ et $a/d=0.4$. Ce rapport décroît quand la barrière est proche de l'électrode plane.

Pour une barrière en presspahn située près des deux électrodes, l'efficacité de la barrière est inférieure à 1. Dans ce cas, la décharge est généralement précédée de décharges préliminaires facilitant l'apparition des décharges glissantes sur la surface de la barrière ensuite le claquage.

La tension de claquage des grands intervalles d'huile dépend de la constante diélectrique et de l'épaisseur de la barrière. En effet, l'augmentation de l'épaisseur engendre l'accroissement de la tension de claquage. Dans notre cas, cette augmentation n'est pas importante pour les épaisseurs considérées. Par ailleurs, la tension de claquage augmente en fonction de la permittivité relative de la barrière isolante. Cet effet peut être expliqué par le fait que la permittivité relative de la barrière est supérieure à celle de l'huile minérale. Le champ électrique est plus important au niveau de l'électrode pointe vu la différence de permittivité relative entre l'huile et la barrière isolante.

III.6 Conclusion

Cette étude expérimentale confirme les résultats obtenus sous tension continue et impulsionnelle. L'insertion de la barrière isolante dans l'intervalle d'huile pointe-plan augmente significativement la rigidité diélectrique du système. La position optimale de la barrière est obtenue entre 20 et 40% de l'intervalle pointe-plan à partir de la pointe.

L'efficacité de la barrière dépend du diamètre de la barrière, son épaisseur et sa constante diélectrique. La tension de claquage augmente avec l'accroissement de la permittivité et de l'épaisseur, par contre cette amélioration n'est pas considérable pour les épaisseurs choisies.

Par ailleurs, l'augmentation du diamètre de la barrière engendre l'accroissement de la tension de claquage, ceci est dû à l'allongement de la longueur de la décharge qui se propage de la pointe vers le bord, et du bord de la barrière vers l'électrode plane. Cependant, la barrière joue aussi le rôle d'obstacle électrostatique à la décharge.

La comparaison des distances équivalentes entre les deux systèmes avec et sans barrière montre que cette équivalence est valable pour les petites dimensions de la barrière par rapport à la distance inter-électrodes.

Chapitre IV

Influence des barrières isolantes sur le courant et la charge de pré claquage

IV.1 Introduction

Dans cette partie, nous abordons les phénomènes électriques qui ont lieu bien avant le claquage. 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 impliqués dans la phase de pré claquage selon la géométrie du système et la nature de la barrière. Ceci a pour objectif de caractériser au mieux la structure stratifiée huile/solide c'est-à-dire le système d'isolation du transformateur. Nous présentons dans ce chapitre les résultats de mesure et d'analyse du courant et de la charge de pré claquage pouvant se manifester dans le système pointe -plan avec et sans barrière, cela pour différents paramètres tels que la tension appliquée, la distance inter-électrodes et les paramètres propres à la barrière. Les caractéristiques du courant et de la charge de pré claquage ont permis d'établir la variation de la capacité, de l'impédance équivalente et de l'énergie mise en jeu dans les cas des systèmes avec et sans barrière.

IV.2 Courant de pré claquage

La détermination des caractéristiques du courant de pré claquage du système avec et sans barrière, a nécessité la mesure et la visualisation du courant pour différents paliers de tensions (\square 50% de la tension de claquage), différentes épaisseurs et distances inter-électrodes. Nous avons opté pour ces niveaux de tension afin d'éviter les décharges disruptives. Toutes les mesures sont effectuées pour un rayon de courbure de la pointe constant $r_p=6\text{mm}$.

Pour l'étude de l'influence de l'insertion de la barrière sur les courants de pré claquage, deux types de matériaux de la barrière seront étudiés et différents paramètres seront pris en considération tels que l'épaisseur de la barrière, sa position et sa dimension.

Lors des essais nous avons observé que l'application d'une tension alternative sinusoïdale conduit à un courant périodique. Ce courant nous a permis de définir l'impédance équivalente vue des électrodes ainsi que la capacité apparente.

IV.2.1 Essai sans barrière

Dans cette partie d'essais, une série de mesures sans barrière est obtenue en faisant varier la tension avec un pas de 5kV, les paliers de tension appliquée suivant les distances inter-électrodes ne permettent pas l'établissement de décharges de pré claquage. Pour chaque niveau de tension et chaque distance inter-électrodes, le signal est enregistré sur l'oscilloscope et les mesures du courant de pré claquage sont notées. La valeur efficace du courant prise est la moyenne arithmétique de six valeurs.

IV.2.1.1 Effet de la tension appliquée sur le courant

Nous représentons à la figure IV.1, la variation de la valeur efficace du courant de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes (4, 6, 8, 10, et 12). Pour la gamme des tensions appliquées, l'amplitude du courant de pré claquage croît en augmentant la tension appliquée.

Comme nous pouvons le remarquer sur cette figure, pour une tension donnée, l'augmentation de la distance inter-électrodes conduit à la diminution des courants de pré claquage. La pente de cette caractéristique courant- tension n'est pas constante, elle diminue pour les tensions supérieures à 5kV quand la distance inter-électrodes augmente très faiblement.

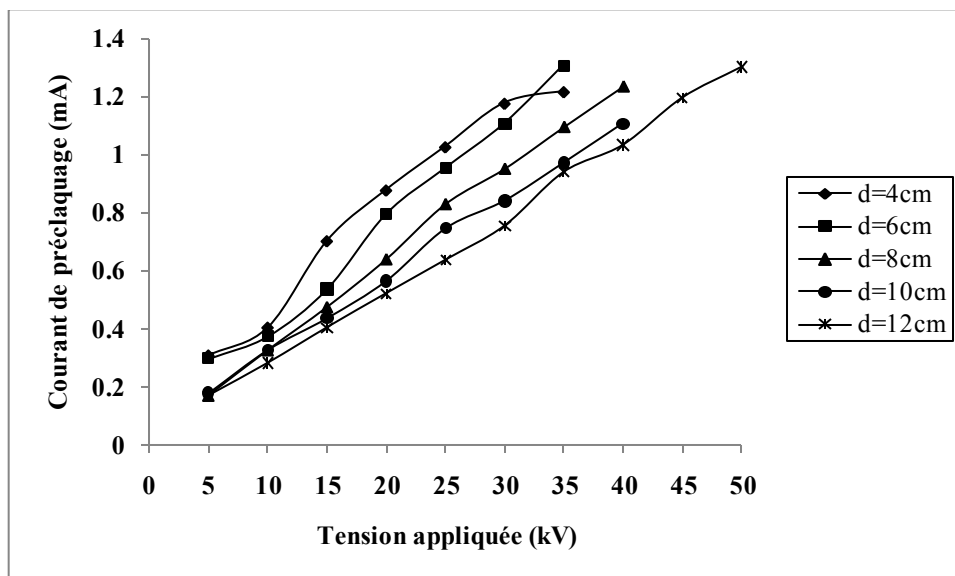


Figure IV.1 : Variation du courant de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter- électrodes, pour un système pointe-plan sans barrière, $r_p=6\text{mm}$.

IV.2.1.2 Effet de la distance inter-électrodes sur les courants

Nous illustrons dans la figure IV.2 la variation du courant efficace en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes tensions appliquées. Le courant mesuré décroît avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. En effet, cette diminution est plus visible pour les tensions élevées, ce qui révèle l'influence du champ électrique sur le courant de pré claquage. En effet, pour un niveau de tension donné, l'accroissement de l'intervalle inter-électrodes engendre une faible diminution du champ électrique appliquée.

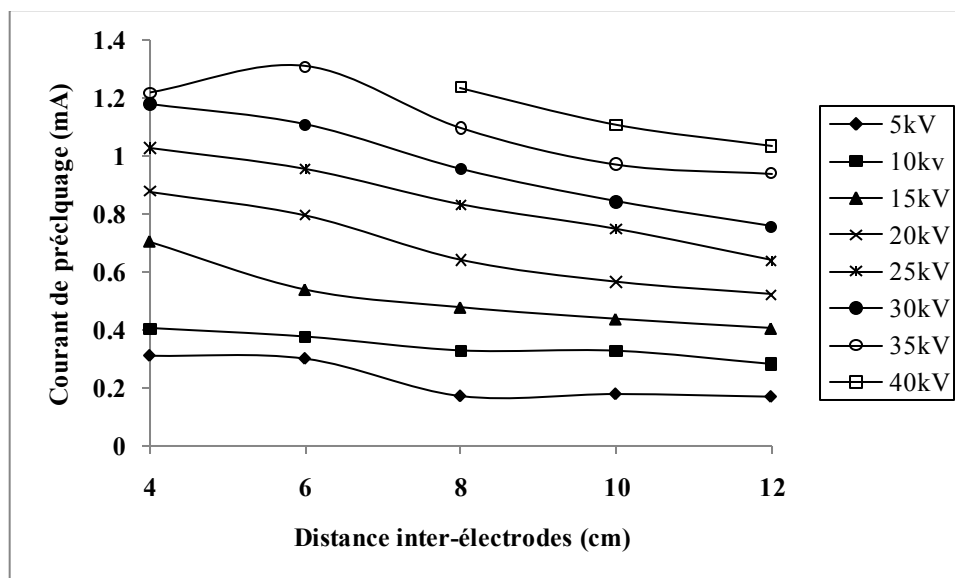


Figure IV.2 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension, pour un système pointe-plan sans barrière, $r_p=6\text{mm}$.

IV.2.2 Essais avec barrière

IV.2.2.1 Effet de l'insertion de la barrière

Pour étudier l'effet de l'insertion de la barrière, nous procédons par une comparaison entre les courants de pré claquage des deux systèmes (avec et sans barrière).

Nous présentons aux figures (IV.3 à IV.6) l'atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la distance inter-électrodes.

Nous définissons l'atténuation du courant comme étant le rapport du courant de pré claquage dans le système avec barrière (I_{ab}) sur le même courant dans le système sans barrière (I_{sb}).

D'après les résultats obtenus, nous constatons que l'insertion de la barrière modifie significativement le courant de pré claquage plus particulièrement pour les petits intervalles inter-électrodes.

En effet, nous remarquons que quelles que soient la nature, les dimensions, la position de la barrière et la tension appliquée, le courant de pré claquage diminue par rapport à celui sans barrière. Ce résultat est similaire à celui trouvé par H. Roser [64] dans les intervalles d'air, il a prouvé que les courants initiaux avant la rupture sont fortement réduits par rapport à ceux du système sans barrière. Ceci est dû, d'une part, au fait que la barrière présente un obstacle géométrique à l'évolution de l'avalanche électronique, et d'autre part, le champ électrique entre le plan et la barrière devient uniforme.

Il apparait que l'influence de l'insertion de la barrière est d'autant plus marquée pour les petits intervalles que pour les grands intervalles (supérieures à 8cm). Par ailleurs, le courant est le résultat d'une distribution complexe de charges entre les électrodes, dont l'émigration de ces charges dans le système pointe-plan est freinée par la présence de la barrière isolante entre les électrodes.

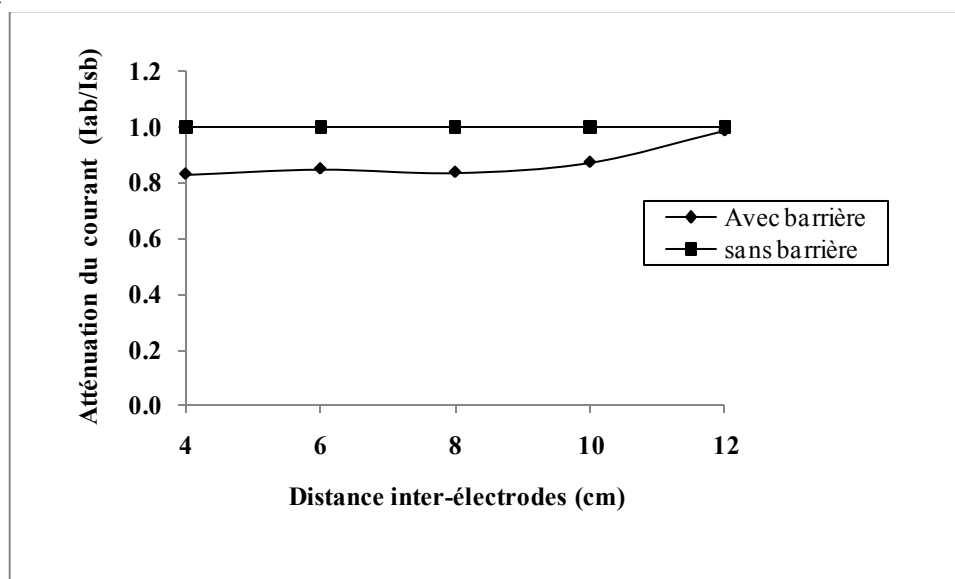


Figure IV.3 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=0.2$, $U=10\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

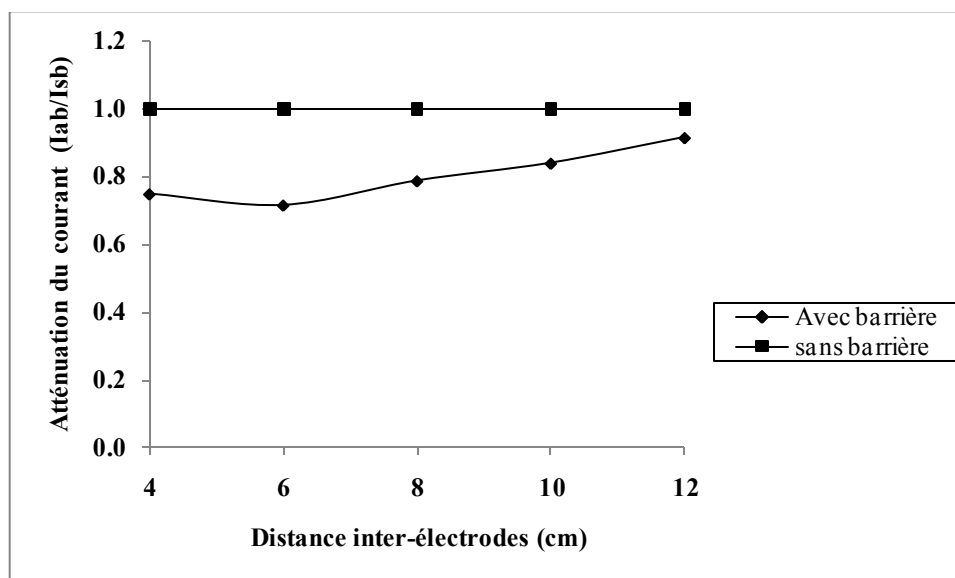


Figure IV.4 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=0.2$, $U=20\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

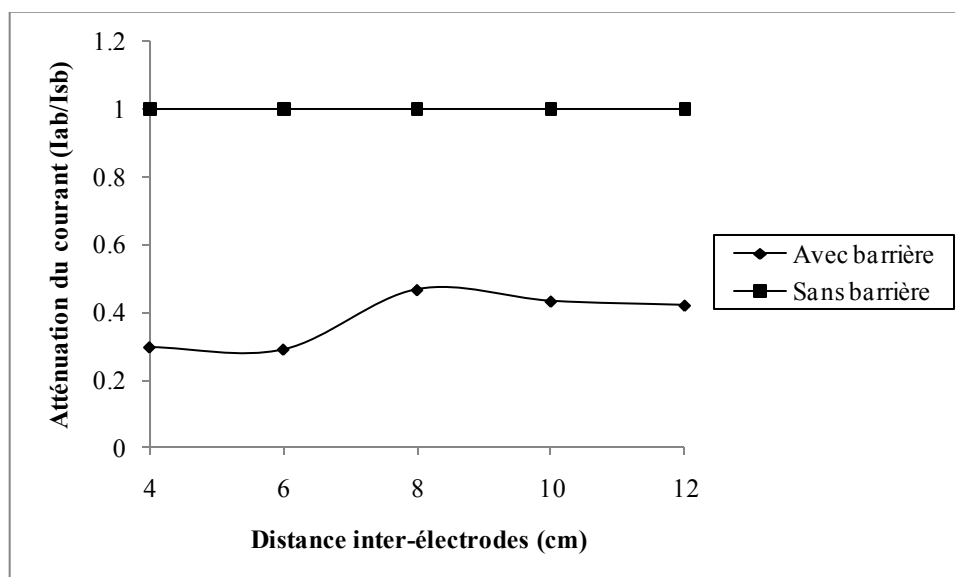


Figure IV.5 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=1$, $U=5\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

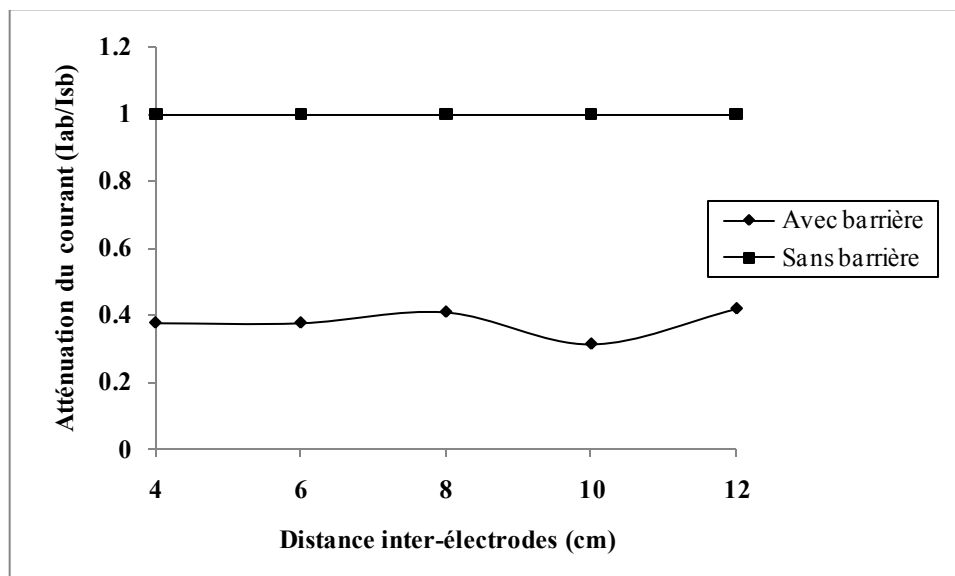


Figure IV.6 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de distance inter-électrodes barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=1$, $U=10\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.4.2 Effet de la position de la barrière

Afin d'examiner l'effet de la position de la barrière sur le courant de pré claquage, nous avons tracé la caractéristique $I=f(a/d)$ pour différents niveaux de tension.

Nous constatons à travers les résultats obtenus (figures IV.7 et IV.8) que l'amplitude du courant augmente en fonction de la tension appliquée pour les deux types de barrière utilisée. En faisant varier la position de la barrière dans l'intervalle inter-électrodes pour un niveau de tension donné, les courbes du courant de pré claquage sont pratiquement confondues et le courant du système avec barrière est toujours inférieur à celui sans barrière. En conséquence, la variation de la position de la barrière n'a pas d'influence sur le courant de pré claquage. Par ailleurs, la barrière joue le rôle d'obstacle à la répartition des charges induites ainsi que les tensions appliquées sont relativement modérées ($U < \square 50\%$ de la tension de claquage).

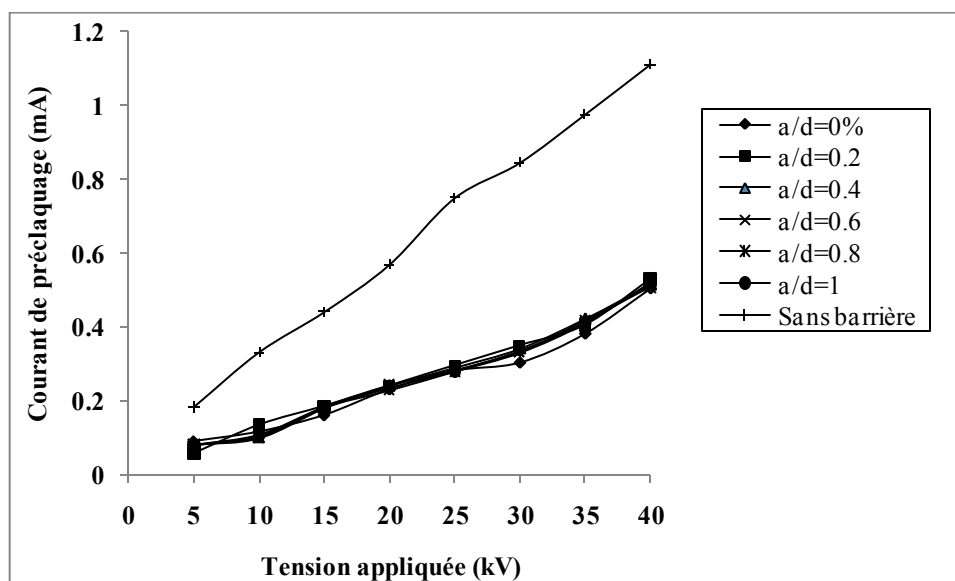


Figure IV.7 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

Pour une distance inter-électrodes fixe, nous observons un accroissement de l'écart entre les courants des deux configurations avec et sans barrière pour les deux types de la barrière. En effet, cette différence est plus élevée dans le cas où la barrière est en presspahn.

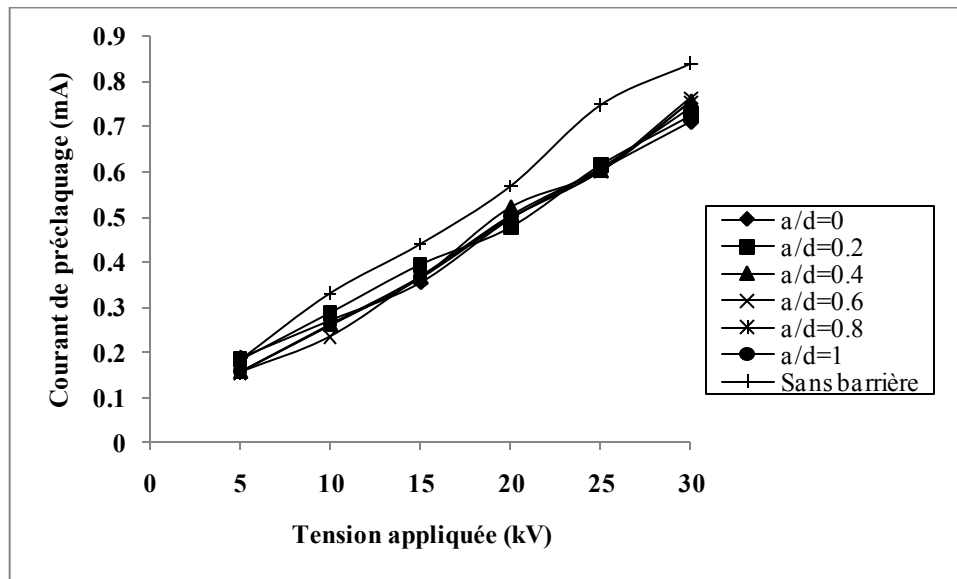


Figure IV.8 : Variation du courant de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

Aux figures (IV.9 et IV.10), la réduction du courant de pré claquage par l'insertion de la barrière est bien visible quelle que soit la position de la barrière. La figure IV.9 montre qu'à la position $a/d=0$, lorsque la barrière est en contact avec l'électrode pointe, le rapport (I_{ab}/I_{sb}) est proche de celui sans barrière. Ce résultat se traduit par l'effet de la charge déposée à la surface de la barrière.

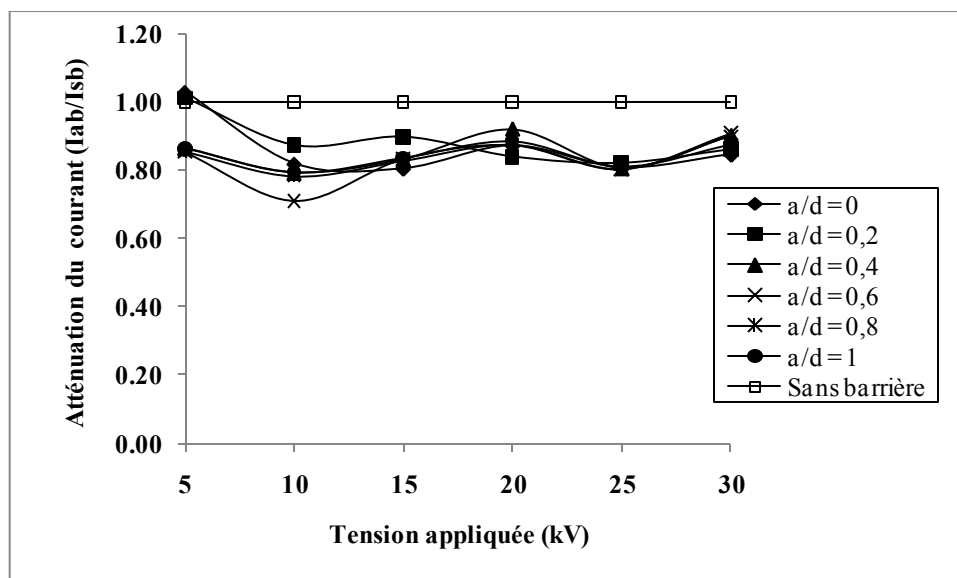


Figure IV.9 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

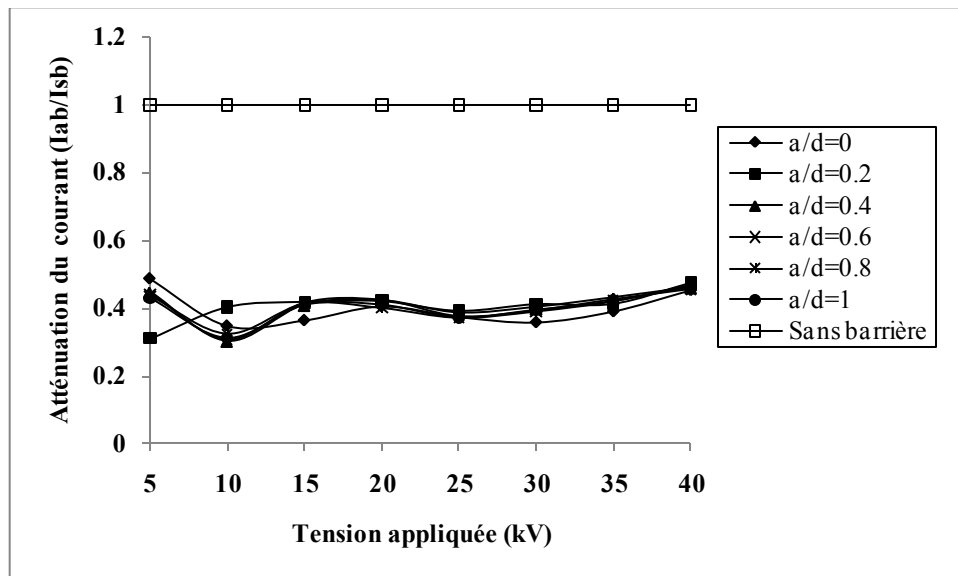


Figure IV.10 : Atténuation du courant en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.2.2.3 Effet de la distance inter-électrodes

Les figures IV.11 et IV.12, montrent le courant de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension appliquée. Pour une tension donnée, le courant de pré claquage est plus élevé pour les petits intervalles et décroît légèrement pour les grands intervalles inter-électrodes en présentant une allure décroissante. Cette diminution est plus remarquable pour les tensions les plus élevées pour les deux types de barrière [71].

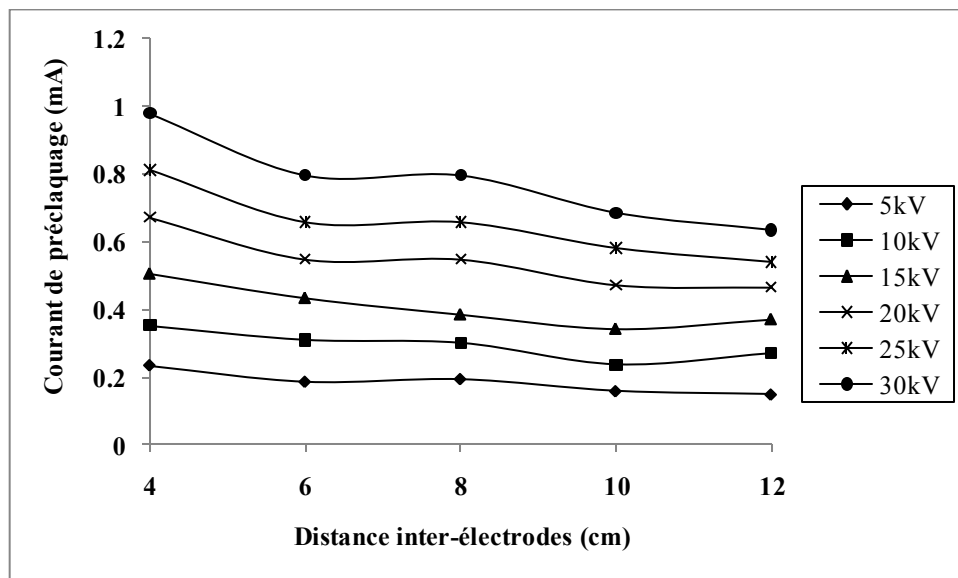


Figure IV.11 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la distance inter-électrodes pour une barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{mm}$.

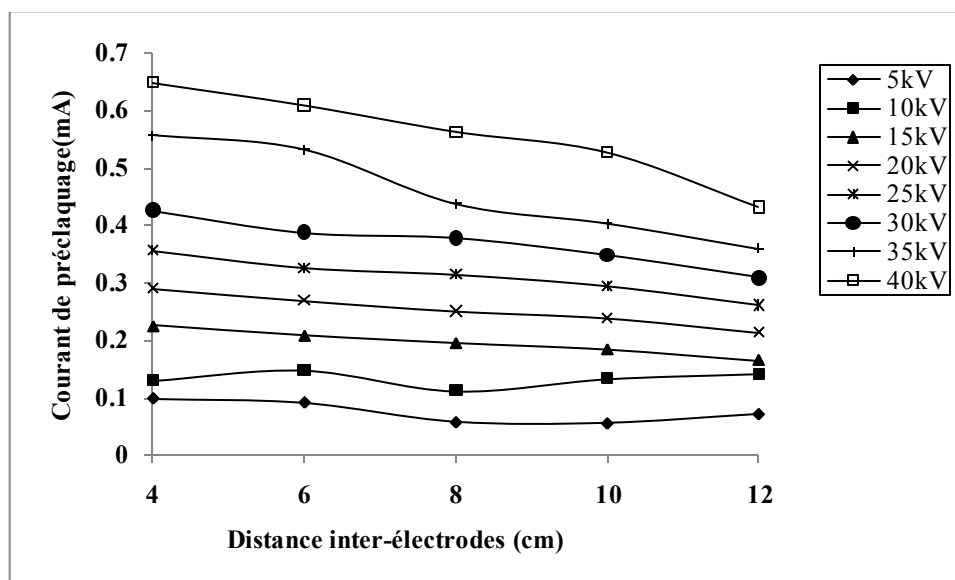


Figure IV.12 : Variation du courant de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour une barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.2.2.4 Effet des dimensions de la barrière

IV.2.2.4.1 Effet du diamètre de la barrière

Afin d'évaluer l'influence de la dimension de la barrière sur le courant de pré claquage, nous avons réalisés les essais en utilisant des barrières ayant différents diamètres (10,14 et 20cm), pour différentes tensions appliquées (figures IV.13 et IV.14).

Selon les résultats présentés, nous remarquons que le courant est plus faible que celui obtenu dans le cas du système sans barrière et que la variation de la largeur de la barrière ne modifie pas la valeur du courant de pré claquage. Ce résultat peut être interprété par le fait qu'à ces niveaux de tension appliquée (inférieures à 50% de la tension de claquage), la variation de la largeur de la barrière a un effet négligeable sur les courants de pré claquage.

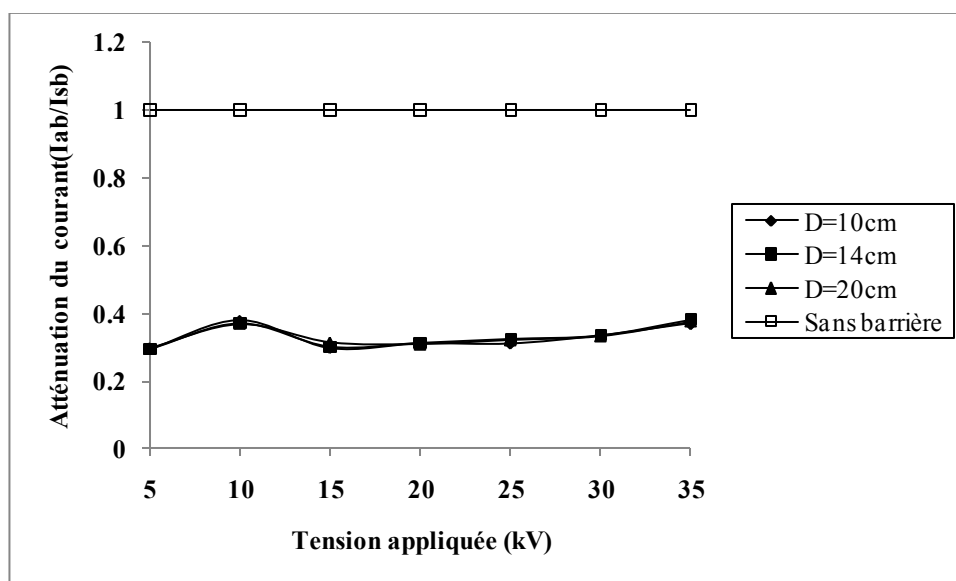


Figure IV.13 : Atténuation du courant en fonction de la tension appliquée pour différents diamètres de la barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=1$, $d=4\text{cm}$.

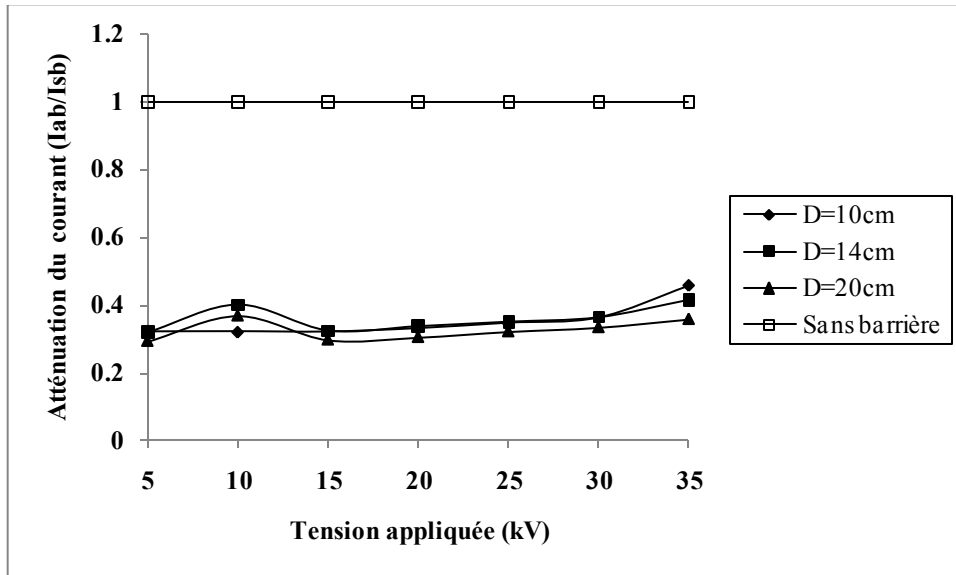


Figure IV.14 : Atténuation du courant en fonction de la tension appliquée pour différents diamètres de la barrière, barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=0.2$, $d=4\text{cm}$.

IV.2.2.4.1 Effet de l'épaisseur et de la nature de la barrière

Nous comparons les courants pour deux isolants solide de même dimension, même permittivité mais d'épaisseurs différentes.

Aux figures (IV.15 à IV.17) nous traçons le rapport des courants (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la distance inter-électrodes pour les deux épaisseurs choisies de la barrière $e=2\text{mm}$ et $e=4\text{mm}$. Nous observons que le courant est plus important pour la barrière d'épaisseur la plus élevée. Donc l'augmentation de l'épaisseur entraîne l'accroissement du courant de pré claquage. Ce résultat prouve le caractère volumique du courant dans le volume d'huile sur la surface de l'isolant solide. Il est à noter que l'épaisseur n'a pas d'effet sur le courant pour la plus faible distance inter-électrodes ($d=4\text{cm}$).

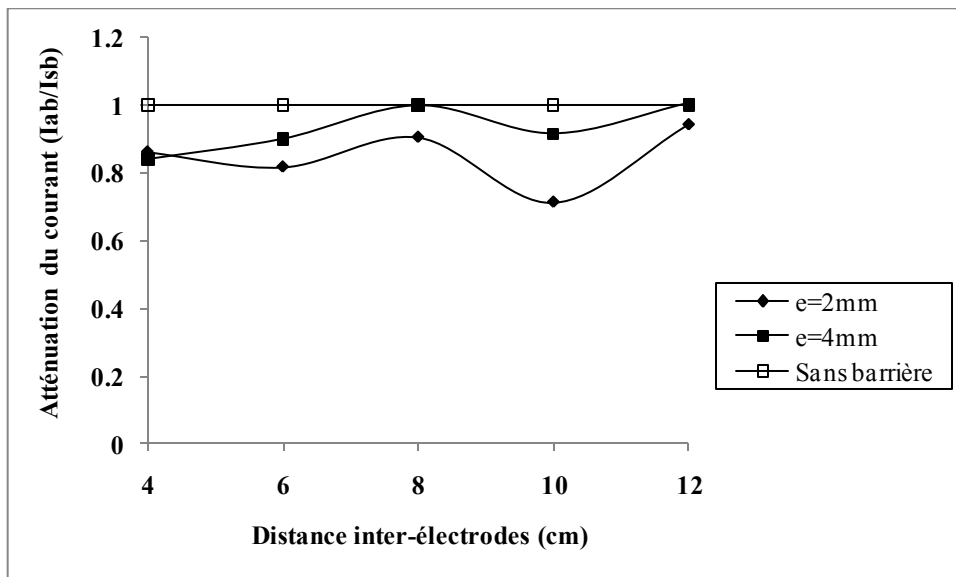


Figure IV.15 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $a/d=0.2$, $D=10\text{cm}$, $U=10\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$

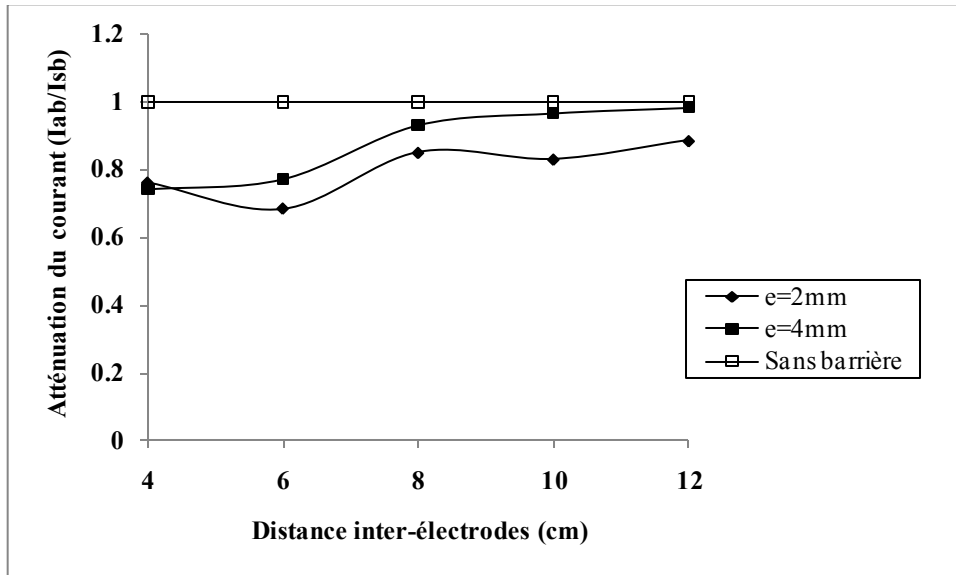


Figure IV.16 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $a/d=0.2$, $D=10\text{cm}$, $U=20\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$

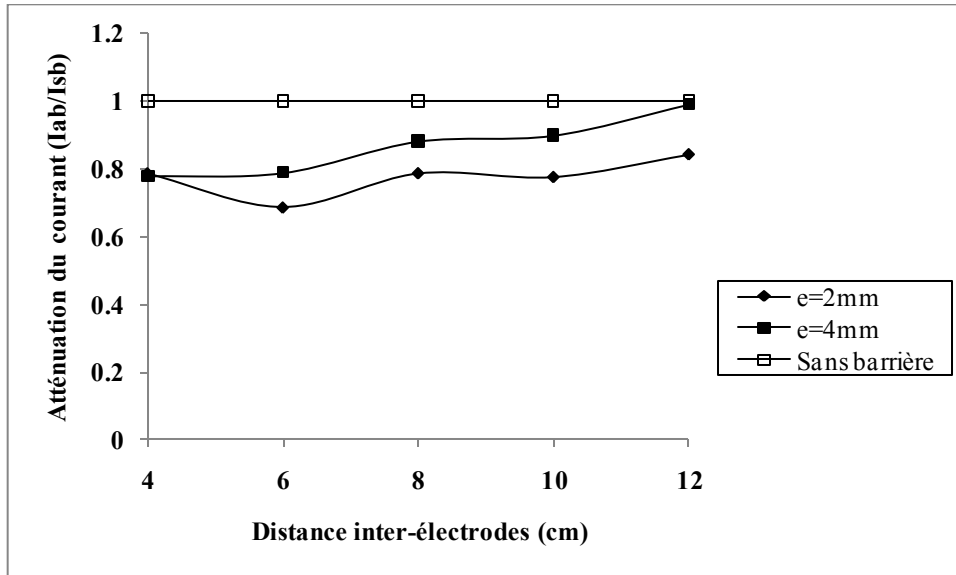


Figure IV.17 : Atténuation du courant (I_{ab}/I_{sb}) en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $a/d=0.2$, $D=10\text{cm}$, $U=25\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

La nature du matériau solide a une influence considérable sur la variation du courant de pré claquage. Pour analyser cet effet, nous procédons par comparaison des caractéristiques $I=f(U)$ pour les deux matériaux choisis ayant une même épaisseur $e=2\text{mm}$. Ceci a permis d'avoir les figures (IV.18 à IV.20).

Nous constatons que le courant de pré claquage dépend fortement de la nature de la barrière isolante, il est plus intense pour le matériau de plus grande permittivité (Bakélite). Cependant, la permittivité a une influence considérable sur la variation du champ électrique à l'intérieur d'une isolation mixte. Le champ dans l'huile à la surface du solide est d'autant plus élevé que la permittivité de ce dernier est élevé. Ce qui explique un courant de pré claquage élevé.

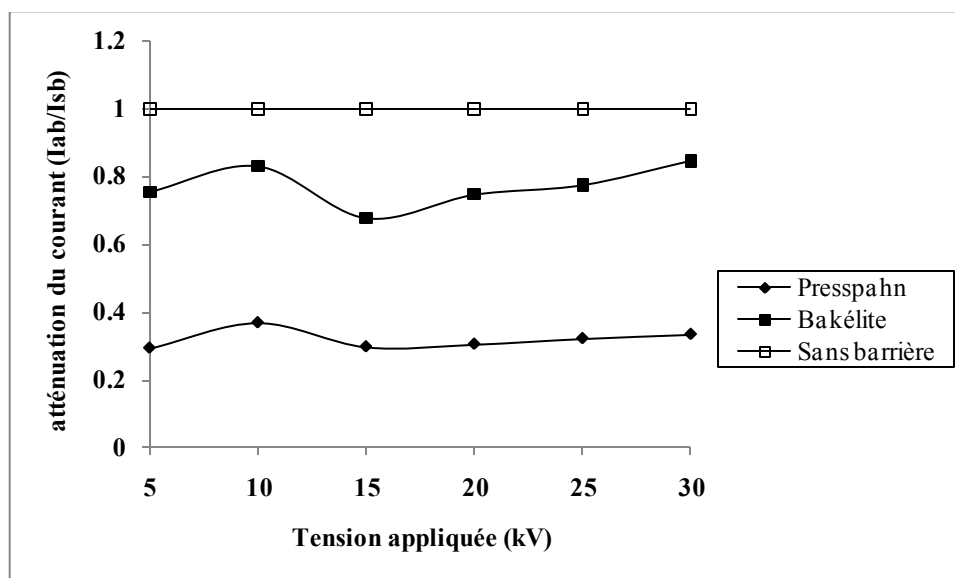


Figure IV.18: Atténuation du courant (lab/Isb) en fonction de la tension appliquée pour différents matériaux de la barrière, $e=2\text{mm}$, $a/d=0.2$, $D=20\text{cm}$, $d=4\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

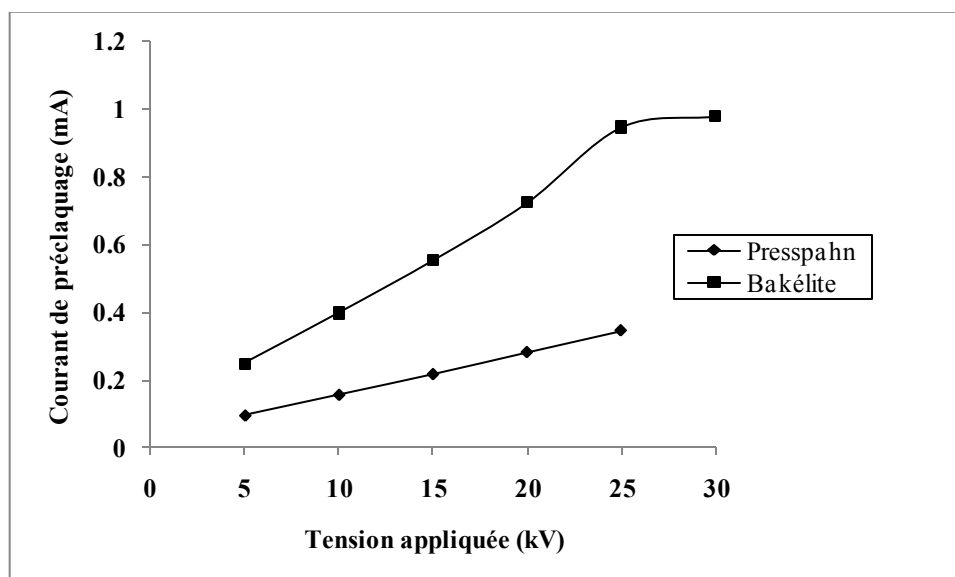


Figure IV.19: Courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différents matériaux de la barrière, $e=2\text{mm}$, $a/d=0$, $D=20\text{cm}$, $d=4\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

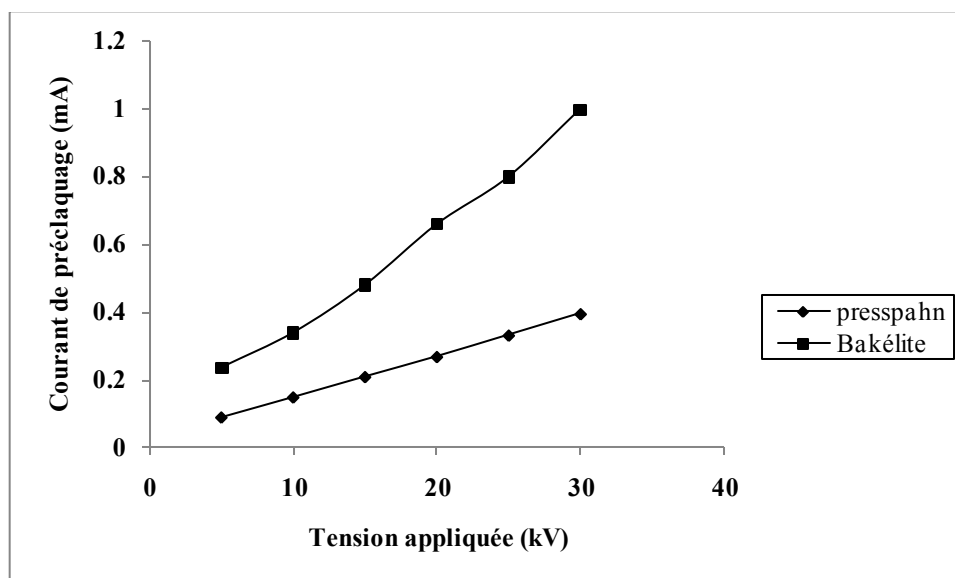


Figure IV.20: Courant de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différents matériaux de la barrière, $e=2\text{ mm}$, $a/d=0.2$, $D=20\text{ cm}$, $d=4\text{ cm}$, $r_p=6\text{ mm}$.

IV.3 Variations de l'impédance apparente

L'impédance apparente du système est un paramètre très important qui nous informe sur le degré de dégradation et des contraintes appliquées sur l'huile de transformateur. Elle peut être déduite des caractéristiques courant-tension pour chaque configuration (système pointe-plan avec et sans barrière). L'intérêt de ce procédé est de prévoir le comportement de l'isolant pour n'importe quel niveau de tension.

IV.3.1 Système pointe-plan

Afin d'étudier l'impédance vue des électrodes de ce système, nous avons tracé les caractéristiques $Z = f(U)$ et $Z = f(d)$.

La mesure du courant de pré claquage associée à la mesure de la tension appliquée nous a permis de tracer les différentes impédances en fonction de la tension appliquée et la distance inter-électrodes. Les courbes déduites sont présentées aux figures (IV.21 et IV.22)

Pour une distance inter-électrodes donnée, nous observons que l'impédance apparente croît d'une manière importante pour les faibles tensions ($U \leq 10\text{ kV}$). En dehors de cet intervalle de tension, l'impédance reste peu sensible à l'accroissement de la tension appliquée et se stabilise pour les niveaux de tension plus élevées. L'augmentation de l'impédance pour les faibles tensions, confirme le changement de l'état de l'huile. Il s'agirait de l'apparition d'une perturbation (bulle gazeuse) à proximité de l'électrode pointe selon certains auteurs [49, 50, 82, 83]. Cette perturbation diminuera la capacité du système [49], d'où l'augmentation de l'impédance. Pour les niveaux de tensions plus élevées (supérieures à 10 kV), la stabilité de l'impédance vue des électrodes s'explique par l'achèvement du phénomène de génération de la perturbation. Par ailleurs, l'influence de la distance inter-électrodes est bien plus notable figure (IV.22).

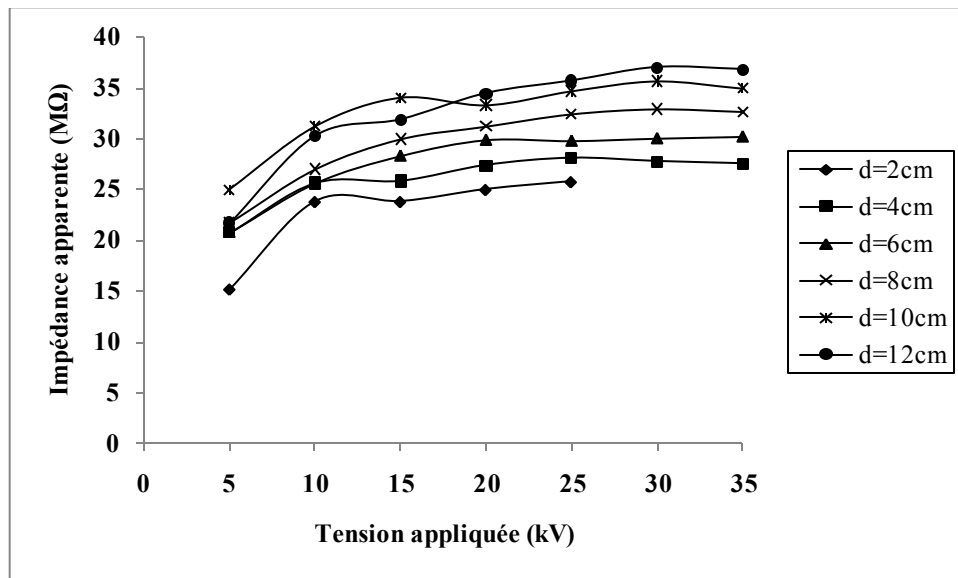


Figure IV.21: Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes, système sans barrière, $r_p=6\text{mm}$.

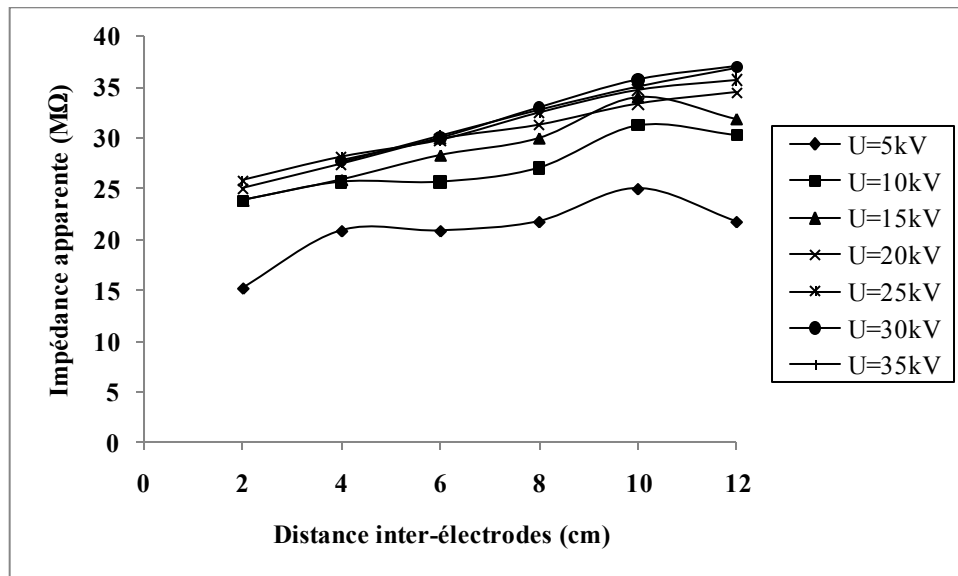


Figure IV.22 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension, système sans barrière, $r_p=6\text{mm}$.

IV.3.2 Système pointe-barrière-plan

Nous procédons dans cette partie à une comparaison entre les impédances équivalentes des deux systèmes (avec et sans barrière).

Les caractéristiques ainsi établies (figures IV.23 et IV.24), montrent que l'insertion de la barrière isolante dans un système pointe-plan, modifie son impédance. Nous observons une augmentation de l'impédance pour les faibles niveaux de tension compris entre 5 et 10 kV, ensuite une stabilisation pour les niveaux de tension supérieurs à 10kV.

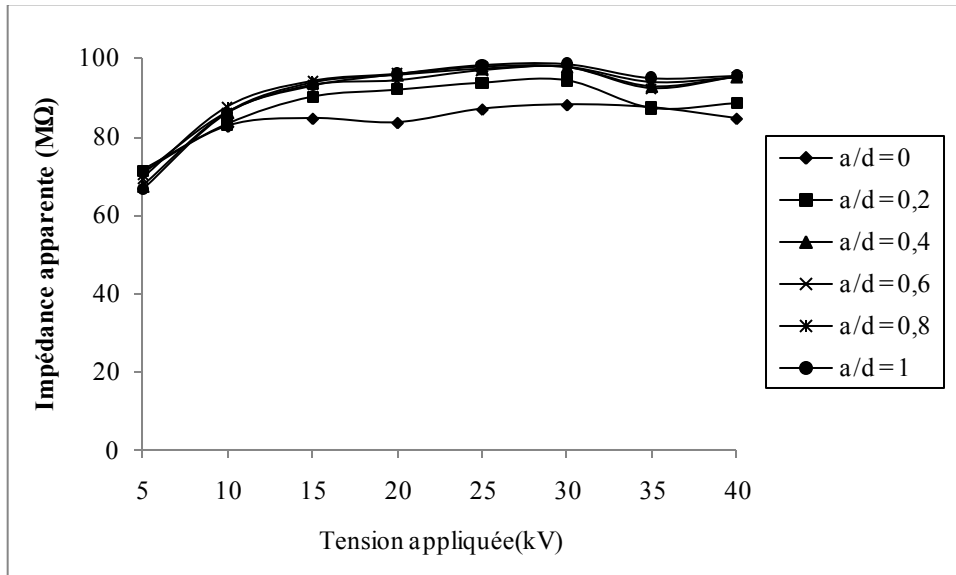


Figure IV.23: Variations de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

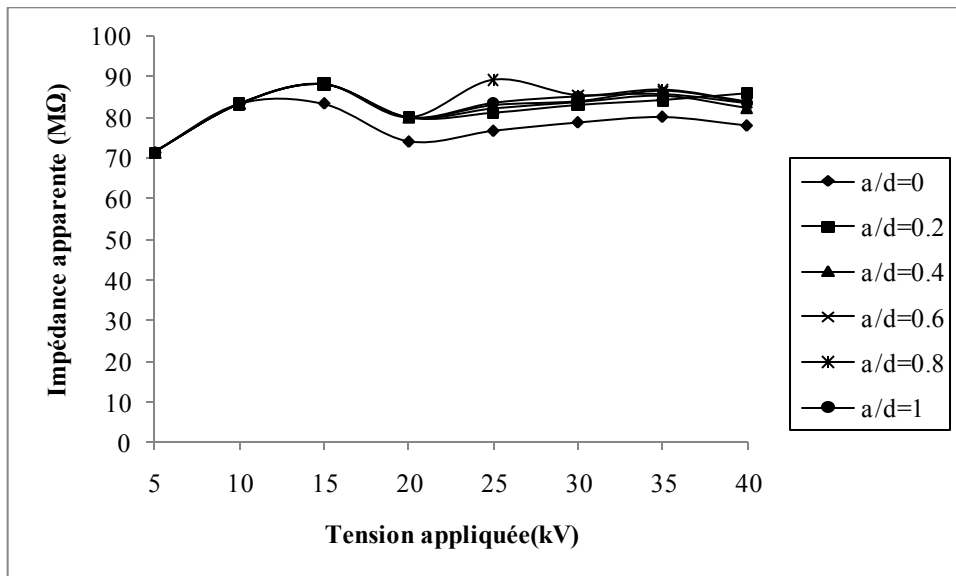


Figure IV.24 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

D'après les résultats obtenus (figures IV.25 et IV.26), nous constatons que l'insertion de la barrière isolante modifie significativement l'impédance du système pointe-plan. En effet, nous remarquons une augmentation considérable de l'impédance aussi bien pour les positions $a/d=0$ et $a/d=0.2$, et tous les niveaux de tensions appliquées.

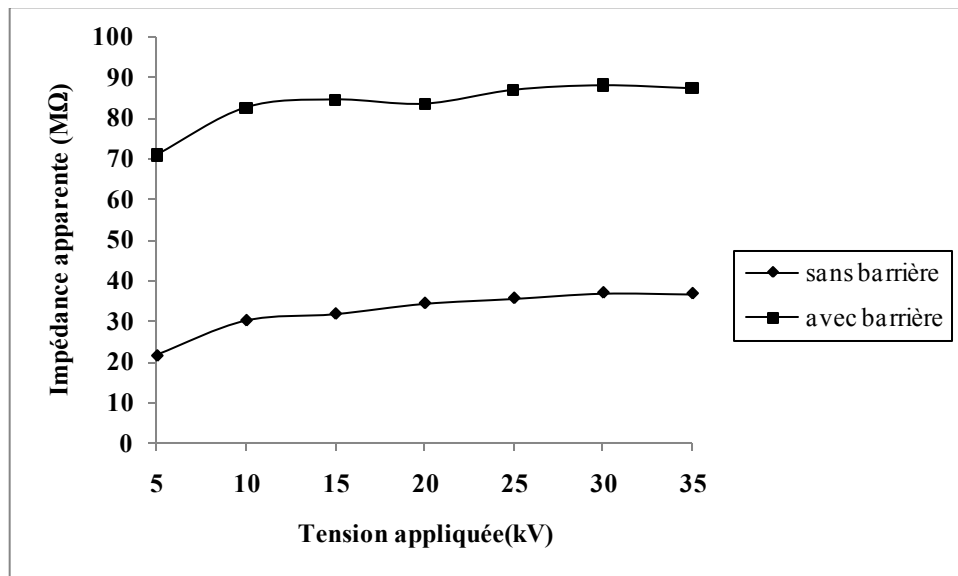


Figure IV.25: Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$.

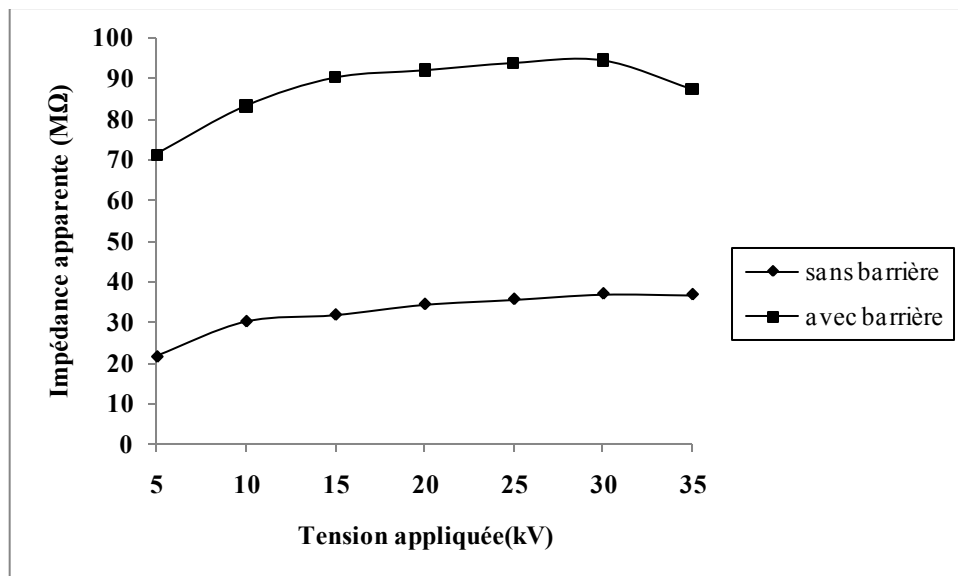


Figure IV.26 : Variations de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée pour une barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{mm}$.

Les figures IV.27 et IV.28 montrent l'évolution de l'impédance en fonction de distance inter-électrodes. L'impédance apparente du système pointe-barrière-plan est plus importante pour les distances inter-électrodes les plus élevées.

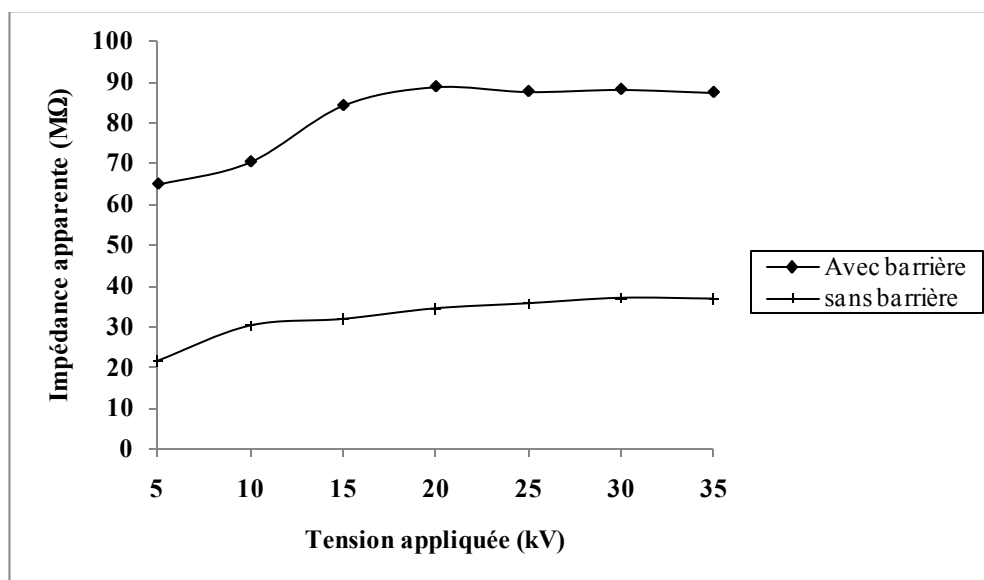


Figure IV.27 : Variation de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$.

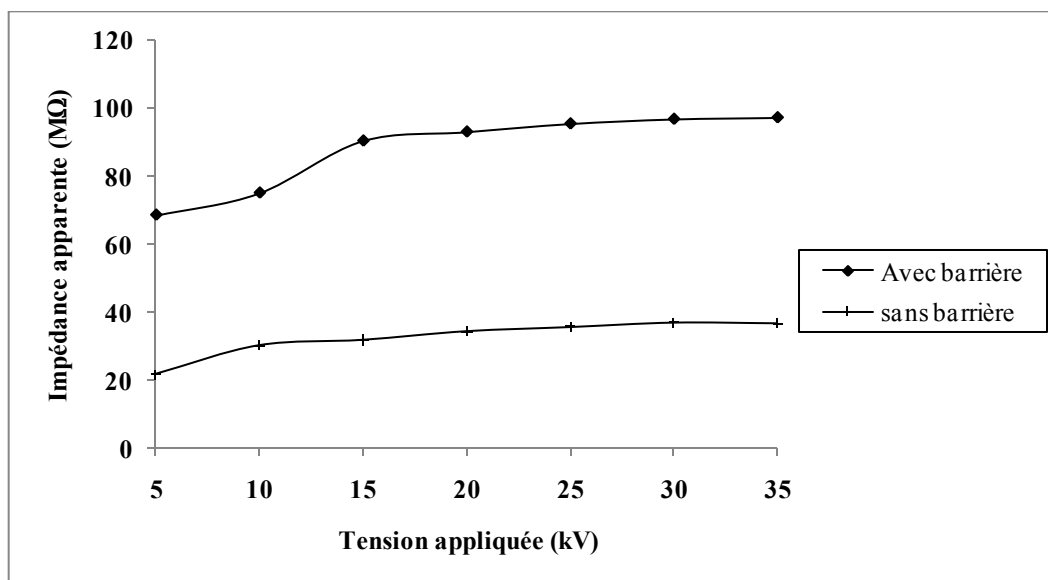


Figure IV.28 : Variation de l'impédance apparente en fonction de la tension appliquée, barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=0.2$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.4 La charge de préclaquage

Dans cette dernière partie, nous présentons nos résultats expérimentaux et les interprétations concernant l'influence de la barrière sur la charge injectée dans l'huile. La connaissance de la charge de pré claquage est d'une importance capitale. Elle nous informe sur le niveau énergétique mis en jeu lors de l'application de la tension, nous permettent ainsi d'identifier les mécanismes mis en jeu.

Dans une première étape, Nous présentons les résultats concernant le système pointe-plan sans barrière isolante, que nous comparons à ceux du même système avec barrière.

Nous abordons par la suite, l'étude de l'influence des différents paramètres de l'écran isolant tels que sa position, sa largeur, son épaisseur et sa nature sur la charge.

IV.4.1 Essais sans barrière

Nous exploitons les résultats obtenus du système sans barrière afin de les comparer à ceux du système avec barrière.

IV.4.1.1 Effet de la tension appliquée sur la charge de pré claquage

Nous présentons à la figure (IV.29) la variation de la valeur efficace de la charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes (4, 6, 8, 10 et 12).

Nous constatons que l'augmentation de la tension appliquée entraîne un accroissement linéaire de la charge de pré claquage. D'après la relation de la charge $Q=C U$ (tel que, Q représente la charge, C est la capacité du système et U représente la tension appliquée), nous pouvons conclure que la capacité du système pour une distance inter-électrodes donnée est pratiquement constante.

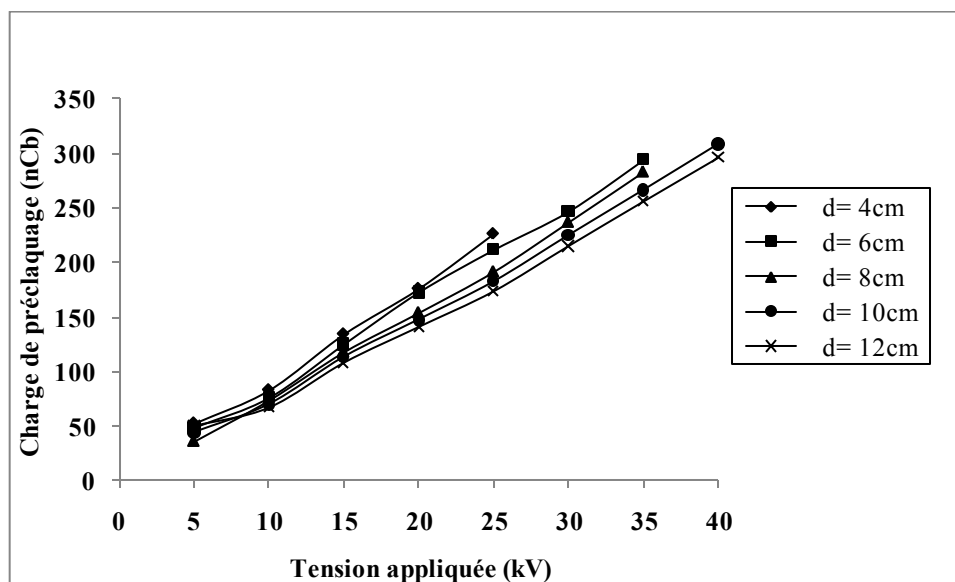


Figure IV.29: charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan sans barrière pour différentes distances inter-électrodes, $r_p=6\text{mm}$.

IV.4.1.2 Effet de la distance inter-électrodes sur la charge de pré claquage

En faisant varier la distance inter-électrodes du système pointe-plan, nous constatons que la charge de pré claquage diminue légèrement avec l'accroissement de la distance inter-électrodes pour les différents niveaux de tension appliquée (Figure IV.30). Cet effet est plus remarquable pour les tensions relativement élevés. Ce phénomène s'interprète par la réduction du champ appliqué à la pointe suite à l'augmentation de l'écart inter-électrodes [81].

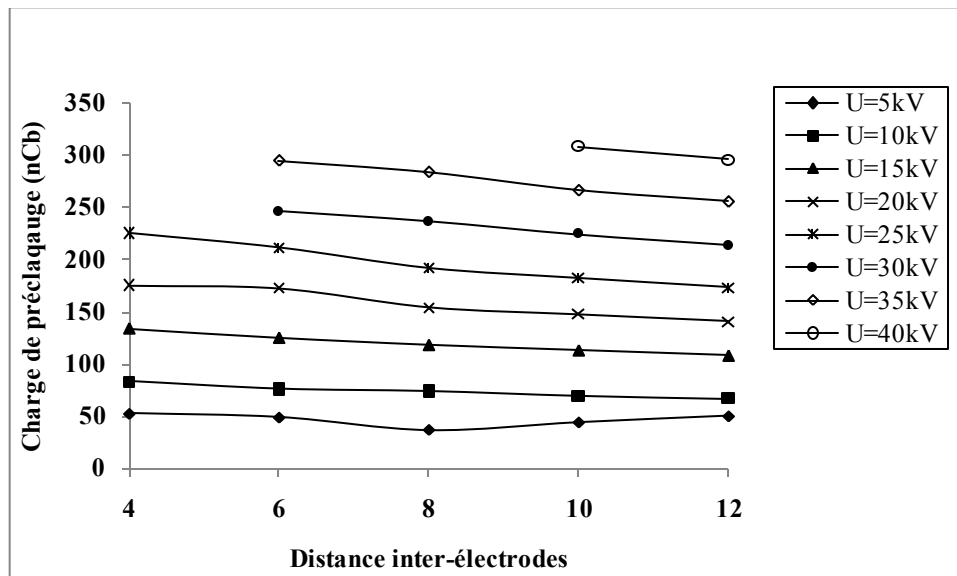


Figure IV.30: charge de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes dans un système pointe-plan sans barrière pour différents niveaux de tension, $r_p=6\text{mm}$.

IV.4.2 Essais avec barrière

Nous examinons dans ce qui suit l'effet de la barrière isolante sur la charge de pré claquage. Les résultats concernent son évolution et celle de l'énergie du système mise en jeu. Différents paramètres ont été pris en considération en l'occurrence la tension appliquée, la distance inter-électrodes ainsi que les différents paramètres propres à la barrière tels que l'épaisseur, la largeur et la nature.

IV.4.2.1 Effet de l'insertion de la barrière

Les principaux résultats qui illustrent l'atténuation de la charge pour différentes positions de la barrière sont reportés aux figures (IV.31 à IV.34).

Nous définissons l'atténuation de la charge de la barrière comme étant le rapport de la charge de pré claquage du système pointe-plan avec barrière (Q_{ab}) sur celle du système pointe-plan sans barrière (Q_{sb}) pour le même niveau de tension appliquée.

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 à l'évolution de l'avalanche électronique, et d'autre part, la présence de la barrière crée une zone entre la barrière et le plan où le champ serait pratiquement uniforme.

Nous constatons aussi que pour la position $a/d=0$, la charge de pré claquage du système avec barrière en presspahn 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.

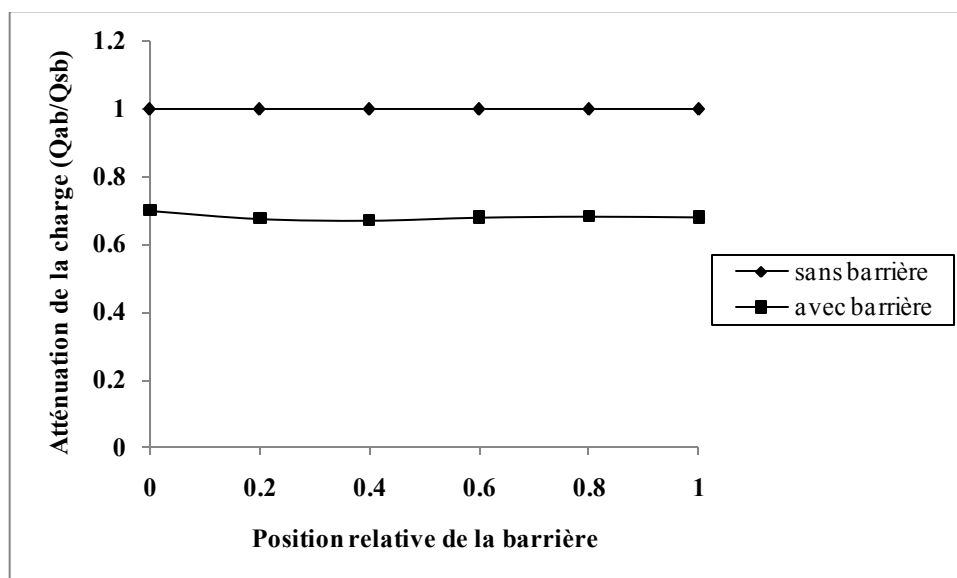


Figure IV.31: Atténuation de la charge de la barrière en bakélite en fonction de sa position : $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

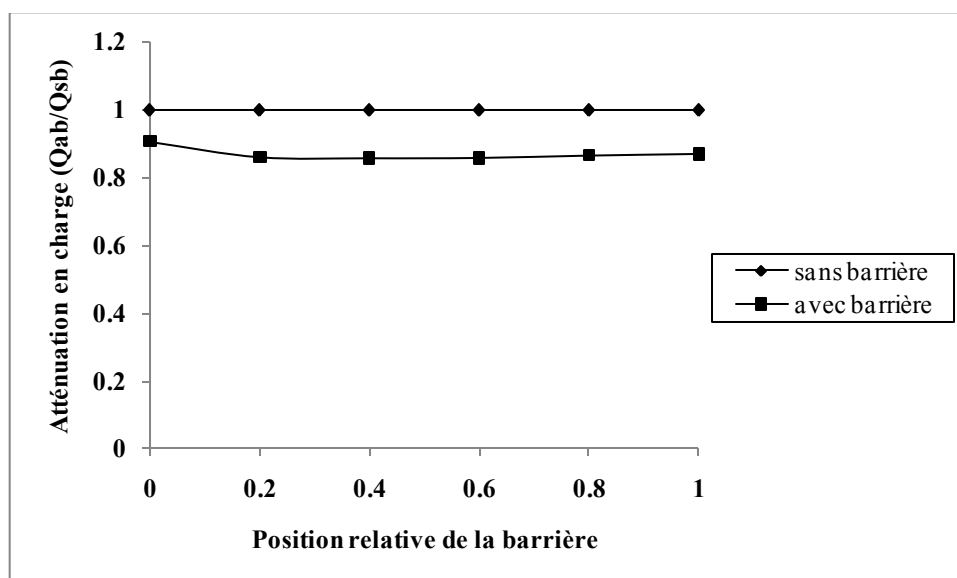


Figure IV.32: Atténuation de la charge de la barrière en bakélite en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

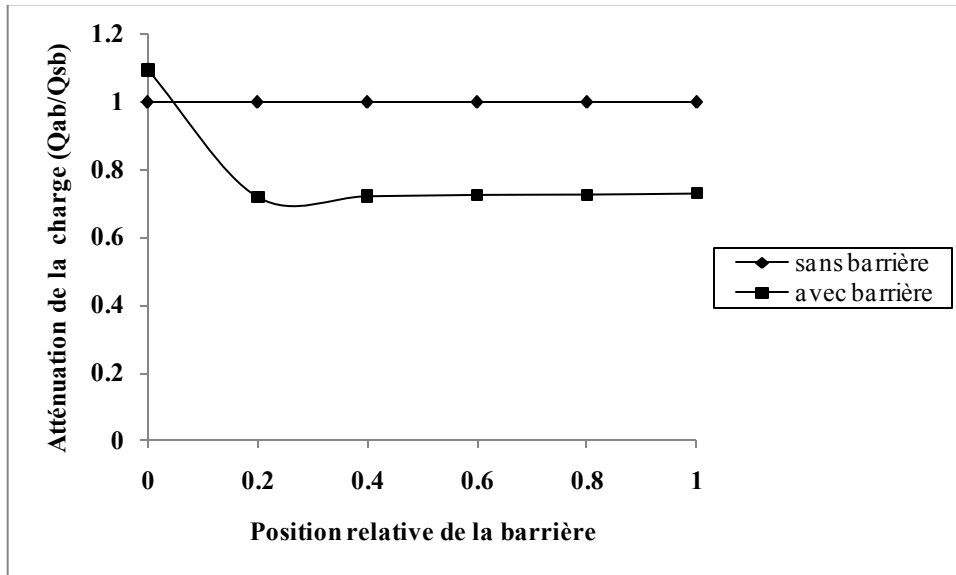


Figure IV.33 : Atténuation de la charge de la barrière en presspahn en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$, $e=4\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

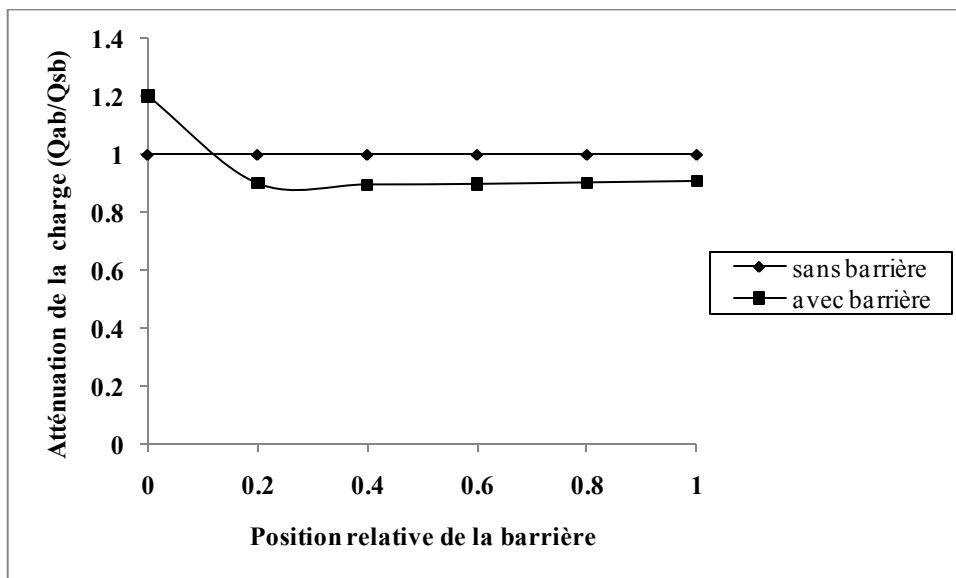


Figure IV.34 : Atténuation de la charge de la barrière en presspahn en fonction de sa position: $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $U=35\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.4.2.2 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.35 à IV.38).

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 pour les deux types de barrière quelle que soit la distance inter-électrodes et les dimensions de la barrière, ce qui confirme donc que le système garde toujours son caractère capacitif.

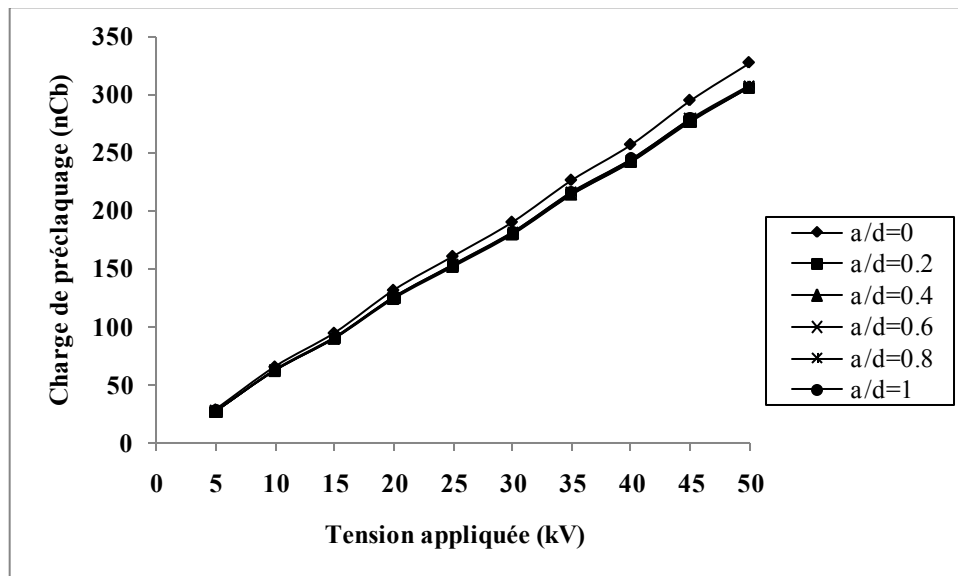


Figure IV.35 : Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan pour différentes positions de la barrière en bakélite $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

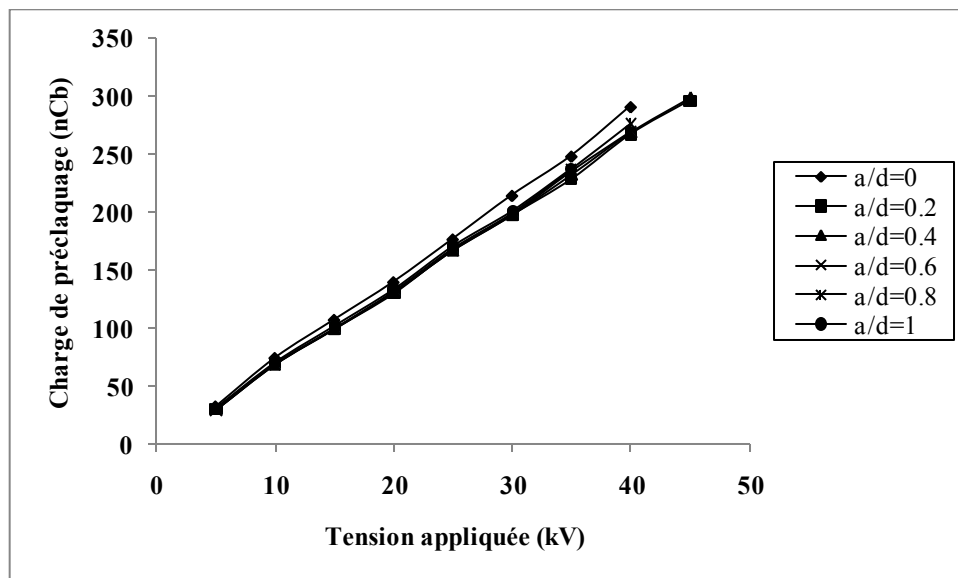


Figure IV.36: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan, pour différentes positions de la barrière en bakélite, $D=20\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

La position de la barrière dans l'intervalle inter-électrodes n'a pas d'effet sur la charge de préclaquage. Par ailleurs, la capacité du système est constante pour toutes les positions de la barrière, sauf pour la position $a/d=0$ où la barrière est située près de l'électrode pointe. Dans ce cas la capacité du système est plus élevée, ce résultat est plus significatif pour la barrière en presspahn que pour celle en bakélite. Cependant, la capacité du système dépend principalement du milieu et de la géométrie du système.

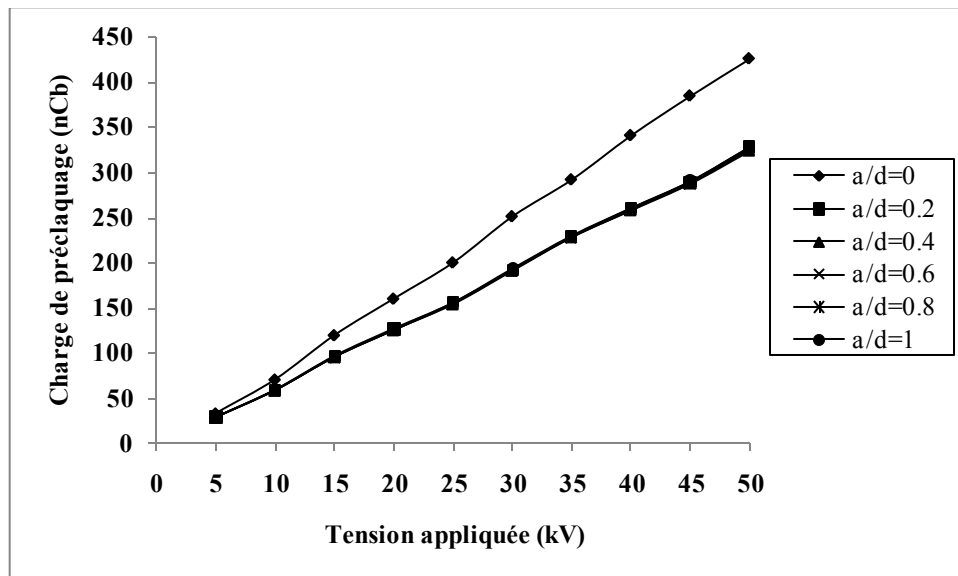


Figure IV.37: Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan, pour différentes positions de la barrière en presspahn, $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

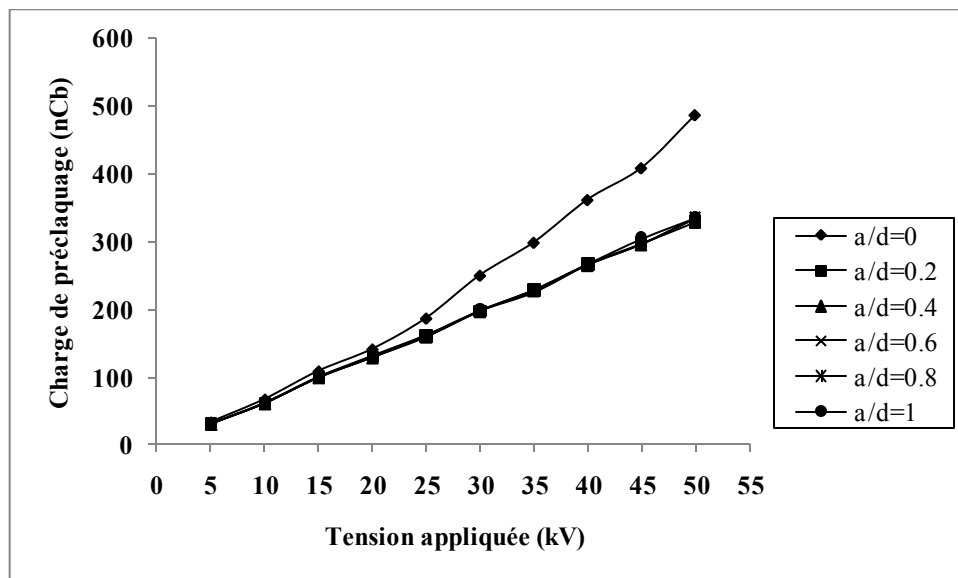


Figure IV.38 : Charge en fonction de la tension appliquée dans un système pointe-plan, pour différentes positions de la barrière en presspahn, $D=20\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

D'après les figures IV.37 et IV.38, pour une barrière en presspahn, la charge de pré-claquage est plus importante pour la position $a/d=0$. A cette position, une grande quantité de charge peut s'accumuler sur la surface de la barrière. Ce phénomène 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 serait du essentiellement à la différence de permittivité entre les deux matériaux.

IV.4.2.3 Effet de la distance inter-électrodes

Pour l'étude de l'effet de la distance inter-électrodes sur la charge de pré-claquage du système pointe-plan avec barrière, cinq distances ont été considérés $d=(4, 6, 8, 10 \text{ et } 12\text{cm})$, et différentes positions de la barrière.

D'après les résultats obtenus (Figures IV.39 à IV.42), nous remarquons, pour les niveaux de tension supérieurs à 15kV , que la réduction de la distance inter-électrodes entraîne une

augmentation de la charge de pré claquage pour les deux types de barrière de même largeur et pour les épaisseurs choisies. Ceci serait 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 figures (IV.41 et IV.42).

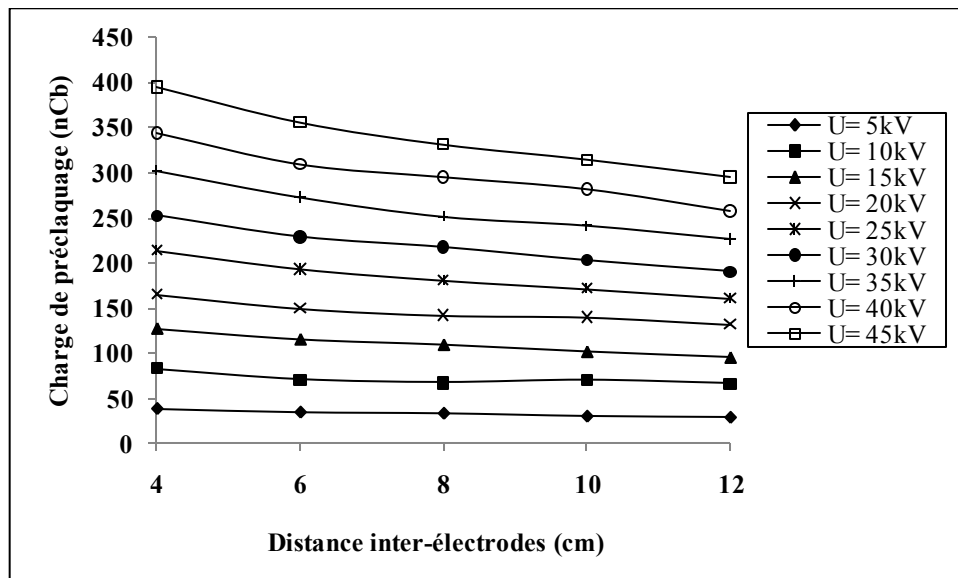


Figure IV.39: La charge de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension, barrière en bakélite: $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$.

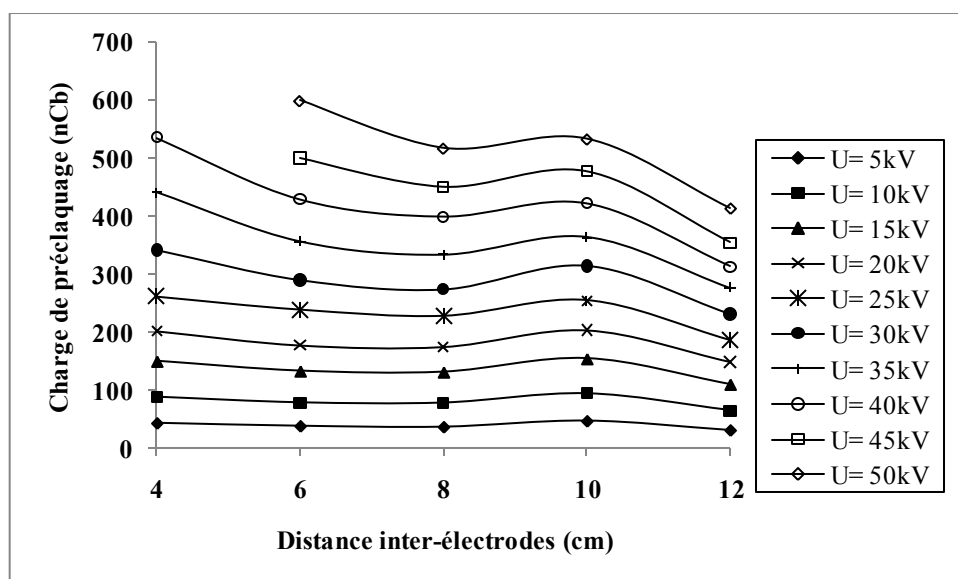


Figure IV.40: La charge de pré claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension, barrière en presspahn: $D=10\text{cm}$, $e=4\text{mm}$, $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$.

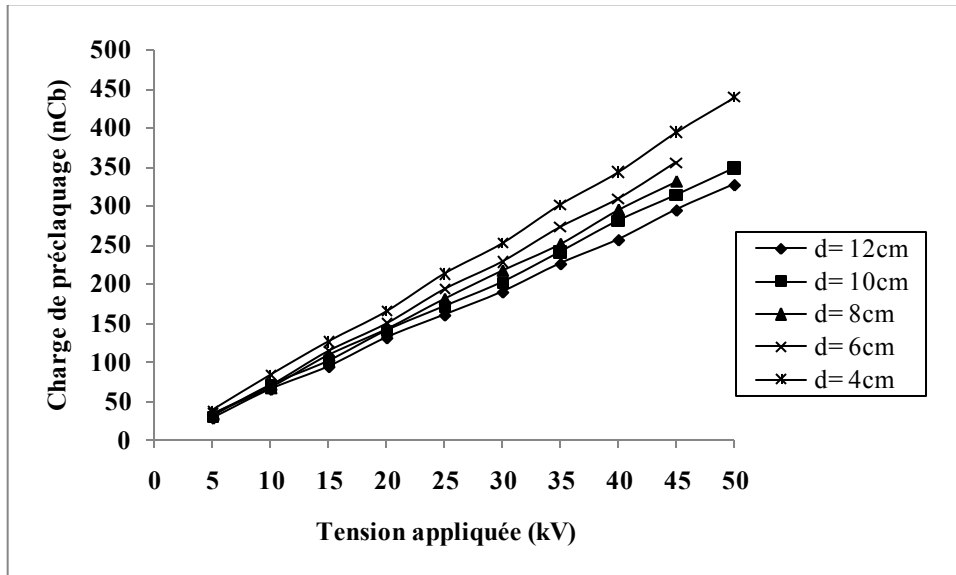


Figure IV.41 : Charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes, barrière en bakélite, $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $a/d=0$ $r_p=6\text{mm}$.

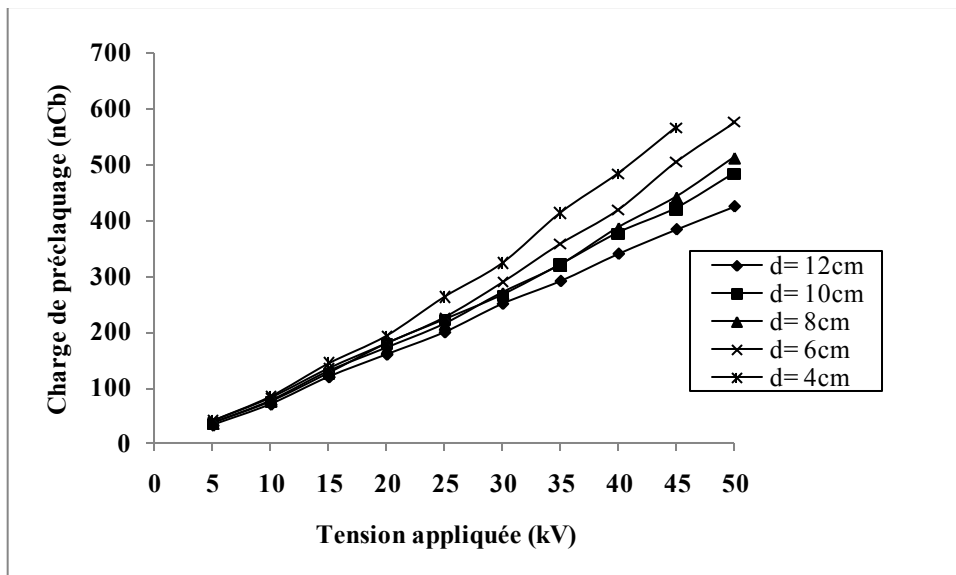


Figure IV.42: Charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes, barrière en presspahn, $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.4.2.4 Effet de la position de la barrière

Aux figures IV.43 à IV.46 sont illustrées les courbes de la charge en fonction de la position de la barrière pour 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 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.46 et IV.47), présentant l'atténuation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes, il en ressort que la quantité de charge est presque constante pour toute les positions de la barrière sauf pour la position $a/d=0$ où elle est plus importante et même

supérieure à celle sans barrière. Ceci est du à l'accumulation de la charge sur la surface de la barrière

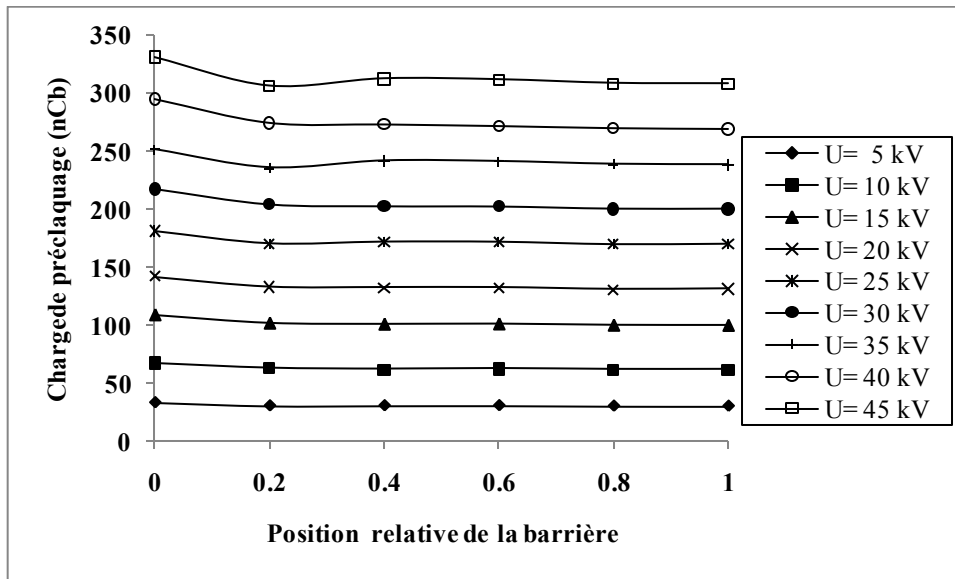


Figure IV.43: Charge de pré claquage en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en bakélite, pour différents niveaux de tension : $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=8\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$

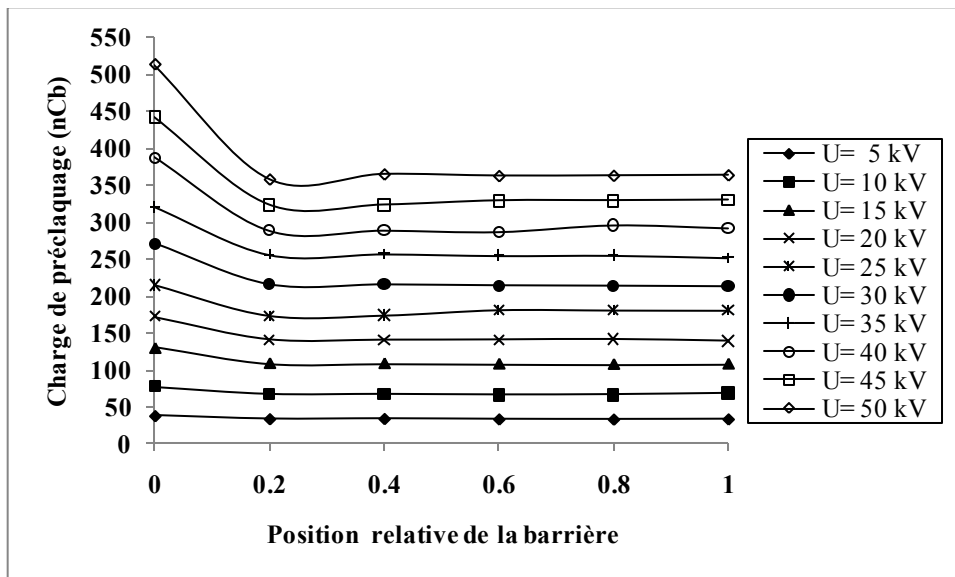


Figure IV.44: Charge de pré claquage en fonction de la position de la barrière dans un système pointe-plan avec barrière en presspahn pour différents niveaux de tension, $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=8\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

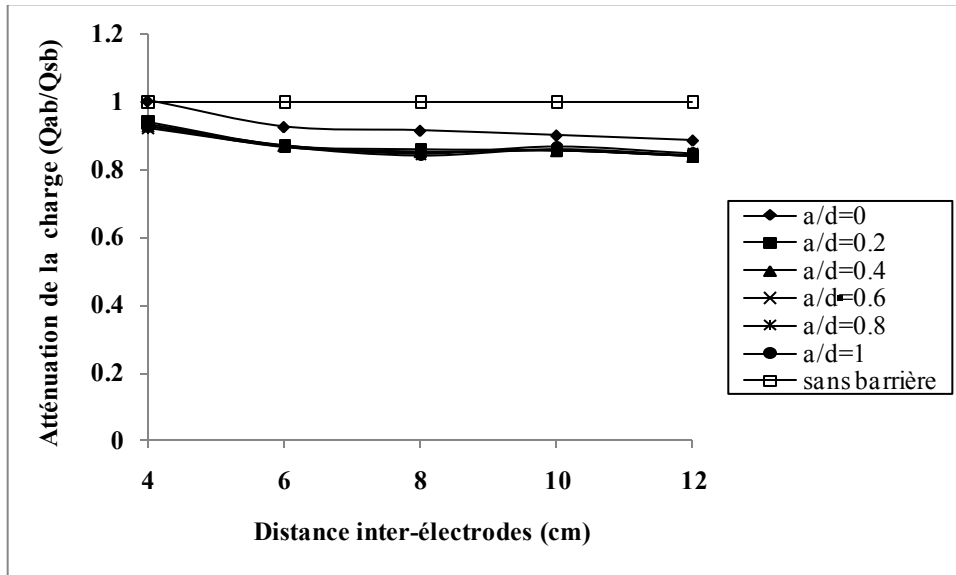


Figure IV.45: Atténuation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière en bakélite; $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$ et $U=30\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$.

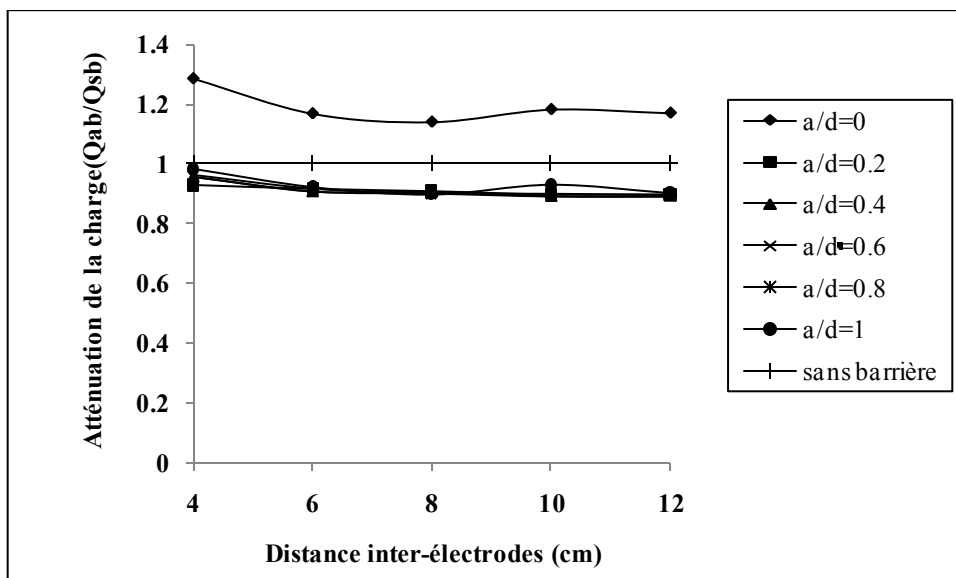


Figure IV.46 : Atténuation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes positions de la barrière en presspahn; $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$ et $U=30\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$

IV.4.2.5 Effet de la nature de la barrière

Les résultats obtenus sont présentés aux figures (IV.47 à IV.49), l'efficacité de la barrière dépend également de la nature de la barrière. Nous remarquons que pour deux barrières de mêmes dimensions et de natures différentes, la réduction de la charge de pré claquage est plus importante pour la barrière en bakélite que pour celle en presspahn, en raison de la différence de leurs permittivités. Donc une barrière en bakélite est plus efficace que celle en presspahn. Ces caractéristiques montrent que la quantité de la charge en fonction de la position se stabilise à partir de la position $a/d=0.2$ pour les deux types de barrières.

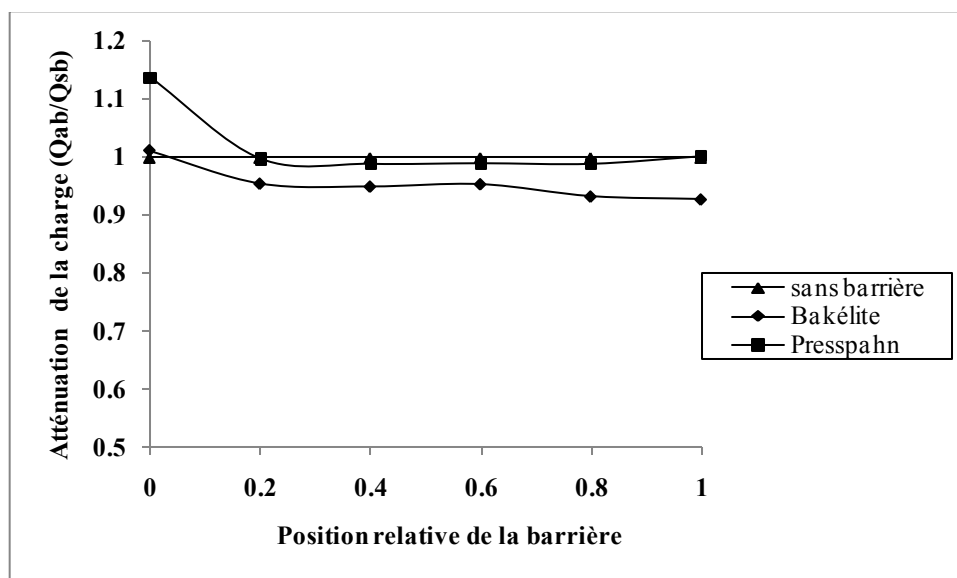


Figure IV.47: Atténuation de la charge en fonction la distance inter-électrodes et la nature de la barrière, $D=10\text{cm}$; $e=2\text{mm}$; $U=10\text{kV}$; $d=6\text{cm}$

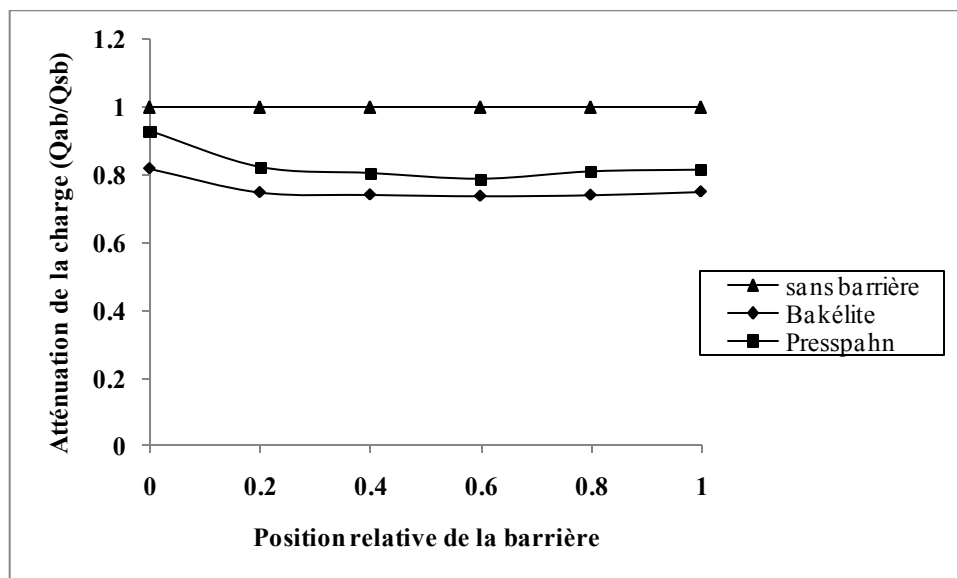


Figure IV.48: Atténuation de la charge en fonction la distance inter-électrodes et la nature de la barrière : $D=10\text{cm}$; $e=4\text{mm}$; $U=5\text{kV}$; $d=4\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

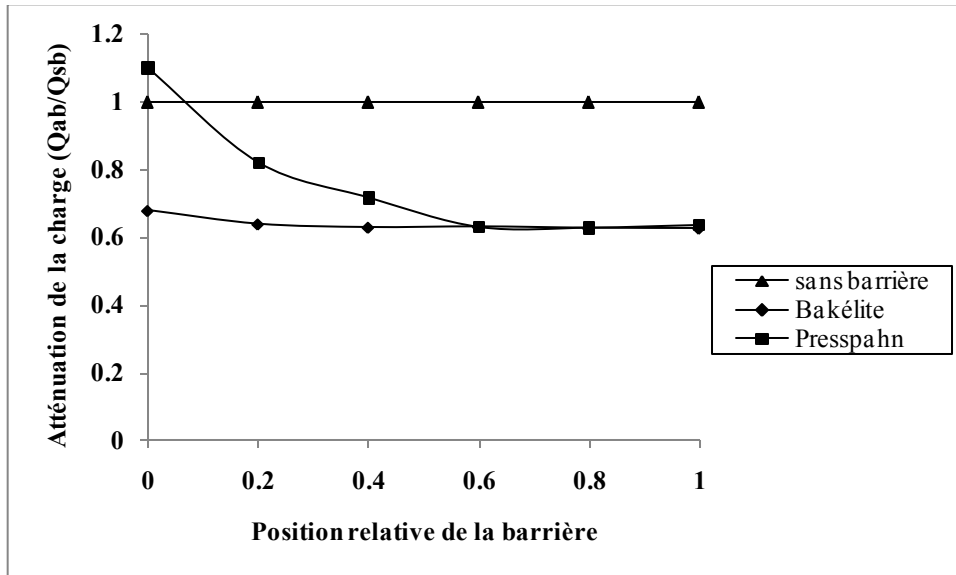


Figure IV.49: Atténuation de la charge en fonction de la position et la nature de la barrière: $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=12\text{cm}$ et $U=5\text{kV}$, $r_p=6\text{mm}$

Il apparaît que plus la tension appliquée augmente, plus l'écart entre les deux courbes se différencie surtout pour la position $a/d=0$ où la barrière est en contact avec la pointe. Pour mieux observer cette différence, nous présentons les courbes exprimant la variation de la charge en fonction de la tension appliquée (Figures IV.50 et IV.51). Ces caractéristiques présentent une variation pratiquement linéaire de la charge dont la différence entre les deux matériaux utilisés s'accroît de plus en plus que la tension appliquée est élevée.

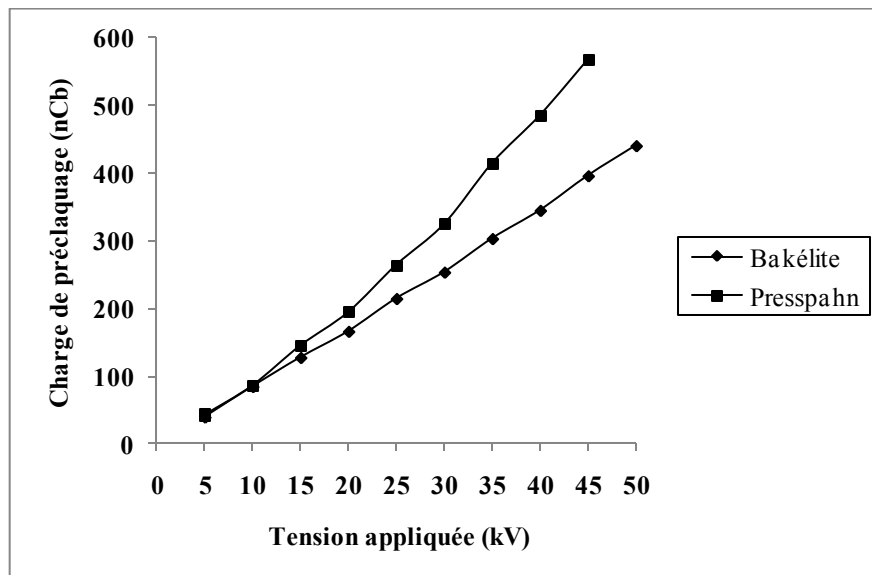


Figure IV.50: La charge de préclaquage en fonction de la tension appliquée et la nature de la barrière; $D=10\text{cm}$; $e=2\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$.

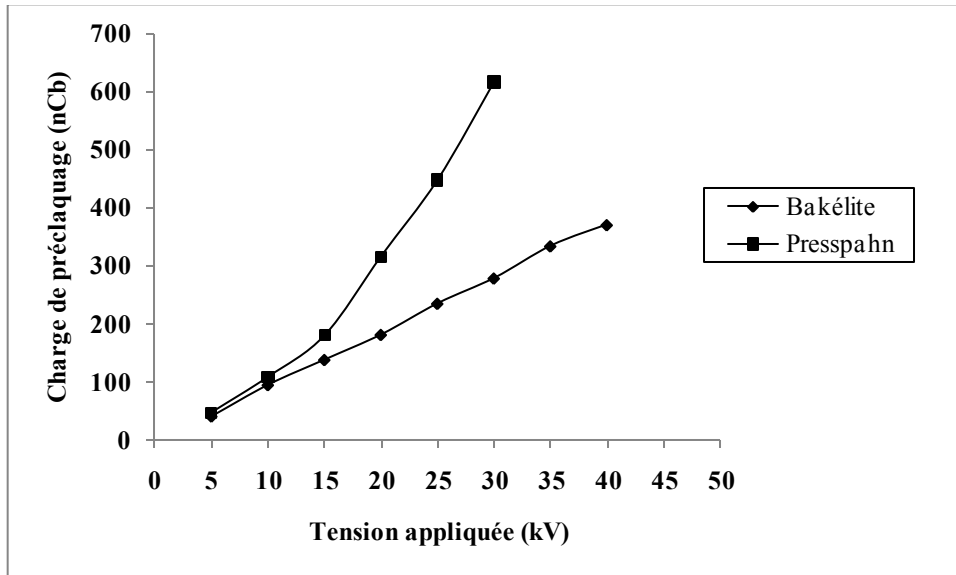


Figure IV.51: La charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée et la nature de la barrière; $D=20\text{cm}$; $e=4\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$

IV.4.2.6 Effet de l'épaisseur de la barrière

Pour un niveau de tension appliquée, et une distance inter-électrodes données, nous observons d'abord que l'épaisseur de la barrière a une faible influence sur la charge de pré claquage aussi bien pour une barrière en bakélite que pour celle en presspahn, cela pour toutes les positions de la barrière et pour les deux largeurs étudiées (Figures IV.52 à IV.55). D'autre part, pour une barrière en presspahn située près de la pointe ($a/d=0$) (Figures IV.54 et IV.55), la charge de pré claquage augmente en fonction de l'épaisseur. Ce résultat dépend de la nature chimique du matériau de la barrière et de l'environnement physico chimique dans le quel est introduite. L'augmentation de l'épaisseur du presspahn donc du volume de la barrière, se traduit par une élévation de la porosité du matériau. Dans ce cas, une grande quantité d'huile pénètre facilement dans le presspahn provoquant ainsi l'accumulation d'une grande quantité de charge à la surface de la barrière.

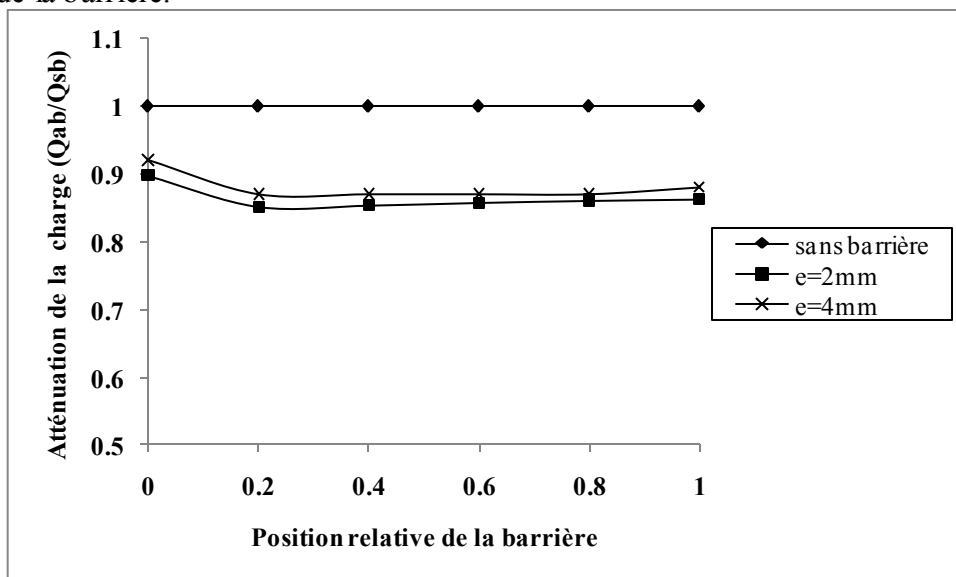


Figure IV.52: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en bakélite pour deux épaisseurs différentes; $D=10\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

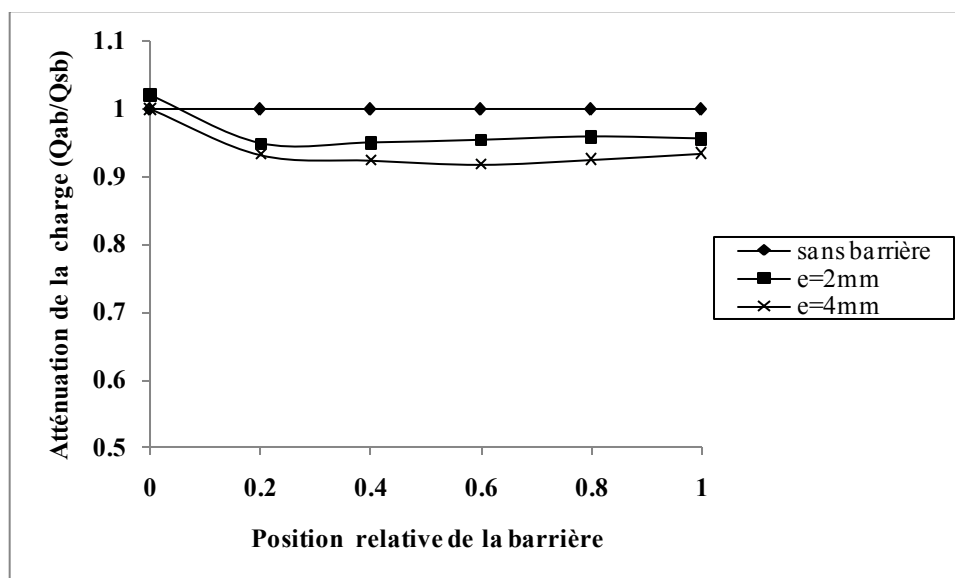


Figure IV.53: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en bakélite pour deux épaisseurs différentes; $D=20\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

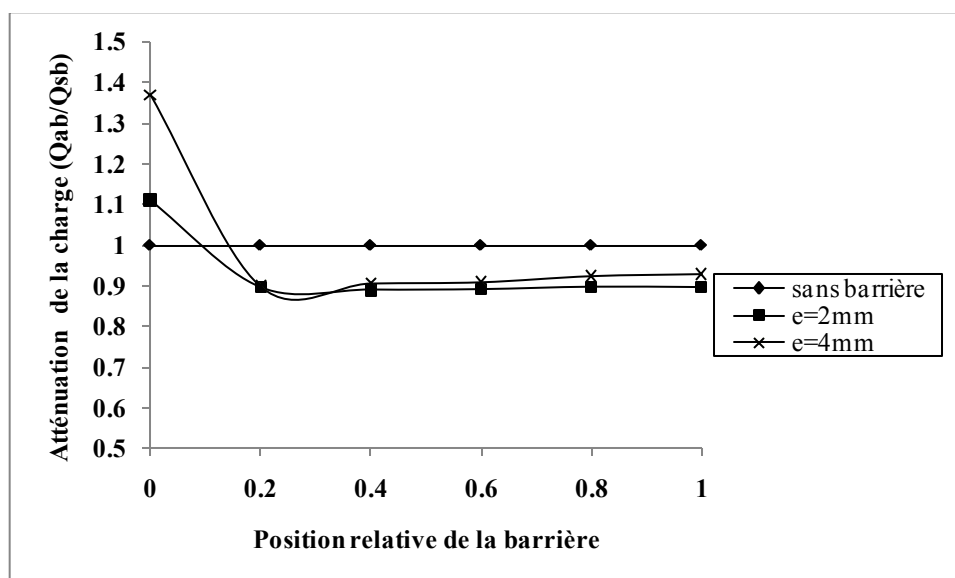


Figure IV.54: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en presspahn pour deux épaisseurs différentes; $D=10\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

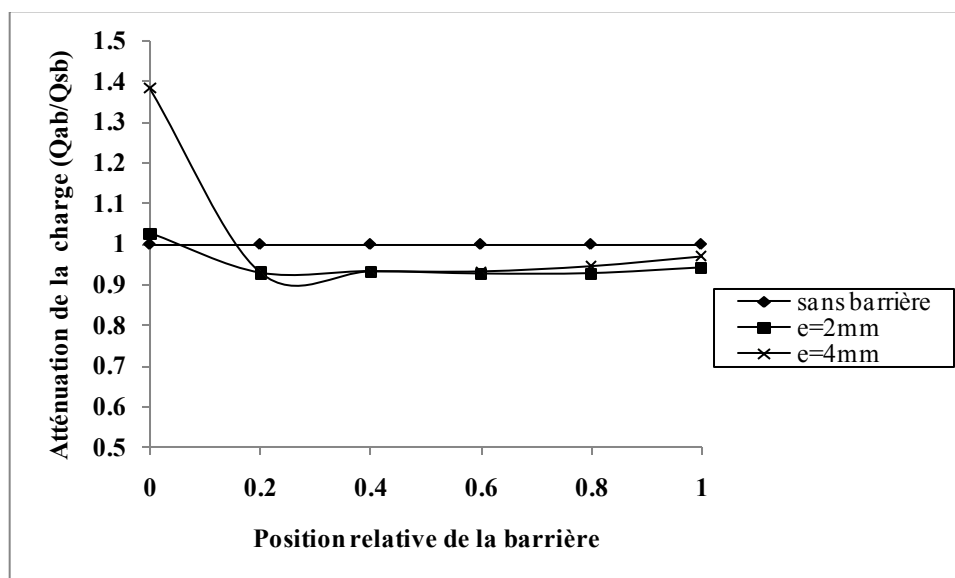


Figure IV.55: Atténuation de la charge en fonction de la position de la barrière en presspahn pour deux épaisseurs différentes; $D=20\text{cm}$; $U=15\text{kV}$; $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.4.2.7 Effet du diamètre de la barrière:

Les caractéristiques concernant la variation de la charge en fonction de la position sont reportées sur les figures (IV.56 à IV.57). Il ressort de ces courbes, que pour un même niveau de tension et une distance inter-électrodes donnée, la charge du système utilisé devient plus importante lorsque le diamètre de la barrière augmente. Nous pouvons interpréter ce résultat par le fait que l'accumulation de la charge augmente en fonction de la largeur de la barrière.

Nous constatons aussi pour la barrière en presspahn, que cette différence est plus remarquable pour la position $a/d=0$ pour une distance inter-électrodes donnée. En effet, la charge de pré claquage reste pratiquement constante en déplaçant la barrière vers l'électrode plane sauf entre la position $a/d=0$ et $a/d=0.2$.

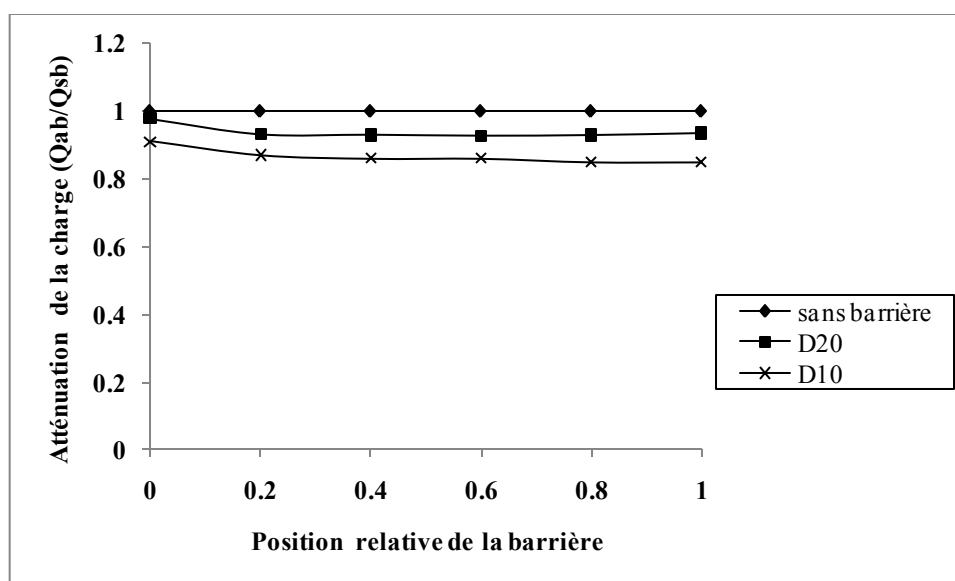


Figure IV.56: Atténuation de la charge en fonction de la position pour deux barrières en bakélite de diamètres différents, $e=4\text{mm}$, $U=35\text{kV}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

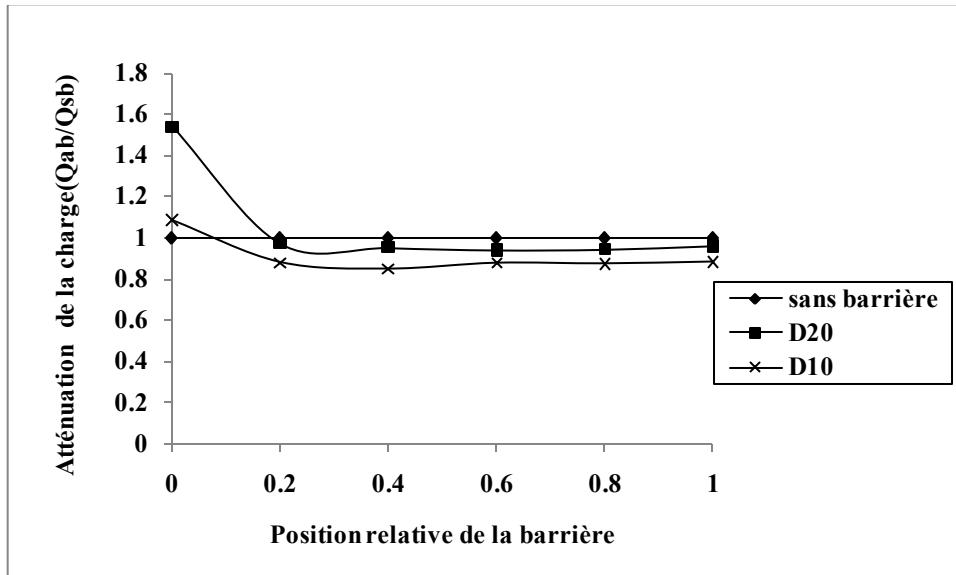


Figure IV.57: Atténuation de la charge en fonction de la position pour deux barrières en presspahn de diamètres différents (10 et 20cm), $e=4\text{mm}$, $U=35\text{kV}$, $d=12\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

Afin d'évaluer l'évolution de la charge de pré claquage en fonction de sa largeur en faisant varier la tension appliquée pour la position $a/d=0$, nous avons tracé les courbes (IV.58 et IV.59). En analysant ces courbes, nous remarquons qu'à la position $a/d=0$, quelle que soit la nature de la barrière, l'écart entre les deux courbes de la charge de pré claquage augmente pour les tensions appliquées ($U \geq 20\text{kV}$). Cependant, la quantité de charge augmente avec l'amplitude de la tension et la dimension de la barrière lorsque cette dernière est collée à l'électrode pointe. Ce résultat est plus remarquable pour la barrière en presspahn.

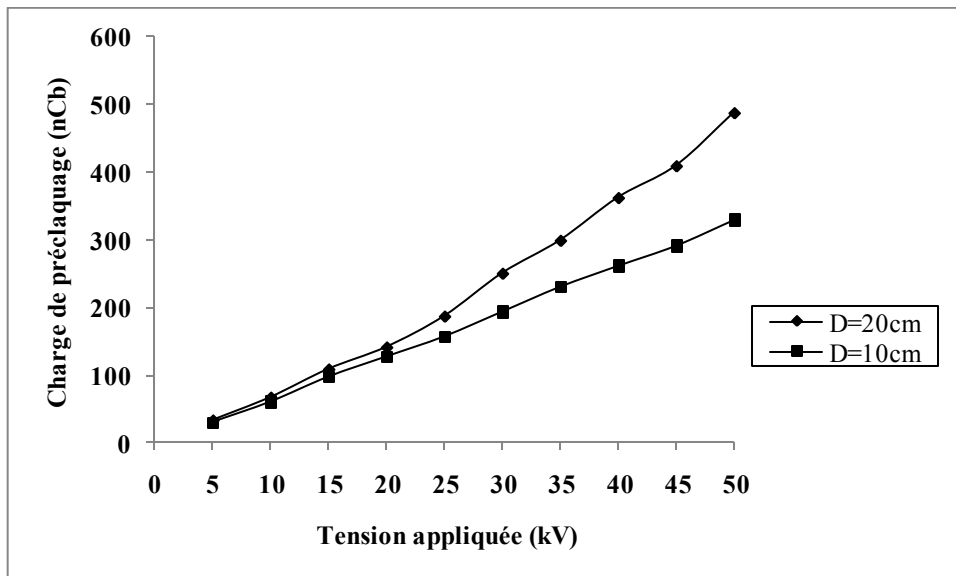


Figure IV.58: Charge en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en Presspahn de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$; $d=12\text{cm}$; $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$.

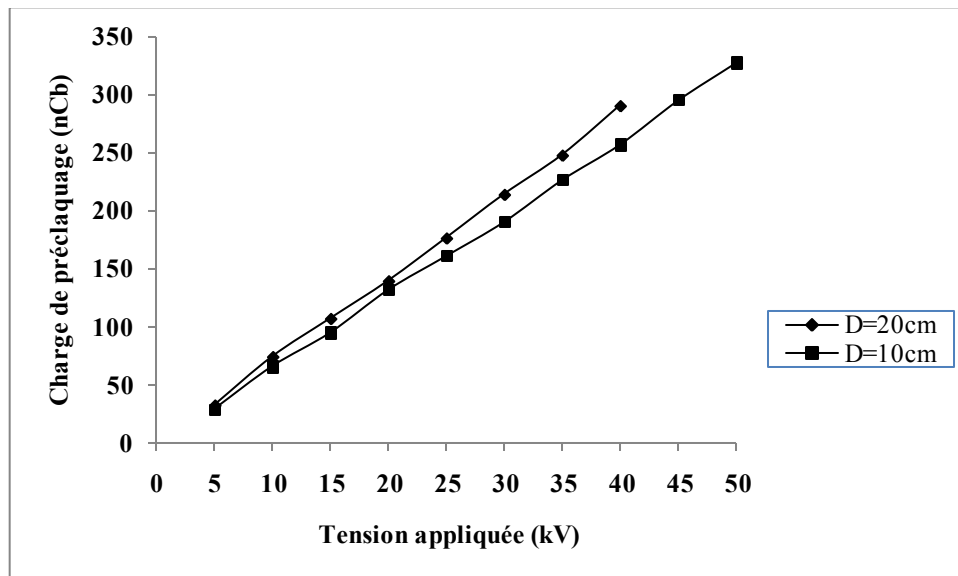


Figure IV.59: La variation de la charge de pré claquage en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en bakélite de diamètres différents (10 et 20cm); $e=2\text{mm}$; $d=12\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.5 Energie du système

L'énergie moyenne est définie par la relation suivante : $W = 1/2(Q.U)$. Nous nous intéressons à l'énergie car la propagation des streamers dans un milieu liquide dépend de l'énergie mise en jeu dans le milieu isolant.

IV.5.1 Energie pour un système pointe-plan sans barrière

IV.5.1.1 Influence de la tension appliquée

La figure IV.60 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.

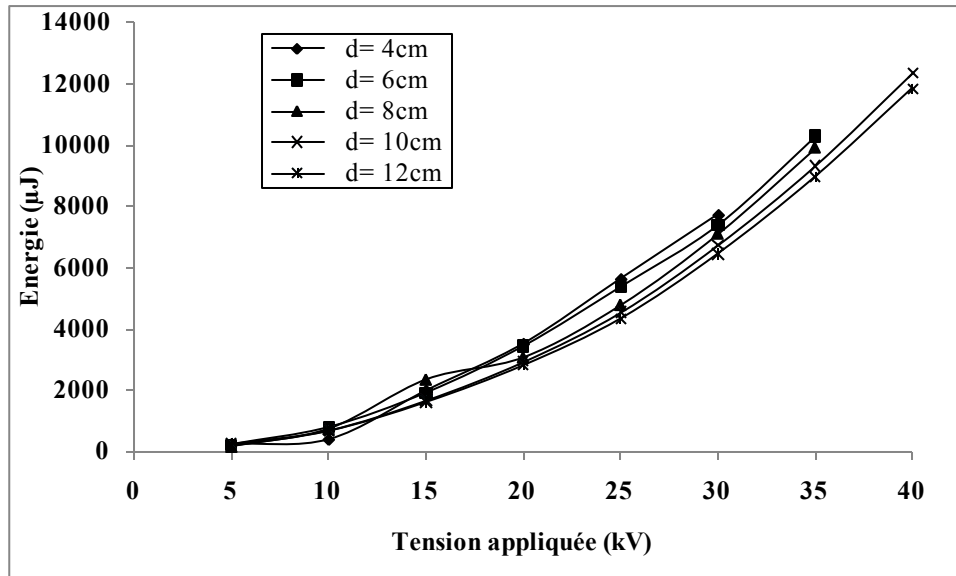


Figure IV.60: Energie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes

IV.5.1.2 Influence de la distance inter-électrodes

A la figure (IV.61), nous présentons 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.

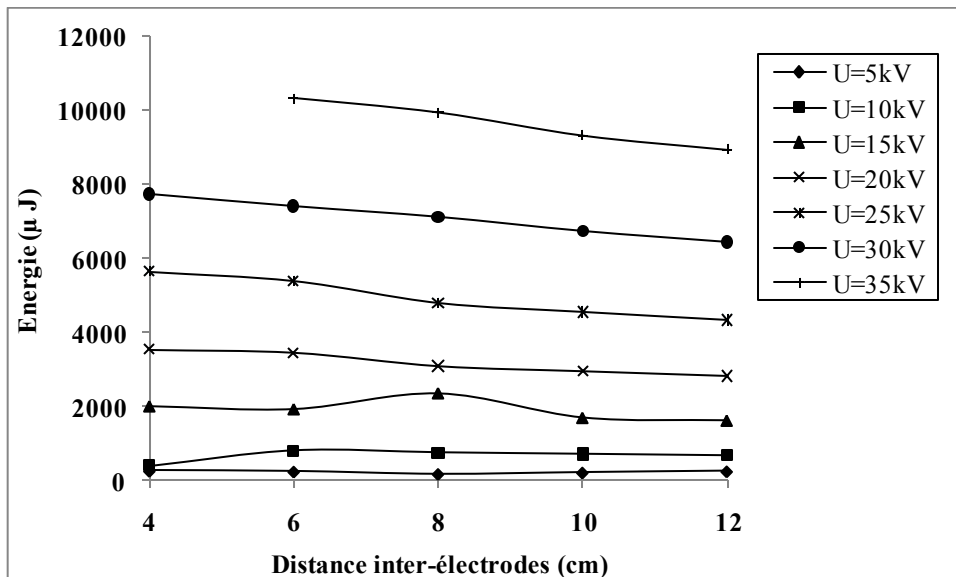


Figure IV.61: Energie du système pointe-plan sans barrière en fonction de la distance Inter-électrodes pour différents niveaux de tension

IV.5.2 Energie pour un système pointe-plan avec barrière
 IV.5.2.1 Effet de l'insertion de la barrière

Il apparait des figures (IV.62 et IV.63) 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 ou le champ est uniforme.

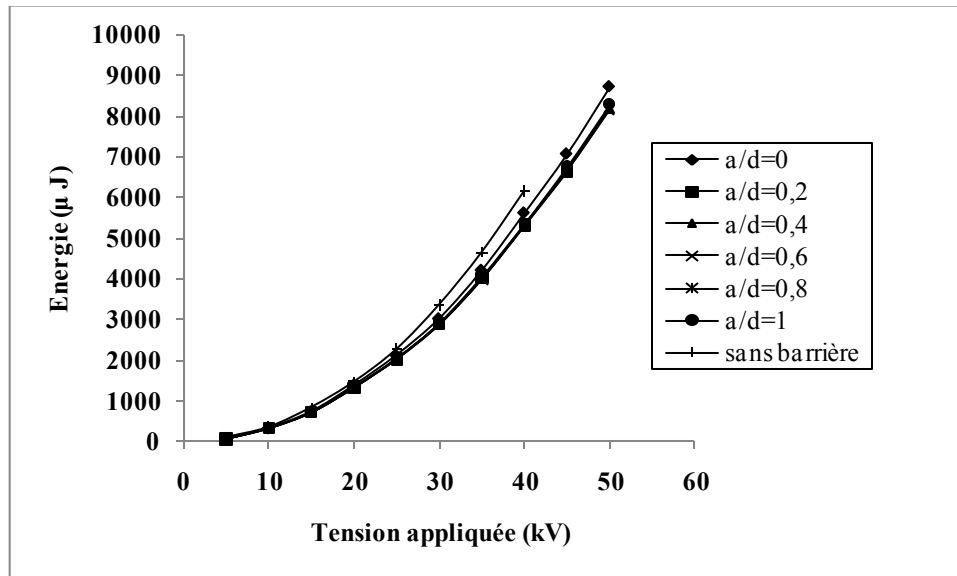


Figure IV.62: Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes positions de la barrière en bakélite ; $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

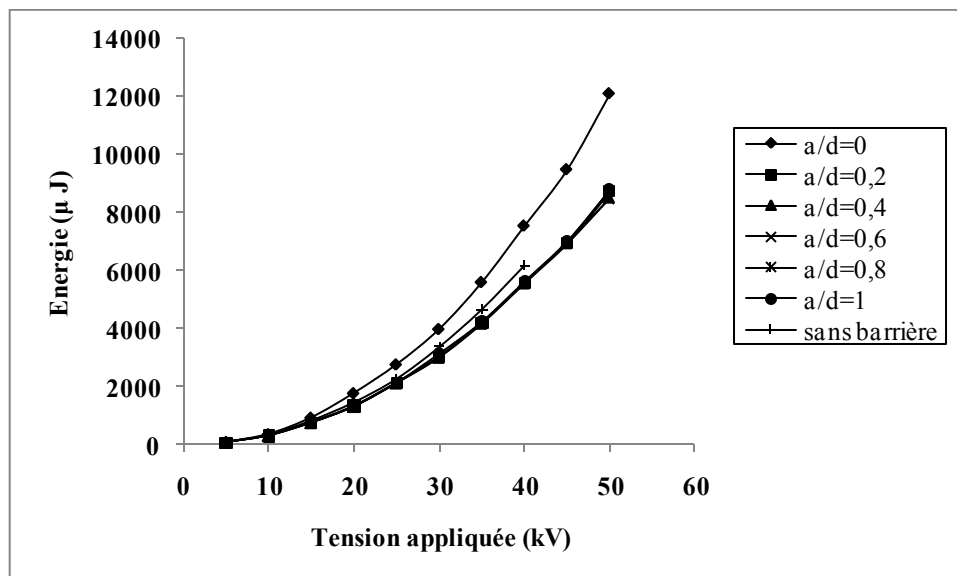


Figure IV.63: Influence de la barrière sur l'énergie pour différentes positions de la barrière en presspahn ; $D=10\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

Nous constatons d'après la figure (IV.63), 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.5.2.2 Effet de la position de la barrière

L'énergie mise en jeu en phase de pré claquage varie faiblement en fonction de la position de la barrière, cette variation est observée pour les deux types de barrière utilisées (figures IV.64 à IV.65). 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 et à 20 kV pour celle en presspahn. Ceci est dû à l'accumulation d'une grande quantité de charge sur la surface de la barrière pour les grands niveaux de tensions appliquées.

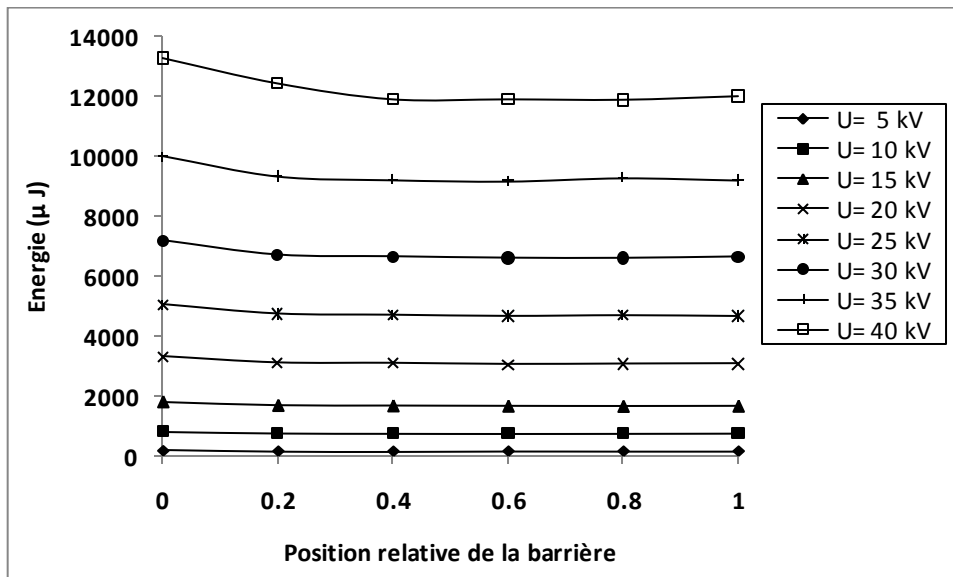


Figure IV.64: Energie du système pointe-plan avec barrière en bakélite en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=20\text{cm}$, $e=4\text{mm}$, $d=8\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

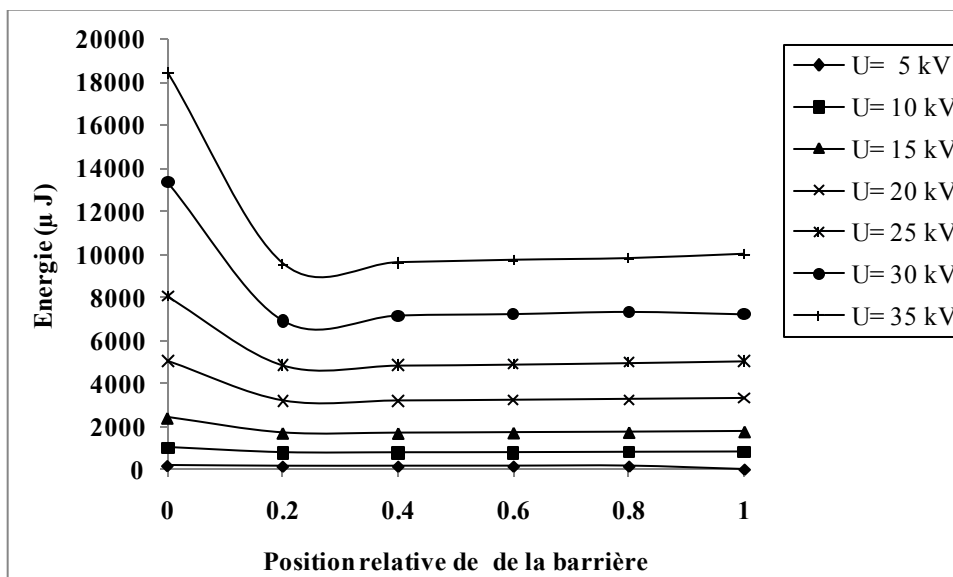


Figure IV.65: Energie du système pointe-plan avec barrière en presspahn en fonction de la position pour différents niveaux de tension: $D=20\text{cm}$, $e=4\text{mm}$, $d=8\text{cm}$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.5.2.3 Effet de la nature et de l'épaisseur de la barrière

Les caractéristiques présentées aux figures (IV.66 à IV.68) 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 de pré claquage 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 $a/d=0$ (figures IV.66). Cet écart est dû à la différence de permittivité des deux matériaux. Pour les positions supérieures ($a/d=0.8$ et $a/d=1$), l'influence de la nature de la barrière sur la charge de pré claquage est trop faible (figures IV.67 et IV.68).

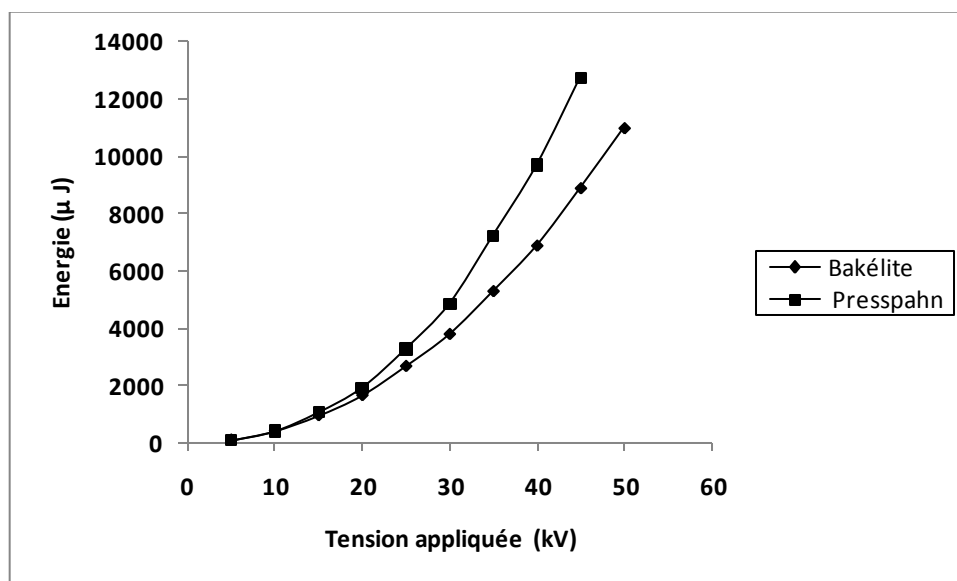


Figure IV.66: Énergie en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de la barrière; $D=10\text{cm}$; $e=2\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$.

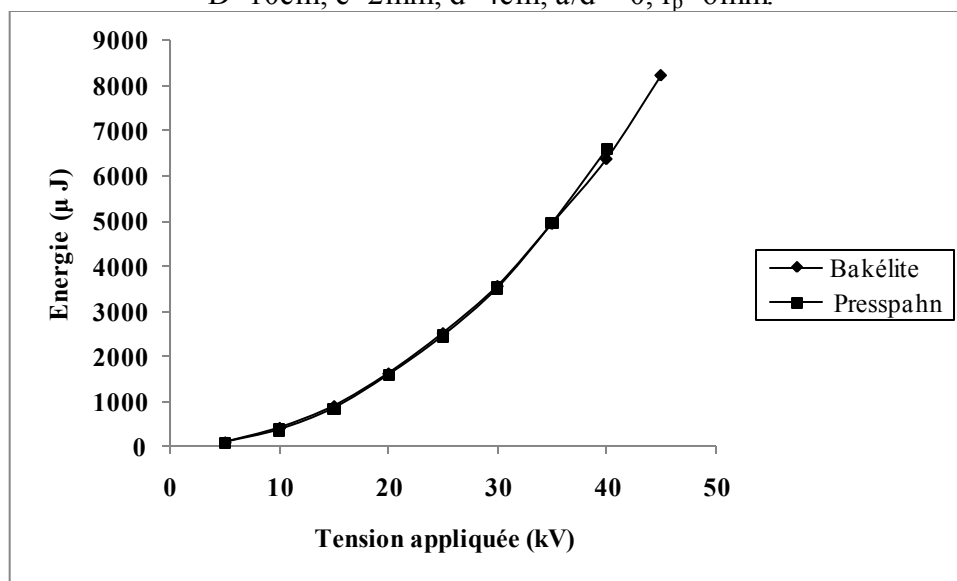


Figure IV.67: Énergie en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de la barrière; $D=10\text{cm}$; $e=2\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0.2$, $r_p=6\text{mm}$.

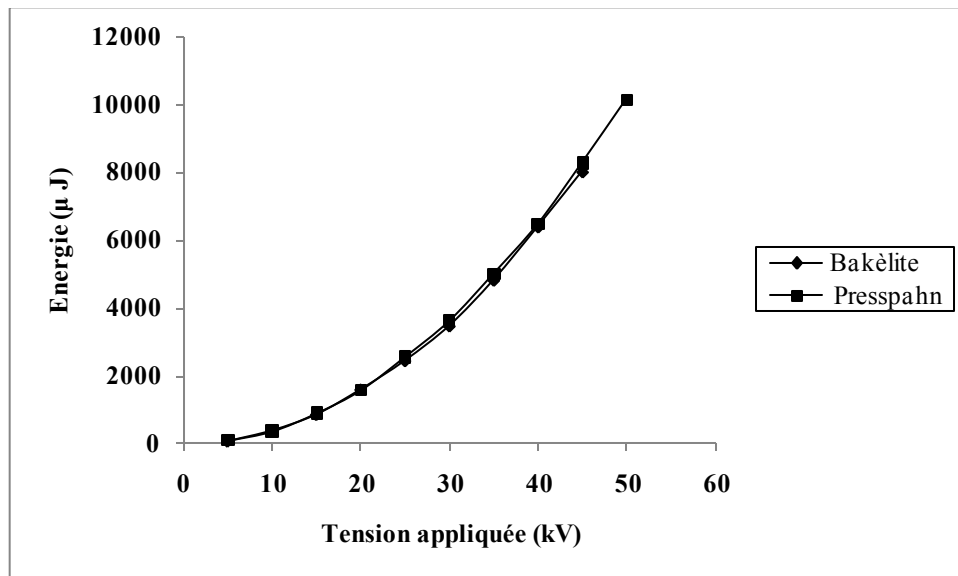


Figure IV.68: Energie en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de la barrière; $D=10\text{cm}$; $e=2\text{mm}$; $d=4\text{cm}$; $a/d = 0.8$, $r_p=6\text{mm}$.

La variation de l'énergie mise en jeu dans le système en fonction de la tension appliquée pour différentes épaisseurs est reportée sur les figures (IV.69 à IV.71). Nous remarquons que pour une barrière en presspahn, l'augmentation de l'épaisseur ne mène pas à l'augmentation de l'énergie injectée figures (IV.70 et IV.71) d'où la faible influence de cette dimension. Par contre pour une barrière située à la position $a/d=0$ de l'intervalle inter-électrodes (Figure IV.69), l'épaisseur du matériau a donc vraisemblablement plus d'influence sur l'énergie.

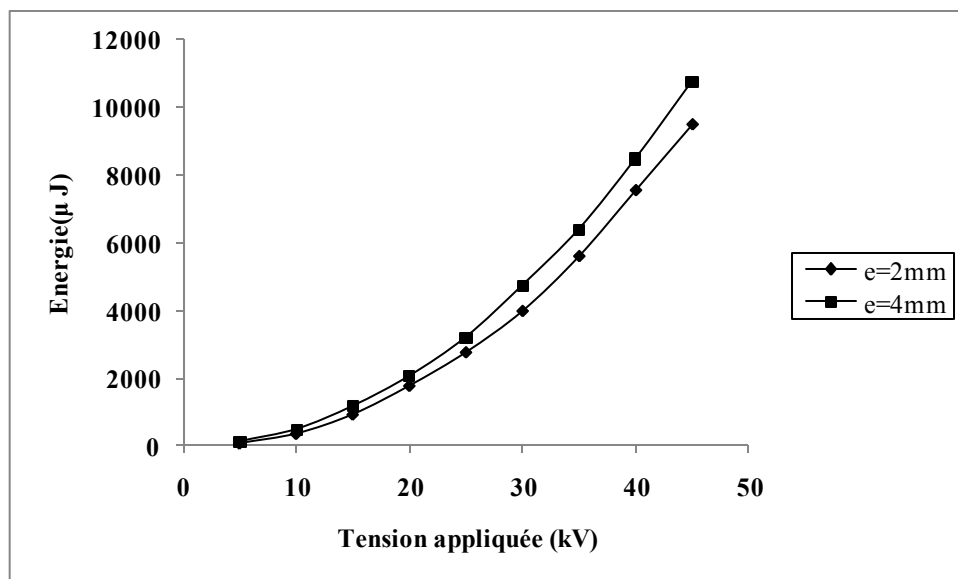


Figure IV.69 Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes ; $D=10\text{cm}$; $d=10\text{cm}$; $a/d=0$, $r_p=6\text{mm}$.

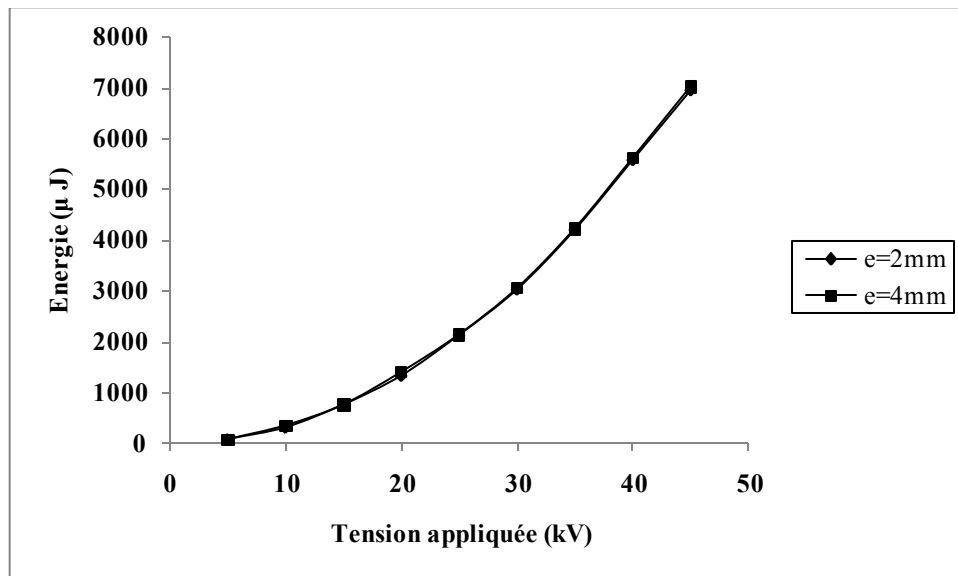


Figure IV.70 Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes ; $D=10\text{cm}$; $d=10\text{cm}$; $a/d=0.2$, $r_p=6\text{mm}$.

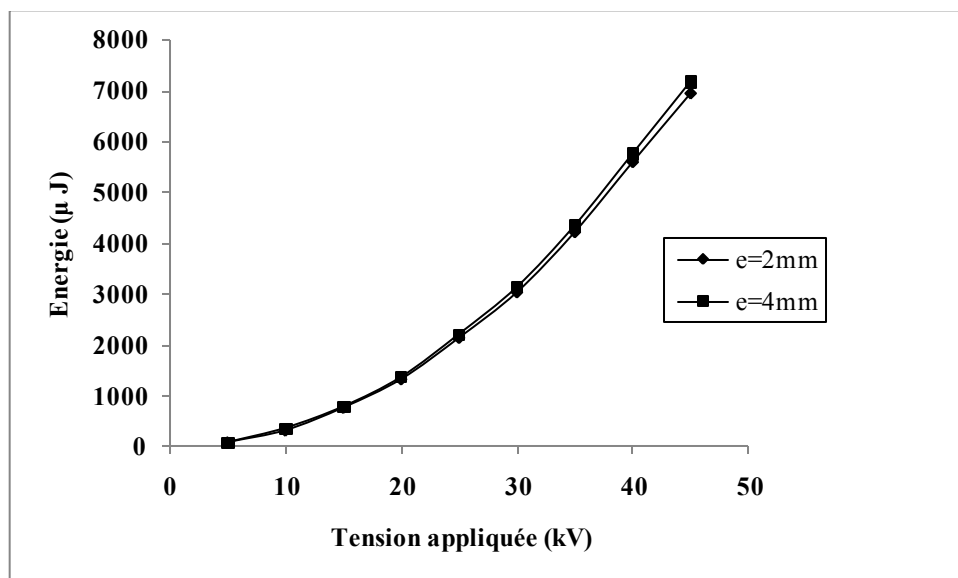


Figure IV.71 Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn d'épaisseurs différentes ; $D=10\text{cm}$; $d=10\text{cm}$; $a/d=0.8$, $r_p=6\text{mm}$.

IV.5.2.5 Effet du diamètre de la barrière

D'après les figures (IV.72 à IV.74) 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. Sachant que la barrière crée un obstacle géométrique, l'augmentation de sa largeur renforce plus cet obstacle et mène ainsi à l'accumulation d'une grande quantité de charge à sa surface.

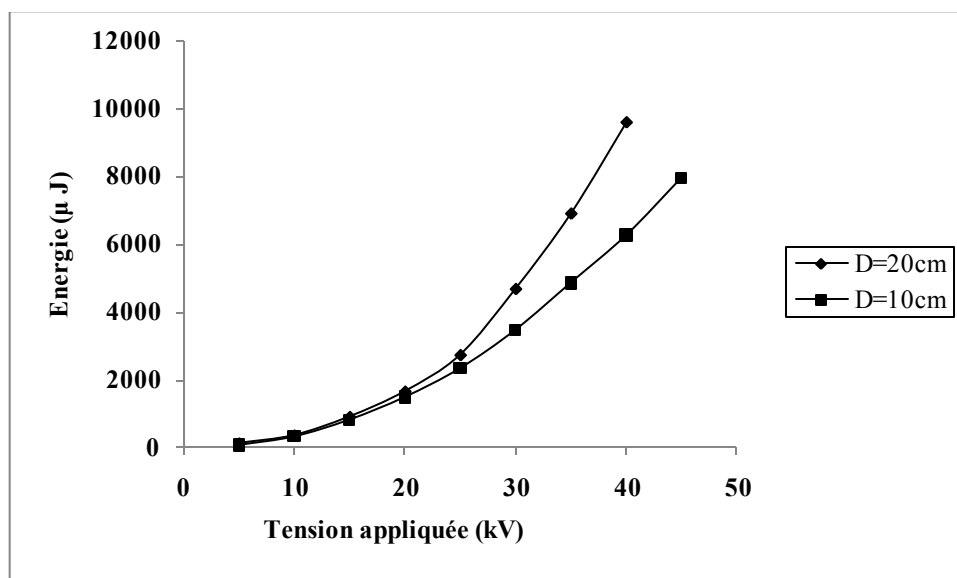


Figure IV.72: Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents ; $e=2\text{mm}$; $d=12\text{cm}$; $a/d = 0$, $r_p=6\text{mm}$.

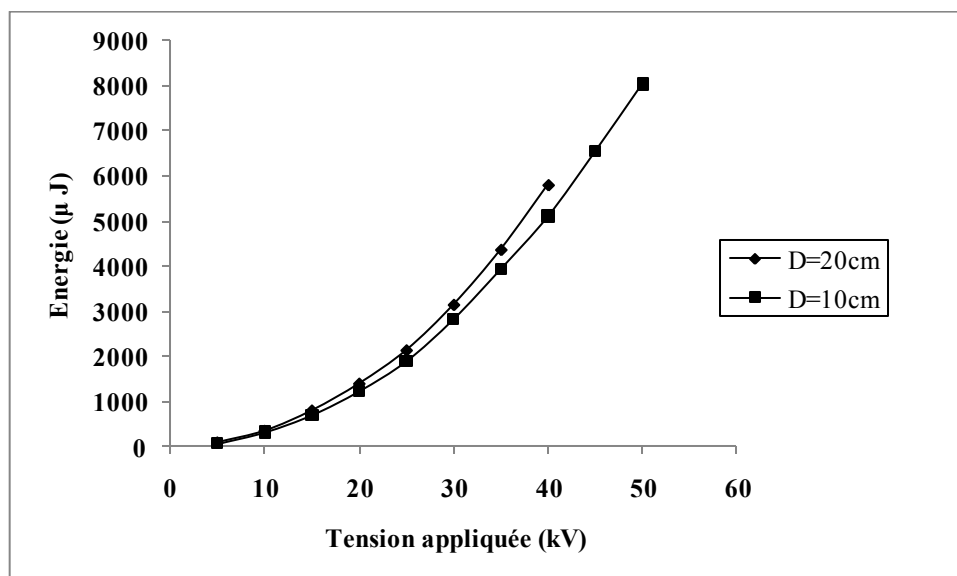


Figure IV.73: Energie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents ; $e=2\text{mm}$; $d=12\text{cm}$; $a/d = 0.2$, $r_p=6\text{mm}$.

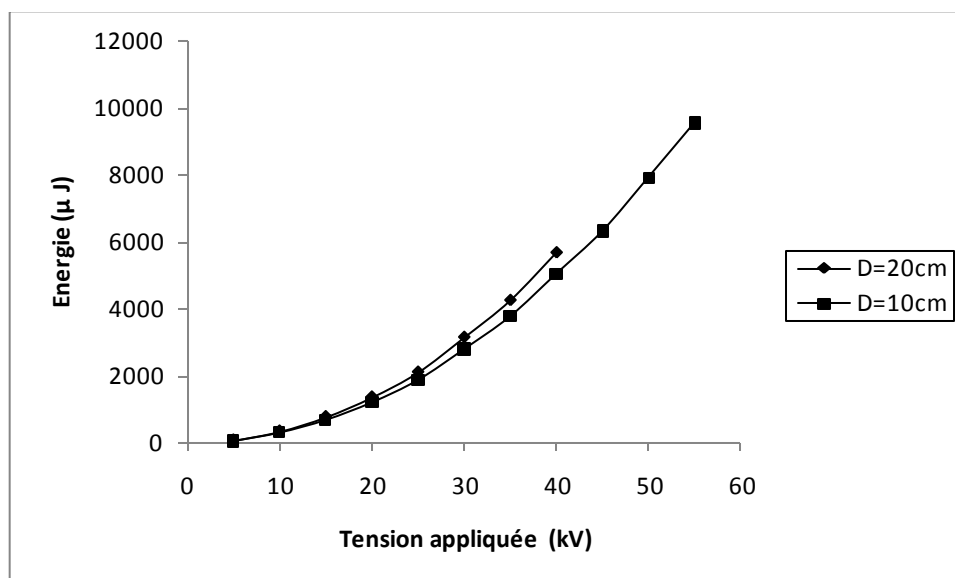


Figure IV.74: Énergie en fonction de la tension appliquée pour deux barrières en presspahn de diamètres différents ; $e=2\text{mm}$; $d=12\text{cm}$; $a/d = 0.4$ $r_p=6\text{mm}$.

IV.6 Discussion

Dans cette partie, nous avons essayé d'identifier et d'interpréter les différents mécanismes de pré claquage prenant naissance au sein du diélectrique liquide qui est l'huile minérale de transformateur dans notre cas, et à l'interface solide/huile, lorsque ceux-ci sont soumis à des champs électriques intenses. La détermination du courant et de la charge de pré claquage nous permettra une meilleure compréhension des contraintes auxquelles est soumise l'isolation afin de les réduire et d'améliorer les performances du système.

L'étude expérimentale de l'influence de la barrière isolante sur le courant et la charge de pré claquage dépend de certains paramètres physiques et géométriques dont les plus importants sont : la tension appliquée, la distance inter-électrodes, position de la barrière, la nature et la dimension de la barrière.

Le courant de pré claquage, varie périodiquement en présentant des distorsions en alternance positive et négative. Son amplitude croît avec la tension appliquée et décroît avec l'accroissement de la distance inter-électrodes. Les oscillogrammes obtenus indiquent un déphasage approximativement égal à 90° entre le courant et la tension. De même, les signaux de la charge et de la tension appliquée sont identiques et en phase, ce qui confirme bien le caractère capacitif du système. Le même résultat est rapporté dans la littérature [84]. Comme pour le courant, l'amplitude de la charge croît avec la tension appliquée et décroît avec l'accroissement de la distance inter-électrodes.

La variation du courant en fonction de la tension est pratiquement linéaire ce qui montre que l'impédance totale du système est pratiquement constante pour les deux configurations avec et sans barrière quel que soit le niveau de tension appliquée (figures IV.21 et IV.23), Sauf pour les faibles tensions (entre 5kV et 10kV). Dans ce cas, nous observons une augmentation de l'impédance, qui se traduit par l'apparition d'une perturbation près de la pointe. L'impédance dépend de la tension appliquée et de la distance inter-électrodes. Son augmentation par l'insertion de la barrière, conduit naturellement à une diminution de la capacité du système.

L'insertion de la barrière entraîne la réduction du courant et de la charge de pré claquage. Cependant la barrière joue le rôle d'obstacle géométrique et les charges injectées par la pointe sont freinées par la barrière.

Le courant de pré claquage ne dépend pas de la position de la barrière. Le même effet a été obtenu pour la charge de pré claquage et l'énergie mise en jeu dans le système, à l'exception de la position $a/d=0$, quand la barrière est en contact avec l'électrode pointe. A cette position, nous observons une augmentation de la quantité de charge qui se dépose sur la surface de la barrière. L'accumulation de la charge modifie la distribution du champ, ce qui peut conduire pour les tensions supérieures aux décharges glissantes puis la rupture. Par contre l'effet de cette position de la barrière ($a/d=0$) intervient que pour les niveaux de tensions les plus élevés ($\geq 10\text{kV}$) (figures IV.59, IV.60).

La largeur de la barrière isolante n'a pas d'effet sur le courant de pré claquage mais influence considérablement sur la répartition de la charge. Par contre l'influence de l'épaisseur du matériau n'est pas assez importante.

Pour une barrière située près de la pointe ($a/d=0$), La réduction de la charge est plus significative pour une barrière en bakélite que pour celle en presspahn. Sachant que la permittivité des solides est en général plus élevée que celle des liquides, il est peu probable cependant que les ions dans l'huile ne puissent adhérer à la paroi de la barrière en bakélite à surface lisse. Par contre dans le cas du presspahn présentant une forte porosité, les ions du liquide pénètrent facilement dans le presspahn, en entraînant avec eux une quantité appréciable de l'huile qui altère complètement la conduction et modifie de façon défavorable les propriétés de claquage du solide.

IV.7 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'apporter une contribution qualitative à l'influence de certains paramètres électro-géométriques ainsi que ceux relatifs à la barrière sur le courant et la charge apparente de pré claquage de l'huile de transformateur, dans une configuration pointe-plan sous tension alternative (50Hz). Parmi ces paramètres, nous citons la distance inter-électrodes, la tension appliquée, la position de la barrière, sa nature et ses dimensions.

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

L'influence de la tension sur le courant de pré claquage est aussi importante, en raison des champs électriques élevés imposés aux barrières. La barrière isolante modifie considérablement l'impédance équivalente 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 ($a/d=0$).

La charge apparente de pré claquage du système dépend de la largeur de la barrière. Plus le diamètre est grand, plus la charge du système est importante, surtout pour la position $a/d=0$.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons effectué a porté sur l'étude du comportement de l'huile minérale en présence d'une barrière isolante dans un système d'électrodes divergent.

Pour cela, nous avons procédé en premier lieu à la détermination de la tension de claquage en fonction de paramètres physiques et géométriques afin de comparer nos résultats à ceux déjà réalisés par d'autres auteurs. En second lieu, nous avons étudié le courant, la charge de préclaquage et l'énergie mise en jeu dans le système avec et sans barrière, dans le but d'identifier les mécanismes mis en jeu durant cette phase et apporter un complément aux travaux effectués.

Nous avons montré que l'insertion de la barrière améliore de façon significative la tenue diélectrique de l'intervalle d'huile ce qui confirme les résultats expérimentaux connus dans ce sens. La barrière se comporte comme un obstacle géométrique à la décharge, elle agit également sur la distribution de la charge et donc sur la répartition du champ dans le milieu.

La position optimale de la barrière correspondant à la valeur maximale de la tension de claquage est obtenue entre 20 et 40% de l'intervalle d'huile. Cet optimum est indépendant des paramètres relatifs à la barrière tels que sa nature, son épaisseur et sa largeur.

L'efficacité de la barrière dépend plus particulièrement de sa position ; elle est plus faible en tension alternative par rapport à celle obtenue en tension impulsionnelle par d'autres auteurs. L'analyse de l'équivalence géométrique entre les deux configurations avec et sans barrière, pour une distance équivalente égale à la somme des distances pointe bord de la barrière et de ce bord à l'électrode plane, nous a permis d'en déduire que cette équivalence n'est possible que pour les petites dimensions de la barrière par rapport à la distance inter-électrodes.

La propagation de la décharge dépend de la nature de la barrière. Elle entraîne une accumulation de la charge sur la surface de la barrière, provoquant par conséquent la réduction de la rigidité diélectrique du système. Ce phénomène est plus remarquable pour la barrière en presspahn et plus particulièrement lorsque celle-ci est en contact avec l'électrode pointe ($a/d=0$). A cette position, l'efficacité de la barrière est inférieure à 1, le courant et la charge de préclaquage sont supérieurs à ceux sans barrière. Nous pouvons en déduire que la position ($a/d=0$), constitue un point faible de l'isolation. Le claquage est plus facile à partir de cette structure mixte, et on se trouve confronté dans ce cas à un point triple où trois matériaux sont en contact (métal des électrodes, huile de transformateur et la barrière isolante). En présence d'un champ électrique, différents types de détériorations (décharges internes, électrochimiques et superficielles) sont présents simultanément et leur importance dépend de la nature de l'isolant solide et de l'huile.

L'ensemble des essais de mesure du courant et de la charge de préclaquage a révélé l'influence de certains paramètres de la barrière. Le courant injecté et la quantité de charge apparente sont réduits lors de l'introduction de la barrière isolante dans l'intervalle d'huile notamment lorsque la barrière est en contact avec la pointe. Cette réduction traduit une amélioration de la rigidité diélectrique du système pointe-barrière-plan et confirme que la position optimale de la barrière correspondant à la plus faible valeur du courant est entre 20 et 40% de l'intervalle inter-électrodes. L'accroissement de la largeur de la barrière joue un rôle important sur la répartition de la charge. Cependant la quantité de charge augmente avec l'accroissement de la largeur de la barrière. Par ailleurs, comme nous l'avons constaté lors des essais, l'épaisseur du matériau solide joue aussi un rôle non négligeable sur le courant de préclaquage, L'augmentation de l'épaisseur de la barrière, par conséquent le volume du diélectrique entraîne un nombre plus élevés de défauts ou d'inclusions sur la surface de la barrière d'où l'augmentation du courant. La capacité du système est constante pour toutes les positions de la barrière à l'exception de la position ($a/d=0$) où la barrière est située près de la pointe.

Les perspectives dégagées de cette étude sont diverses. Plusieurs de nos résultats pourraient éventuellement être développés dans des travaux futurs. Nous souhaitons que nos résultats obtenus peuvent servir à dimensionner les transformateurs de puissance afin d'assurer une meilleure qualité d'isolation.

Il est recommandé d'utiliser des dimensions de la barrière très différentes afin de pouvoir extraire le maximum d'informations et interpréter mieux les mécanismes mis en jeu.

Nous pensons qu'il serait très intéressant de poursuivre cette étude afin de trouver une corrélation entre les charges superficielles et les tensions de claquages. Ainsi une variation du rayon de courbure de la pointe et du niveau de l'huile serait bénéfique.

Bibliographies

Références bibliographiques

- [1] **N. Berger**, « liquides isolants en électrotechnique-présentation générale »: Caractéristiques des produits », Technique de l'ingénieur, D2471, 2002.20p
- [2] **C. Perrier**, « Etude des huiles et des mélanges, à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance – recherche d'un mélange optimal », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, Décembre 1997.
- [3] **T. O. Rouse**, "Mineral Insulating oil in transformers", IEEE Electrical Insulating Magazine, Vol.14, n°3, pp.6-16, May/June 1998.
- [4] **O. Lesaint, R. Tobazéon**, "Streamer generation and propagation in transformer oil under ac divergent field conditions", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.23, pp.941-954, 1988
- [5] **A. Beroual, R. Tobazeon**, "Prebreakdown phenomena in liquid dielectrics", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.21, pp.613-627, 1986
- [6] **O. Lesaint**, "Claquage et préclaquage dans l'huile minérale sous tension alternative", Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 1987.
- [7] **A. Zouaghi**, « Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectriques d'intervalle d'huile en chocs de foudre et en continu », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, décembre 1997.
- [8] **S.A. Studniarz**, "The effect of barriers in the low field region of non uniform fields on oil breakdown", IEEE, Power apparatus and systems, Vol PAS-100, N°5, pp1568-1573, 1981
- [9] **A. Beroual and A. Zouaghi**, "Barrier effect on the pre breakdown and breakdown Phenomena in long Oil Gaps", Conference record of the ICDL 96 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, pp.300-303, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [10] **N.F. Wolochchenko**, "Problems concerning the mechanism of the barrier effect", Elektritchestvo, nr 6, p. 61, 1947.
- [11] **I. Fofana, A. Beroual and A. Boubakeur**, "Influence of Insulating Barriers On Positive Long Air Gaps In Divergent Field", International Symposium on High Voltage Engineering, Session 3, Vol.3, N° 467, pp. 321-324, 22-27 August 1999.
- [12] **Li Ming, M. Leijon and T. Bengtsson**, "Factors influencing barrier effects in air-gaps", 9th ISH, International Symposium on High Voltage Engineering, session 2168, pp.1-4, Graz, Austria 1995
- [13] **F. Guerbas, A. Boubakeur, A. Beroual et M. Zitouni** «Effet d'une barrière isolante sur la tension de claquage de l'huile de transformateur dans un système pointe- plan sous tension », 7^{ème} CNHT, Numéro Spécial, Algerian Journal of Technology (AJOT), ISSN 1111-357X, pp. 80-83, Sidi Bel-Abbes, 19-21 Avril 2009

- [14] **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.
- [15] **A. Saker**, « Caractérisation des décharges rampantes à l'interface liquide Diélectrique/solide isolant », thèse de Doctorat, INPG. Grenoble, 1993
- [16] **Z. Djemai**, « Etude de la propagation des streamers à l'interface liquide/solide sous tension alternative 50Hz, » Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1991.
- [17] **Norme Internationale CEI 247**, Liquides isolants - Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$) et de la résistivité en courant continu, troisième édition 2004.
- [18] **Norme Internationale CEI 60156**, Isolants liquides - Détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle- Méthode d'essais, Deuxième édition, Novembre 1995.
- [19] **Norme International ISO 3104**, « Produits pétroliers, liquides opaques et transparents- détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique », 1994
- [20] **Norme Internationale CEI 296**, « Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion », deuxième édition, 1982.
- [21] **A. Bourgeois**, « Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance », thèse de doctorat, INPG. Grenoble, février 2007.
- [22] **T. Aka N'gnui**, « Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides modèles de génération et de propagation des streamers », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, Juin 2000.
- [23] **J. Perret, M.Paris**, « Les huiles Silicones pour transformateurs », E.D.F. Bulletin des études et recherche Série B, Réseaux électriques, Matériels électriques, n°2, 1987, pp.5-13.
- [24] **R. Tobazeon**, « Conduction électrique dans les liquides », Techniques de l'ingénieur, Traité D2430, p.4, Novembre 1966.
- [25] **S. Mouhoubi**, « Etude de l'influence d'une barrière dans un intervalle pointe – plan, par la mesure de la tension disruptive, du champ électrique et des décharges partielles » Thèse de Doctorat, Département d'électrotechnique, ENP, Alger, 2008.
- [26] **B.P.Kang**, « Thermal dependency of viscosity, power factor and ion content of electrical insulating oil» IEEE Transaction of Dielectrics and Electrical Insulation, (USA), September 1965.
- [27] **Norme CEI 608907 (Ed.1)**, « Méthode de détermination de la tension de claquage au choc de foudre des liquides isolants », Mars 1987.
- [28] **S. Boudraa**, « Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Université de Batna, 2005.

- [29] **S. Abdi**, «Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2002.
- [30] **A. Nacer**, « Caractérisation des matériaux diélectriques, Application à l'huile minérale de transformateur », Thèse de Doctorat, Département d'électrotechnique, USTHB, 2008.
- [31] **A. Norme CEI 60422 (Draft Ed.3)**: Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques, 2004.
- [32] **M.Aguet et M.Ianoz**, « Haute Tension » Traité D'électricité, d'électronique et d'électrotechnique, Editions DUNOD, 1987.
- [33] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechnique, concepts et théories », Editions Eyrolles, Paris 1986.
- [34] **J.S.Townsend**, « Electricity in gases », Oxford university Press, 1914.
- [35] **J.P. Gosse, B. Gosse, A. Denat**, « La conduction électrique des liquides diélectriques », Revue RGE, Vol N° 10, pp.733-744, 1985.
- [36] **J.P.Gosse**, « Conduction électrique des phénomènes pré disruptifs dans les liquides »^{3^{eme}} Journées Maghrébines des sciences des matériaux, Vol.1, pp.115-119, Alger 27-29 avril 1992.
- [37] **M.P. Verma**, « Electric field line of rod- barrier- plane in positive impulse voltage », Wiss. Zeit. Der TU Dresden H1, pp. 111, 1962.
- [38] **R.Coelho** « Conduction électrique dans les liquides »,Interprétation des phénomènes, techniques de l'ingénieur, D227, 1986.
- [39] **R.Tobazeon**, « Préclaquage et claquage des liquides diélectriques », Technique de l'ingénieur, D2450, 1997.
- [40] **A.H.Sharbaugh, J.C .Devins and S.J.Rzad**, "Review of past work on liquid breakdown", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.EI-15, N°.3, pp.167-170, 1980.
- [41] **N.Felici, B.Gosse, J.P.Gosse**, «La conduction dans les liquides diélectriques, Idées Modernes et Progrès récents, Aspects Electro chimiques et Electro hydrodynamiques », extrait de la R.G.E.t.85, pp.861-874, Nov.1976.
- [42] **I. Adamczewski**, « Les Phénomènes d'ionisation et de conduction dans les diélectriques liquides », Edition Masson et Cie, Pris 1968.
- [43] **K.C.KAO**, « Theory of high field electric conduction and breakdown in dielectric liquids», IEEE, Transaction on Electric Insulation, EI- 11, 121, 1976.
- [44] **F.M. Cluskey, A. Denat and O .Lesaint**, « Breakdown and pre breakdown phenomena in liquids dielectrics under positive impulse voltage», IEEE Transactions Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, N°3, pp.377-382, June 1994.

- [45] **F.M. Cluskey, A. Denat**, « Bubble formation in synthetic insulating liquids in a pulsed divergent electric field », IEEE Transaction of Dielectrics and Electrical Insulation Vol.1, N°4, pp.672-679, 1994.
- [46] **Y.Kako, E.Takahashi, H.okubo, A.Kishi and T.Okamoto**, « Influence de particules de faibles dimensions sur la rigidité diélectrique de l'huile isolante », CIGRE Conférence Internationale des grands Réseaux Electriques à Haute Tension, pp.15-03, 1986
- [47] **A. Beroual**, « Phénomènes de propagation et de génération dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension », Doctorat d'état, INPG, Grenoble, 1987.
- [48] **R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci**, « Formation of bubbles in non polar liquids initiated by current pulses », IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.26, N°4, pp.656-662, August 1991.
- [49] **F.Guerbas, S.Bouazabia, A.Beroual**, « Transition d'une bulle gazeuse au streamer », Troisième Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.33-36, Guelma 16-17 Novembre 1999.
- [50] **T.Aka-Ngnui, A. Beroual**, « Bubble dynamic and transition in liquid dielectrics under a high voltage divergent electric field », J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001), pp.1408-1412, 2001.
- [51] **I. Fofana, H. Borsi and E. Gockenbach**, « Fundamental Investigations on Some Transformer Liquids under Various Outdoor Conditions », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, N°6, pp. 1040-1047, December 2000.
- [52] **A.Von Hippel**, « Les diélectriques et leurs applications », traduit par M. Sanzade. Dunod, Paris, 1961.
- [53] **C. Maxwell**, « A treatise on Electricity and Magnetisms », Third ed, Vol 1, chap 9, Art310-314, Clarendon Press, Oxford, p 435, 1891.
- [54] **R.Coelho, B.Aladenize**, « Les Diélectriques », Editions HERMES, Paris, 1994.
- [55] **C.Oudet**, « Polymères, structure et propriétés », éditions Masson, 1994.
- [56] **T.Takada**, « Space charge formation in dielectrics », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.EI-21, N°6, 1986, pp.873-879.7
- [57] **T.J. Lewis**, « Basic Electrical Process in Dielectric liquids, » IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.1, pp 630-644, 1994.
- [58] **W. Rotenberg**, « Etude des phénomènes de préclaquage dans les huiles isolantes dans des systèmes d'électrodes couvertes de couches minces », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2000.
- [59] **O. Stern**, « The theory of the electrolytic double-layer », Z. Elektrochemie vol. 30, pp.508-16 1924.
- [60] **G.Leroy, C.Gary**, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Eyrolles, Paris, 1984.

- [61] **A. Boubakeur**, « Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan », Thèse de Doctorat, E.P. Varsovie, Pologne 1979.
- [62] **A.Roth**, “Hochspannungstechnik”, Berlin 1927, p.118.
- [63] **E. Marx**, « Der Durchschlag der Luft im unhomogenen elektrischen Feld bei verschiedenen Spannungsarten », E.T.Z, H33, pp. 1161, 1930.
- [64] **H. Roser**, « Dunne Schirme im raumladungsbeschwerten Entladungsfeld zum Zwecke d Erhöhung der Durchschlagspannung und Begrenzung der Tragerstromme in Luft», Dissertation, T.H. Braunschweig 1930.
- [65] **F.V.Topalis, I.A.Stathopoulos**, « Barrier effect on Electrical breakdown air gaps: a theoretical approach”, International Symposium on high voltage Engineering (9thISH), session 2147, pp.1-4, Graz 1995.
- [66] **A. Beroual et A. Boubakeur**, « Influence of barriers on the lightning and impulse strength of mean air gaps in point/plane arrangements». IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 26 N° 6, December 1991, pp1130-1139.
- [67] **J.M. Meek, M.Mc. Collins**, “Measurement of field preceding impulse breakdown of rod-plane gaps”, Proc.of the 7th Int. Conf.on Phenonena in ionized gazes, Vol 1.Belgrad, pp.581-585, 1966.
- [68] **J. Pilling**, « Dielectric barrier in uniform field », Elektrie 23, H 11, pp.463, 1969.
- [69] **M. Awad**, « Durchschlag von Luftfunkenstrecken mit verschmutzten Isolierstoffbarrieren », Elektrie 29, H10, pp.559, 1975.
- [70] **A.Boubakeur**, « Discharge phenomena in long air gaps with insulation screen», 4th International Symposium on high voltage engineering, 4th ISH, paper 44-05, Athens, Greece, 1983.
- [71] **M.V.Sokolova, A.N. Zhukov**, « Influence of barrier surface properties on the discharge in a narrow gaz gap », 9th ISH, International Symposium on High Voltage Engineering, session, 8352, pp.1-4, Graz 1995.
- [72] **F.Guerbas, M.Zitouni, A.Boubakeur and A.Beroul**, « Barrier effect on breakdown of point-plane oil gaps alternating current voltage », IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.4, Iss. 11, pp. 1245-1250, September 2010.
- [73] **H. Raether**, “Electron avalanches and breakdown in gases”, Butterworths, London, 1964.
- [74] **J.L. Jakubowski, A.Boubakeur**, “Rigidité des moyens intervalles d'air dans les systems isolants pointe-plan avec barrier”, Bulletin de l'académie polonaise des sciences (Polish Academy of Sciences Bulletin), Vol.28, N°9-10, pp.141-147,1980
- [75] **Norme ISO 2719**, « Détermination du point d'éclair- Méthode de Pensky-Martens en vase clos», Novembre 2002.

- [76] **M. Zitouni**, “ Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l’huile de transformateur dans l’intervalle pointe-plan sous tension alternative”, Mémoire de magister, Département d’électrotechnique, ENP, juillet 2010.
- [77] **A. Zouaghi and A. Beroual**, « Discharge Structure and Dielectric Strength of Long Oil Gaps In The Presence of Insulating Barrier », IEEE, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, pp.660-663, October 19-22, 1997.
- [78] **A.Boubakeur, L. Mokhnache and A. Feliachi** : « Theoretical investigation on barrier effect on point-plane air gap breakdown voltage based on streamers criterion », IEE Proc Sci. Meas.21 Technol., vol.151, No.3, pp.167-174, May 2004.
- [79] **A.Boubakeur**, « Influence des barrières sur l’amorçage des moyens intervalles d’air pointe – plan », 27, z. 3, pp. 729-744, Rozprawy Elektrotechniczne 1981.
- [80] **F.Guerbas, M.Teguar, S.Bouazabia, A.Boubakeur**, « Transformer Oil Behaviour under ac Voltage in Point-Plane Arrangement », XVth International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljubljana Elektrotehniko Milan Vidmar, Report T9-663, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007.
- [81] **F.Guerbas**, « Etude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition en streamer », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, Mai 1994.
- [82] **S. Bouazabia, F. Bitam, F. Guerbas et A. Beroual**, « Identification de la perturbation générée dans les diélectriques liquides », 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.167-169, Tizi-Ouzou, 17-18 et 19 Novembre 1997
- [83] **A.Hamimi**, « Contribution à l’étude des phénomènes de préclaquage dans une huile de transformateur sous champ alternatif divergent », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, 1997.
- [84] **S. Bouazabia**, « Etude des phénomènes de génération des streamers dans les diélectrique liquides », Thèse de Doctorat d’Etat, Département d’électrotechnique, ENP, Alger, 2006.

Résumé

Les travaux de recherche réalisés concernent l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique des grands intervalles d'huile en géométrie pointe-plan sous tension alternative. L'insertion d'une barrière isolante entraîne une augmentation de la tension de claquage. Cette augmentation est maximale lorsque la barrière est située au voisinage de la pointe à 20% de l'intervalle pointe-plan. Dans notre étude, nous avons tenu compte des paramètres relatifs à la barrière plus particulièrement sa position entre les électrodes, sa nature, et sa dimension. Une équivalence électro-géométrique est établie entre la configuration pointe-barrière-plan et celle pointe-plan dont la distance inter-électrodes est égale à la somme des distances pointe-bord de la barrière et bord de la barrière –plan. L'insertion de la barrière réduit considérablement le courant, la charge et l'énergie de préclaquage, plus particulièrement au voisinage de la pointe. Ainsi, la barrière joue un rôle d'obstacle géométrique et électrostatique à la décharge disruptive.

Mots clés : Barrière isolante, huile de transformateur, tension de claquage, courant et charge de préclaquage, décharge électrique

Abstract

The carried out investigations concern the influence of insulating barriers on AC dielectric strength of long point-plane transformer oil gaps. The insertion of an insulating barrier leads to the breakdown voltage increase. This increase is the highest for the screen situated near the pointed electrode at 20% of the point-plane gap.

In our study, we have considered the parameters of the barrier such as its position between the electrodes, its nature and dimension. An electro-geometric equivalence has been established between the point-barrier-plane configuration and a point-plane one, in which the distance between electrodes is made equal to the sum of the point-edge of the barrier distance and the edge of the barrier - plane one.

The Insertion of a barrier reduces considerably the prebreakdown current, charge and energy, particularly in the vicinity of the pointed electrode. The barrier acts than as a geometrical and electrostatic obstacle for the disruptive discharge.

Keywords: Barrier insulation, Transformer oil, Breakdown voltage, Pre-breakdown current and charge, Electric discharge

ملخص

البحوث التي أجريت تتعلق بتأثير الحواجز العازلة داخل زيوت المحولات على الصلابة الكهربائية في نظام حاد – مستوي تحت توتر متناوب. نبين في هذه الدراسة أننا إدراج الحاجز العازل يؤدي إلى زيادة كبيرة في التوتر الانفصامي لموضع الحاجز علي 20 ٪ من القطب الحاد. في دراستنا أخذنا بعين الاعتبار العوامل المتصلة بالحاجز العازل علي الخصوص، موضعه بين الأقطاب، مادة تكوينه و حجمه. يتم كذلك تأسيس تكافؤ هندسي بين التكوينين الحاد – حاجز – مستوي وحاد – مستوي حيث أننا المسافة بين الأقطاب الكهربائية تساوي مجموع المسافات من حاد – حافة الحاجز و من حافة الحاجز – مستوى . استعمال الحاجز العازل يؤدي إلى انخفاض كبير لكل من التيار ، الشحنة و الطاقة ما قبل الانفصام خاصة عندما يكون موضع الحاجز العازل علي 20٪ من القطب الحاد هذه النتائج تبين يمثل عقبة هندسية و كهربائية للتفريغ الكهربائي .

كلمات مفتاحية : الحواجز العازلة ، زيت المحولات، التيار و الشحنة ما قبل الانفصال، التفريغ الكهربائي