

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

**Ecole Nationale Polytechnique**



**المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique**

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

## **Mémoire de Magister**

Spécialité : **Génie Electrique**

Option : **Réseaux Electriques et Haute Tension**

## **Thème**

---

---

# **Influence Des Barrières Sur La Rigidité Diélectrique De L'huile De Transformateur Dans Des Intervalles Pointe-Plan Sous Tension Alternative 50Hz**

---

---

Par

**ZITOUNI Mohamed**

**Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de C.U de Djelfa**

Soutenu publiquement le 11/07/2010 devant le jury d'Examen

Président	M. TEGUAR	Professeur, ENP.
Rapporteur	A. BOUBAKEUR	Professeur, ENP.
Examineurs	A. MEKHALDI	Professeur, ENP.
	S. BOUAZABIA	Maître de conférences, USTHB.
	H. MOULAI	Maître de conférences, USTHB.
Invité	F. GUERBAS	Chargée de cours, USTHB.

## *Remerciements*

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction scientifique de monsieur le professeur A.Boubakeur, qu' il me soit permis de lui exprimer mes remerciements, de m'avoir confié le sujet, et de l'aide précieuse qu' il a toujours bien voulu m'apporter. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à Madame F.Guerbas, chargée de cours à l'USTHB, pour avoir dirigé ce travail et pour toutes les connaissances qu'elle a su me transmettre, ainsi que pour l'aide et les précieux conseils qu'elle m'a prodigués durant la réalisation de cette étude.

Je remercie monsieur M.Teguar, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail et de présider le jury. Je ne serai omettre de reconnaître sa générosité scientifique, ainsi que ses rapports humains.

Je remercie également monsieur A.Mekhaldi, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour ses conseils, ses encouragements et pour la gentillesse et la disponibilité dont il a fait preuve à mon égard, et d'avoir bien voulu examiner mon travail.

Je remercie très sincèrement monsieur S.Bouazabia, Maître de conférences à l'USTHB, en plus de l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mon travail, et pour tout l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Je remercie très sincèrement monsieur H.Moulai, Maître de conférences à l'USTHB, en plus de l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mon travail, et m'honorer de participer dans le jury.

J'exprime également ma plus grande sympathie à F.Kadri, H.Rahali, S.A. Benghezal et H.B. Hammadi qui m'ont toujours soutenu techniquement avec amitié et efficacité,

Mes sincères remerciements accompagnés de vive reconnaissance vont aux personnels de l'entreprise CABEL. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude, pour avoir mis à notre disposition les plaques isolantes (Bakélite, Press-pahn). Je remercie plus particulièrement Monsieur Zamach.

Que monsieur L.Boukezzi, Maître de conférences à l'université Ziane Achour de Djelfa, trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance, pour son aide précieuse.

Je remercie très sincèrement mes collègues de la post-graduation (PG),

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et à l'accomplissement de ce travail.

Pour finir, un grand merci à Elbar, M'hamdi, Senoussi...

# *Dédicaces*

**A mes très chers parents**

**A ma très chère femme**

**A mes adorables filles**

**A mes frères et sœurs**

**A tous mes amis qui m'aiment et qui m'apprécient**



# **SOMMAIRE**

## Sommaire

Introduction Générale .....	1
<b>Claquage des Diélectriques Liquides</b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2. Rôle des diélectriques liquides .....	4
I.2.1. Fonction transfert de chaleur : .....	4
I.2.2. Fonction diélectrique : .....	4
I.2.3 Fonction isolation au sens strict.....	4
I.2.4 Fonction de résistance à l'incendie .....	4
I.2.5 Fonction de lubrification .....	4
I.3 Catégories de liquides isolants.....	5
I.3.1 Liquides de synthèse.....	5
I.3.2 Huiles végétales .....	5
I.3.3 Huiles minérales .....	5
I.4 Principales causes d'altération des propriétés diélectriques .....	6
I.4.1 L'humidité et l'oxygène.....	6
I.4.2 La température .....	6
I.4.3 Pollutions .....	7
I.4.4 Les décharges partielles .....	7
I.4.5 Paramètres électrogéométriques .....	7
I.4.6 Pression hydrostatique .....	7
I.5 Claquage des liquides isolants .....	8
I.5.1 Mécanisme électronique .....	8
I.5.1.1 Conduction dans les liquides diélectriques .....	8
I.5.1.1.1 Conduction volumique.....	8
I.5.1.1.2 Phénomène d'injection d'ions .....	9
I.5.1.2 Autres phénomènes de conduction .....	10
I.5.2 Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse .....	10
I.5.2.1 Mécanisme thermique.....	10
I.5.2.2 Mécanisme de cavitation .....	11
I.5.2.2.1 Cavitation d'origine électrique .....	11
I.5.2.2.2 Cavitation électrohydrodynamique.....	12
I.5.3 Mécanisme de claquage par pont.....	12
I.5.3.1 Origine des particules .....	12
I.5.3.2 Rôle des particules dans le claquage .....	13
I.6 Génération des streamers dans les diélectriques liquides .....	13
I.6.1 Phase de génération de bulles .....	13
I.7 Propagation des streamers dans les diélectriques liquides .....	15
I.7.1 Phase de propagation du streamer .....	15
I.7.1.1 Effet de la polarité et de la géométrie des électrodes .....	15
I.7.1.2 Streamers positives .....	15
I.7.1.3 Streamers négatifs.....	15
I.7.1.4 Géométrie des électrodes.....	15
I.8 Conclusion .....	16

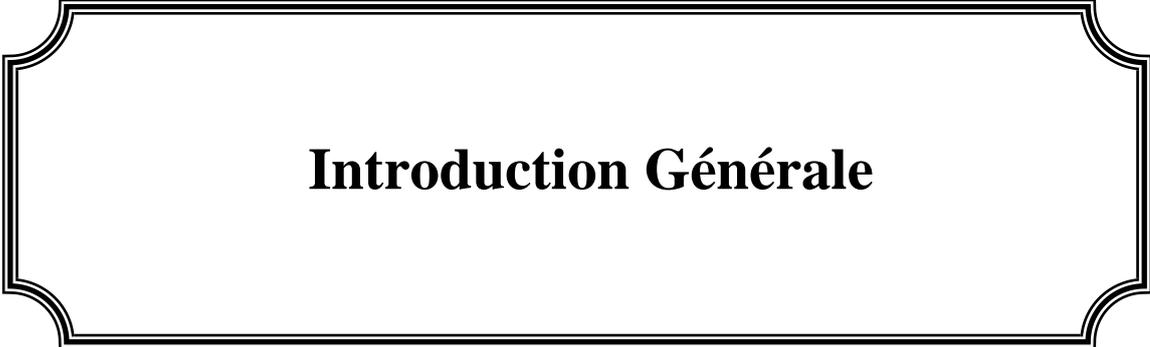
## Claquage des Diélectriques Solides

II.1 Introduction .....	18
II.2 Isolant solide non réutilisable .....	18
II.3 Différents mécanismes de claquage .....	18
II.3.1 Claquage intrinsèque .....	19
II.3.2 Claquage par avalanche « streamer » .....	19
II.3.3 Claquage électrothermique .....	19
II.3.4 Claquage électromécanique .....	20
II.3.5 Décharge arborescente .....	21
II.3.6 Claquage par décharge partielle .....	22
II.3.6.1 Comportement de la décharge partielle en fonction de la tension appliquée .....	22
II.3.6.2 Décharge partielle en continu .....	22
II.3.6.3 Décharge partielle en alternatif .....	22
II.3.6.4 Dégradation de l'isolation sous décharge partielle .....	23
II.4 Rupture après Vieillissement .....	23
II.4.1 Vieillissement thermique .....	23
II.4.2 Vieillissement Electrique .....	24
II.4.3 Contournement .....	24
II.5 Décharges glissantes aux interfaces liquide/solide .....	24
II.5.1 Propriétés de l'interface liquide/solide diélectrique .....	24
II.6 Influence des barrières dans des intervalles d'air et d'huile .....	25
II.6.1 Introduction .....	25
II. 6.2 Influence du type de tension .....	26
II.6.3 Influence de la polarité de l'électrode pointe .....	26
II.6.4 Influence des paramètres liés à la barrière .....	26
II.6.4.1 Influence de la position de la barrière .....	26
II.6.4.2 Influence de la largeur de la barrière .....	26
II.6.4.3 Influence de l'épaisseur et de la permittivité .....	26
II.6.4.4 Influence des perforations .....	27
II.6.4.5 Influence du nombre de barrières .....	27
II.6.4.6 Influence du matériau de la barrière .....	27
II.7 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'huile .....	27
II.7.1 Influence de la polarité .....	27
II.7.2 Influence de la distance inter-électrodes .....	27
II.7.3 Influence de la position de la barrière .....	27
II.7.4 Influence des dimensions de la barrière .....	28
II.7.4.1 Influence du rayon de la barrière .....	28
II.7.4.2 Influence de l'épaisseur de la barrière .....	28
II.7.4.3 Influence de la nature de la barrière .....	28
II.7.4.4 Influence des perforations .....	28
II.7.4.5 Influence du nombre de barrières .....	28
II.8 Conclusion .....	28

## Techniques Expérimentales et Résultats

III.1 Introduction .....	30
III.2 Techniques expérimentales .....	30
III.2.1 Cellule d'essais .....	30
III.2.2 Objets d'essais .....	30
III.2.3 Propriétés diélectrique des matériaux utilisés .....	32
III.2.4 Présentation de l'huile .....	32
III.2.5 Circuit d'essai du laboratoire de l'ENP .....	32
III.2.5.1 Station d'essai .....	33

III. 2.6 circuits de mesures .....	34
III. 2.6. 1 Mesure de la tension de claquage .....	34
III.2.6. 2 Mesure du courant.....	34
III.3 Résultats et commentaires.....	34
III.3.1 Essais sans barrière .....	35
III.3.1.1 Influence de la distance inter-électrodes .....	35
III.3.1.2 Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe.....	35
III.3.2 Rigidité diélectrique .....	36
III.3.3 Essais avec barrière .....	38
III.3.3.1 Influence de l'insertion de la barrière .....	38
III.3.3.2 Influence de la position de la barrière .....	40
III.3.3.3 Influence des dimensions de la barrière .....	47
III.3.3.3.1 Influence du diamètre de la barrière .....	47
III.3.3.3.2 Influence de l'épaisseur de la barrière .....	53
III.3.3.3.3 Influence de la nature de la barrière .....	63
III.4 Mesure du Courant.....	79
III.4.1 Essais sans barrière .....	79
III.4.1.1 Forme du courant .....	79
III.4.2 Caractéristiques courant-tension .....	83
III.4.3 Effet de la distance inter-électrodes .....	84
III.5 Variation de l'impédance équivalente .....	84
III.5.1 Caractéristiques impédance- tension.....	85
III.5.2 Influence de la distance inter-électrodes .....	85
III.6 Energie du système .....	86
III.6.1 Caractéristiques énergie- tension .....	86
III.6.2 Effet de la distance inter- électrodes .....	87
III.7 Essais avec barrière .....	87
III.7.1 Mesure du Courant.....	87
III.7.1.1 Forme du courant .....	87
III.7.1.2 Caractéristiques courant –tension .....	91
III.7.1.3 Effet de la distance inter-électrodes .....	91
III.8 Variation de l'impédance équivalente .....	92
III.8.1 Caractéristiques impédance-tension.....	92
III.8.2 Influence de la distance inter-électrodes .....	92
III.8.3 Influence de l'insertion de la barrière .....	93
III.8.4 Influence de la position de la barrière .....	93
III.8.5 Influence de la barrière sur l'impédance .....	100
III.9 Conclusion .....	102
Conclusion Générale.....	104

A decorative rectangular frame with a double-line border and ornate, curved corners. The text "Introduction Générale" is centered within this frame.

# **Introduction Générale**

### Introduction Générale

Les matériels électriques destinés aux réseaux de transport et de distribution sont soumis à des contraintes d'exploitation dont le concepteur doit tenir compte lors du dimensionnement des structures isolantes. Les essais et les modélisations en laboratoire constituent les premières étapes permettant de prédire et de vérifier leurs performances. Par conséquent, la conception des appareillages électriques passe par la maîtrise du comportement diélectrique dont le but est de :

- Diminuer les coûts de conception et de réalisation en limitant le nombre d'essais sur les prototypes expérimentaux,
- Réduire les délais de conception grâce à une évaluation précoce et sûre de l'influence des nouveaux choix technologiques.
- Optimiser la qualité du produit final en termes d'encombrement (éviter les surdimensionnements), de fiabilité, . . .

Dans beaucoup d'applications, les diélectriques liquides sont utilisés pour obtenir une rigidité diélectrique améliorée ou dans un but dual : à savoir l'augmentation de la rigidité diélectrique et de la dissipation thermique, comme par exemple, dans les transformateurs remplis d'huile. Cette dualité les rend incontournables dans bon nombre d'appareillages.

Durant ces dernières décennies, un grand nombre de travaux relatifs au pré-claquage a été réalisé [1, 2]. Ces travaux ont établi de façon certaine que le pré-claquage comporte deux phases successives intimement liées à savoir respectivement la génération et la propagation.

La majorité des configurations des électrodes peut être caractérisée par les géométries à champ électrique non uniforme : pointe-pointe ou pointe-plan ou par celle qui possède la rigidité diélectrique intermédiaire.

L'avantage fourni par l'utilisation des barrières isolantes dans un intervalle d'huile est l'amélioration de la rigidité diélectrique de celui-ci. Cet effet bénéfique fut remarqué dans l'air dès les années 1920 par C.P.Steinmetz [3]. L'amélioration serait due surtout à l'uniformisation du champ dans l'espace barrière - plan, due à la charge positive déposée sur la surface de la barrière en face de la pointe. Quand la barrière est à surface propre (grande résistivité superficielle) et placée près de la pointe elle entraîne une augmentation considérable de la tension disruptive. 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 [3].

A. Zouaghi a montré qu'une barrière montée perpendiculairement aux lignes du champ augmente significativement la rigidité du système [4]. 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.

L'influence de la position de la barrière dépend également des paramètres électro-géométriques du système, à savoir la distance inter-électrodes et la configuration des électrodes [4]. Les niveaux de tension de claquage 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 [4].

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 [4]. 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 [4].

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

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

Dans l'huile minérale, le nombre de barrières n'a aucune influence apparente sur la tension de claquage d'une structure divergente [4], 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 [4].

La présence d'une perforation sur la barrière dans l'huile minérale diminue significativement son efficacité et par conséquent la tenue diélectrique du système [4]. 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 [5].

L'efficacité de la barrière dépend également de sa nature, sous tension de choc, il a été observé que pour des distances  $d < 50\text{cm}$ , en polarité négative comme en polarité positive, une barrière en bakélite est plus efficace qu'une barrière en polyéthylène [4].

Il est intéressant de noter que lorsqu'on augmente la distance inter électrodes, une barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite [4].

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

L'étude du courant de pré-claquage constitue une source d'informations appréciables et permet d'éviter les tests destructifs généralement coûteux. Le courant de pré-claquage augmente avec l'augmentation de la tension de claquage et diminue avec la distance inter-électrodes. L'insertion de la barrière modifie le courant de pré-claquage, quelle que soient sa nature, sa dimension et sa position. Le courant de pré-claquage augmente malgré la variation de ses paramètres.

Le présent manuscrit est subdivisé en trois chapitres. Dans le chapitre I, un aperçu sur le rôle des diélectriques liquides, ainsi que leurs principales causes d'altération. Il est suivi d'une synthèse bibliographique des travaux majeurs réalisés sur le pré-claquage de ces derniers.

Dans le chapitre II, nous présentons le claquage des diélectriques solides, les différents mécanismes, ainsi que les facteurs influant sur la tension de claquage. Par la suite une synthèse sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et dans l'huile.

Le chapitre III est consacré à l'étude expérimentale, nous étendons nos expériences à des diélectriques liquides industriels tels que la Borak 22. Nous analyserons également l'influence de l'insertion des barrières en différentes natures et différentes dimensions sur la rigidité diélectrique et en particulier le courant de pré-claquage, l'impédance dans les systèmes avec et sans barrière.

A decorative rectangular frame with a double-line border and ornate, curved corners. The text is centered within this frame.

**Claquage des Diélectriques  
Liquides**

## I.1 Introduction

Les diélectriques liquides sont utilisés comme imprégnant de diélectriques solides et produits de remplissage de bon nombre de matériels électriques tels que : les transformateurs de puissance, de distribution, de four et de traction, les réactances, les réducteurs de mesure, les condensateurs, les câbles, les boîtes de traversées, les disjoncteurs, etc....

Ces appareils fonctionnent sous des tensions de quelques centaines de volts (V) à plusieurs centaines de kilovolts (kV). Cependant, ils présentent des pertes d'énergie allant de 1%, à 10%, de la puissance nominale provoquant des élévations de température [6].

Les huiles diélectriques sont classées, selon leur origine, en huiles minérales, huiles végétales et huiles de synthèses. Les huiles minérales sont des produits naturels obtenus directement par raffinage de bruts pétroliers. Elles sont les plus répandues en industrie d'isolation électrique en raison de leur coût de revient réduit.

## I.2. Rôle des diélectriques liquides

Les fonctions essentielles sont [6] :

### I.2.1. Fonction transfert de chaleur :

Évacuation des pertes d'énergie.

Bien que son rendement soit exceptionnellement élevé, un transformateur ne peut échapper aux pertes d'énergie qui accompagne toute conversion ; l'énergie ainsi perdue se dissipe sous forme de chaleur et conduit à l'obligation de refroidir l'appareil. En raison des pertes, les températures de chacun des éléments s'élèvent jusqu'à établissement d'un équilibre entre les vitesses de production et d'évacuation de la chaleur. La chaleur évacuée est véhiculée par circulation naturelle (convection) ou forcée du liquide diélectrique, vers les dispositifs de refroidissement. Un transfert de chaleur bien organisé-- permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation abondante et bien répartie, dont l'efficacité est influencée directement par la viscosité et la chaleur spécifique du diélectrique liquide utilisé.

### I.2.2. Fonction diélectrique :

Isolation au sens électrique.

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

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

### I.2.3 Fonction isolation au sens strict

Elle permet tout simplement de ralentir l'oxydation directe des diélectriques solides.

### I.2.4 Fonction de résistance à l'incendie

La fonction de résistance à l'incendie est caractérisée en particulier par le pouvoir d'extinction des arcs électriques, dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et des disjoncteurs.

### I.2.5 Fonction de lubrification

Enfin le pouvoir de lubrification est pris en compte dans le cas des matériels renfermant des pièces en mouvement par exemple les sélecteurs de prise, les pompes immergées, etc. . . . afin d'y faciliter les déplacements.

### I.3 Catégories de liquides isolants

#### I.3.1 Liquides de synthèse

Les liquides de synthèse sont utilisés chaque fois que les propriétés requises ne sont pas satisfaites par les huiles minérales. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu (transformateur) ou lorsque l'on recherche une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs).

Il existe quatre types principaux de liquides de synthèse [5,7, 8] :

- Les hydrocarbures aromatiques : ces liquides peuvent être classés en deux groupes les alkylbenzènes et les autres hydrocarbures aromatiques.
- Les hydrocarbures aliphatiques tels les polyoléfines, qui sont des hydrocarbures insaturés à chaîne droite ou ramifiée, possédant une double liaison en bout de chaîne.
- Les esters issus de réaction d'acides organiques et d'alcools. Ces produits offrent d'excellentes propriétés lubrifiantes et des opérabilités aux températures extrêmes.
- Les silicones : ont été proposées comme liquides de remplacement des askarels pour transformateurs. Le produit le plus communément employé est le polydiméthylsiloxanes.

Ils sont tous obtenus à partir de la pétrochimie. Des produits perfluorés ont également été proposés dans le domaine des condensateurs et des transformateurs pour certaines applications très particulières. Le coût d'accès de ces produits est de cent fois celui des huiles minérales, d'où limitation de leurs utilisations.

Les polychlorobiphényles (ou polychlorodiphényles selon la nomenclature) sont également des liquides de synthèse et ont été utilisés largement pendant une trentaine d'années. Leur persistance dans l'environnement conduit à leur bannissement ; cependant, ils sont encore présents dans certains appareils âgés. Seuls des produits biodégradables sont maintenant acceptés [7].

#### I.3.2 Huiles végétales

Utilisées depuis la nuit des temps, elles sont obtenues à partir de récolte de graines et de fruits. Elles sont traitées par pressage puis par des opérations de raffinage relativement complexes. Ce sont des esters d'acides gras et de glycérol appelés triglycérides [8].

Elles sont généralement peu toxiques et biodégradables. Ces qualités sont dues notamment à une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Ces deux caractéristiques, qui sont favorables pour l'aspect écotoxicologique, représentent un inconvénient important pour les applications électrotechniques. Par ailleurs, leur tenue diélectrique n'est pas très élevée. Pour ces raisons, les huiles végétales sont relativement peu utilisées (essentiellement dans certains types de condensateurs pour courant continu), bien que leur emploi dans les transformateurs ait été proposé [7].

#### I.3.3 Huiles minérales

L'utilisation des huiles minérales dans les matériels électriques remonte pratiquement au début de leur production industrielle. Elles ont deux fonctions principales : l'isolation électrique et le transfert thermique.

Les huiles minérales isolantes sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, substances naturelles d'origine géologique, débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau, etc.). Les pétroles sont composés d'hydrocarbures saturés paraffiniques (alcanes) et naphthéniques (cycloalcanes), qui constituent la matrice liquide fondamentale, et d'hydrocarbures aromatiques (dont des aromatiques ramifiés par des chaînes alkyles). Ils contiennent également des hydrocarbures hétérocycliques à base de soufre, d'azote et d'oxygène, dont les teneurs ne dépassent pas 10 % [5]. On les désigne sous le terme de bruts. Ils sont extraits dans toutes les régions du monde et plusieurs centaines de types différents ont été mis en évidence.

L'amélioration progressive des procédés de raffinage des bruts a abouti à l'obtention d'huiles minérales de plus en plus performantes. Ces améliorations, associées aux évolutions technologiques, ont permis de réduire progressivement les volumes d'huiles dans les appareils [5].

## I.4 Principales causes d'altération des propriétés diélectriques

Les différentes fonctions ci-dessus évoquées sont vitales pour les appareillages utilisant les diélectriques liquides. Toute défaillance d'ordre électrique, peut se traduire par un claquage dont les conséquences sont toujours graves. Aussi, tout échauffement anormal, surtout s'il est localisé, ayant pour conséquence une réduction des caractéristiques électriques, peut également conduire au claquage entraînant la fragilisation des isolants solides utilisés. D'autre part, avec les transformateurs à circulation forcée, on introduit des problèmes d'électrification statique [9].

Tous ces aspects nous conduisent aux principales causes d'altération des diélectriques liquides.

### I.4.1 L'humidité et l'oxygène

L'introduction de ces deux éléments dans les liquides diélectriques résulte essentiellement du phénomène de "respiration". L'influence de l'oxygène est surtout notable vis-à-vis des huiles minérales dont l'oxydation est un facteur de vieillissement. L'humidité a une action nocive sur la tenue de tous les liquides diélectriques (Fig. I.1), particulièrement lorsque cette humidité se trouve sous forme d'eau libre, en suspension, en émulsion ou fixée sur des particules solides (poussières en suspension ou dépôts). On note une réduction de la tension de claquage d'environ 23 % lorsqu'on passe de 20 à 68 PPM d'humidité dans l'huile [10,11].

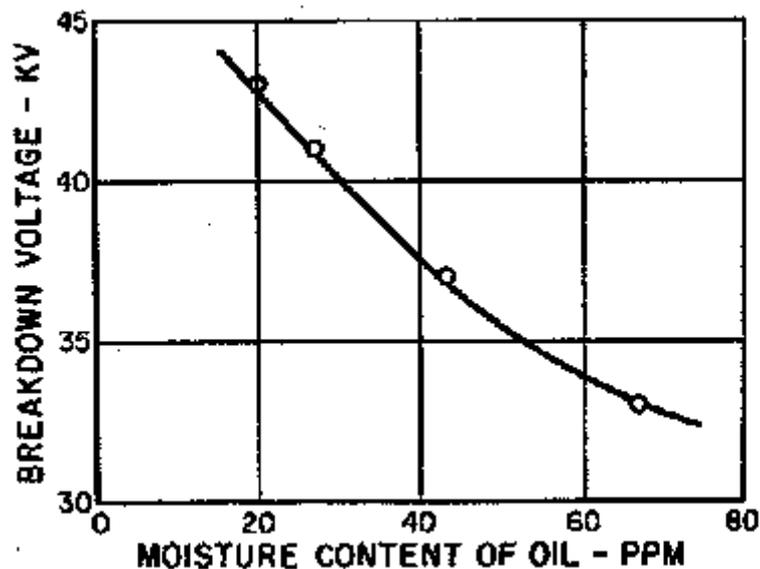


Figure (I.1): Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur. PPM [11].

De plus, si un liquide diélectrique très chargé en humidité peut encore assurer, tant bien que mal, sa fonction électrique, tant que sa température assure une solubilité suffisante, il pourra, en cas de refroidissement brutal, (rupture de charge par temps froid par exemple) être disqualifié par suite de solubilité [12].

### I.4.2 La température

L'augmentation de la température entraîne la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile [12]. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent.

Les huiles minérales sont plus sensibles à l'accélération du vieillissement provoqué par les températures élevées. On note une forte décroissance de la rigidité diélectrique de l'huile après 70°C dans le n-Hexane [13].

### I.4.3 Pollutions

Des impuretés de toute nature (poussières, graisses, etc.) peuvent être introduites dans les appareillages électriques à l'occasion de manipulations maladroites (à la fabrication ou pendant l'entretien), par exemple dans un transformateur lors d'un complément de remplissage. Enfin, il arrive notamment dans le cas des askarels, que ceux-ci en raison de leur grand pouvoir solvant, aient une action de dissolution sur les peintures, vernis et les joints, ayant pour résultat la mise en solution ou en suspension de matières étrangères au liquide diélectrique. De façon générale, un choix convenable de matériaux permet d'éviter ces inconvénients. Si des poussières ou des fibrilles, éventuellement chargées d'humidité sont entraînées par le liquide diélectrique en circulation, elles peuvent, à cause des différences entre leurs constantes diélectriques et celle du liquide environnant, être soumises à des attractions électrostatiques, s'organiser en chaîne suivant les lignes du champ électrique et conduire au claquage [14].

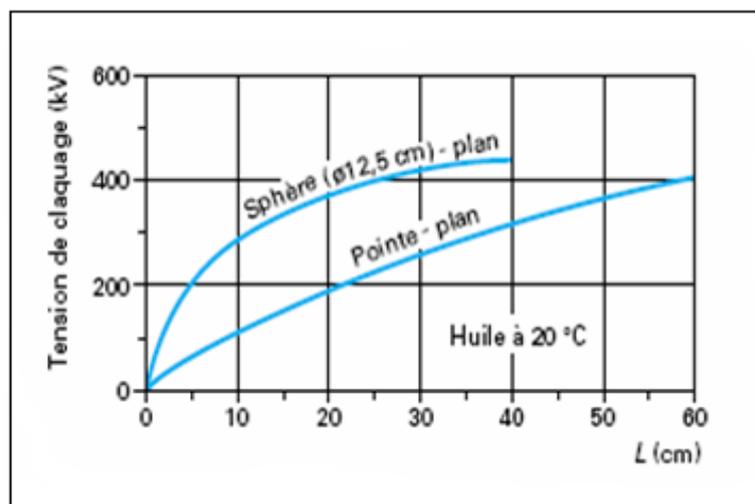
### I.4.4 Les décharges partielles

Les décharges partielles sont des micros claquages localisés qui ne traversent pas tout l'espace entre les éléments portés à des potentiels différents dans lequel serait contenu le diélectrique [14,15].

Elles se produisent dans des inclusions gazeuses. La déperdition locale d'énergie qu'elles provoquent et l'élévation de température conséquente facilitent les claquages. De plus, les ions et les électrons produits lors des décharges altèrent les matériaux.

### I.4.5 Paramètres électro-géométriques

L'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la tension de claquage [15, 16, 17] (Figure I.2). Par ailleurs la rigidité diélectrique du liquide diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes [18]. 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 pointe. 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.2) :** 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 [11]

### I.4.6 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 [19].

## I.5 Claquage des liquides isolants

Le claquage des diélectriques liquides diffère fondamentalement 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 de la matière.

Les connaissances acquises, surtout ces trois dernières décennies, n'ont pas permis d'établir une théorie unifiée capable d'expliquer le phénomène de claquage des milieux liquides dont les plus connus sont : le mécanisme de claquage électronique, basé sur un processus cumulatif d'ionisations et de collisions entre les électrons et les molécules du liquide. Le mécanisme de claquage où la phase gazeuse joue le rôle de détonateur, et le mécanisme de claquage dû à l'établissement d'un pont de particules entre les électrodes [4].

On distingue généralement le claquage électronique et le claquage thermique tout en notant que la distinction n'est pas forcément évidente car un claquage électronique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique et inversement. Un claquage thermique est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique [3].

Ces deux processus sont les principaux mécanismes qui peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides. Le troisième, peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures, en suspension dans le diélectrique liquide.

Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui concernant les huiles de transformateur soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures [3].

### I.5.1 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  $\alpha$  basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications électroniques, intervenaient dans le claquage des diélectriques liquides [3, 20, 21].

Le processus de multiplication électronique a été proposé à l'origine par Townsend, 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 [3].

#### I.5.1.1 Conduction dans les liquides diélectriques

##### I.5.1.1.1 Conduction volumique

Dans les liquides de constante diélectrique  $\epsilon_r$  inférieure à 10, les espèces électrolytiques n'ont qu'une dissociation partielle, le plus souvent extrêmement faible. En l'absence de champ électrique, il existe un équilibre entre dissociation et recombinaison [20, 21, 22]. Dans le cas le plus simple, l'espèce neutre se dissocie en ions positifs et négatifs et la recombinaison entre ces ions redonne l'espèce neutre. Cet équilibre entre dissociation et recombinaison est donné par les deux équations :



Les concentrations en espèce neutre et en ions positifs et négatifs sont respectivement  $c$ ,  $n_+$  et  $n_-$ . L'équilibre entre la dissociation et la recombinaison se traduit par la loi d'action de masse :

$$k_d \cdot c = k_r \cdot n_+ \cdot n_- = k_r \cdot n_0^2 \quad [I.1]$$

Avec  $n_+ = n_- = n_0$  car il y a électroneutralité. La conductivité du liquide,  $\sigma$  (S/m), est donnée par:

$$\sigma = K_+ \cdot e \cdot n_+ + K_- \cdot e \cdot n_- = (K_+ + K_-) \cdot e \cdot \left( \frac{k_d \cdot c}{k_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [I.2]$$

$K_+$ ,  $K_-$  Sont les mobilités des ions  $A^+$  et  $B^-$  ( $m^2 \cdot v^{-1} s^{-1}$ ) et  $k_d$  et  $k_r$  sont les constantes de vitesse de dissociation et de recombinaison. Le liquide a un comportement ohmique sous l'action d'un champ électrique alternatif assez faible de fréquence suffisamment élevée. La densité du courant  $j$  est à tout instant  $t$ :

$$\vec{j}(t) = \sigma \vec{E}(t) \quad [I.3]$$

Le comportement est plus complexe sous l'action du champ électrique continu. En conduction pure, c'est-à-dire en l'absence d'injection par les électrodes, il apparaît au voisinage de chaque électrode une couche d'hétéro charges dont l'épaisseur typique  $L$ , correspond à la distance parcourue par les ions pendant le temps de relaxation [22]:

Pour les ions positifs 
$$L_+ = K_+ \frac{U}{d} \tau$$

Pour les ions négatifs 
$$L_- = K_- \frac{U}{d} \tau$$

$U$  est la tension appliquée (V),  $d$  est la distance entre les électrodes (m) et  $\tau$  est le temps de relaxation du liquide (S) :  $\tau = \epsilon / \sigma$ . Dans le cas où les électrodes sont très dissymétriques, une des électrodes a un rayon de courbure très petit devant la distance entre les deux électrodes (configurations lame-plan, fil-plan, pointe-plan). Dans ce cas-là, les couches de charge sont d'importance très différente et la force de Coulomb (dirigée vers chaque électrode) sur chaque couche est aussi très différente, donc un écoulement du liquide peut être engendré [22]. Lorsque la tension appliquée  $U$  est suffisamment faible, on a  $(L_+ + L_-) < d$  et le comportement du système est quasi ohmique. Au contraire, pour des tensions  $U$  assez élevées telles que  $L_+ + L_- > d$ , le champ électrique déplace complètement, l'équilibre thermodynamique et la densité du courant tend vers une valeur de saturation qui correspond à la quantité d'ions créés par dissociation dans le volume du liquide par seconde.

### 1.5.1.1.2 Phénomène d'injection d'ions

Les caractéristiques courant - tension  $I(U)$  ne sont pas linéaires pour les liquides (polaires et non polaires) purs. Si le champ électrique est élevé ( $E > 10$  kV/cm), le courant ne tend pas vers une valeur de saturation, mais croît proportionnellement à  $U$  [22].

Cela provient du phénomène d'injection d'ions à partir de l'une au moins des électrodes. Tant que le champ sur l'électrode reste inférieur à 1 MV/cm, le phénomène d'injection ne résulte ni de l'émission froide d'électrons ni de phénomènes de multiplication d'électrons, mais de réactions électrochimiques à l'interface entre le liquide et le métal de l'électrode. L'injection peut avoir lieu aussi bien sur l'anode que sur la cathode. En pratique, l'injection par l'une des deux électrodes est dominante.

Cela est évident lorsque les deux électrodes ont des courbures très différentes (fil-cylindre, lame-plan, pointe-plan, etc.) engendrant des champs électriques très différents. Dans le cas de deux électrodes planes de même métal, l'espèce ionique injectée par l'une des électrodes se décharge sur l'autre électrode.

Pour une injection unipolaire (injection par une électrode seulement), par exemple dans la configuration lame-plan ou pointe-plan, on peut définir également la longueur typique qui caractérise l'épaisseur de la zone chargée par la relation :

$$L_{inj} = K \frac{U}{d} \tau \quad [I.4]$$

Si  $L_{inj} < d$ , l'homocharge est confinée dans une couche près de l'injecteur. Si, au contraire,  $L_{inj} > d$  (cas lorsque le temps de relaxation  $\tau$  est beaucoup plus grand que le temps de transit  $t_T = d^2 / (KU)$  des ions d'une électrode à l'autre) la charge d'espace occupe tout le volume. Ce dernier cas est souvent rencontré avec des liquides de faible conductivité soumis à un champ électrique important. On peut définir la situation asymptotique de l'injection unipolaire pure : cette injection provient d'une seule électrode et se produit dans un liquide parfaitement isolant. L'intensité de l'injection est caractérisée par le paramètre  $C$  qui est la valeur sans dimension de la densité volumique de la charge  $\rho_0$  au voisinage immédiat de l'injecteur :

$$C = \frac{\rho_0 \cdot d^2}{\epsilon U} \quad [I.5]$$

L'injection est considérée comme faible quand  $C < 1$  ; la charge d'espace alors ne provoque qu'une faible distorsion (de l'ordre de  $C$ ) du champ électrique harmonique. L'injection forte telle que  $C > 1$  produit une forte distorsion du champ électrique. Ce champ diminue fortement au voisinage de l'injecteur et augmente près de l'électrode collectrice [22].

### I.5.1.2 Autres phénomènes de conduction

Dans le modèle de la conduction pure dans les liquides, nous n'avons admis implicitement que  $ka = C_{te}$ . En fait, le champ électrique augmente la probabilité de dissociation et  $ka$  augmente avec  $E$ . Cet effet est remarquable quand la constante diélectrique est petite ; il y a deux conséquences :

- Dans le cas de deux électrodes planes parallèles, il y a un courant de saturation s'il n'y a pas d'injection ; ce courant de saturation est proportionnel à  $ka$ , et augmente quand la tension appliquée augmente.
- Dans le cas d'une électrode avec rayon de courbure très petit devant la distance entre les deux électrodes (configurations fil-cylindre, lame-plan, pointe-plan), l'effet de pointe apparaît clairement au voisinage de l'extrémité de l'électrode ; le champ intense produit un accroissement remarquable de la dissociation et donne un effet globalement équivalent à une injection par l'électrode acérée [22].
- Dans le cas de champs électriques très élevés, des phénomènes d'avalanches électroniques et de streamers présentent une certaine analogie avec les phénomènes dans les gaz [21, 22].

## I.5.2 Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse

Dans le liquide ultra pur 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 [21, 23]. Certains auteurs supposent que les cavités gazeuses existent à priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités [23].

### I.5.2.1 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 [21, 24].

D'après Watson et Sharbaugh, suite à une grande concentration d'ions près des électrodes, des échauffements locaux du liquide peuvent faire apparaître des bulles de vapeurs. 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 [15, 20, 21] :

$$I = AV^n \quad [I.6]$$

$A = Cste$  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 :  $W = cte E_c^n \tau$

Avec  $\tau$  : 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 :

$$W = C_p (T_b - T_a) + L_v$$

$C_p$  : 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 égalant les deux énergies ci-dessus. Ce modèle est qualitativement vérifié pour certains hydrocarbures, 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 [20, 21].

Un modèle plus élaboré et tenant compte du régime transitoire a été proposé par Kao. 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 [12]:

- 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.5.2.2 Mécanisme de cavitation

Un liquide soumis à une dépression à température constante donnera naissance à une bulle, si la pression devient inférieure à la pression du liquide [12, 25, 26].

L'application d'un champ électrique au liquide peut engendrer une dépression soit par : [26]

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

#### I.5.2.2.1 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 inter-faciales 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 [20, 21].

### I.5.2.2 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 [20, 21] :

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

En un temps  $t \cong \frac{\eta}{\varepsilon E_0^2}$

$\eta$  : Viscosité du liquide ;

$\varepsilon$  : Permittivité du liquide ;

$E_0$  : Champ sur la pointe.

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

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_{EHD}^2 \quad [I.8]$$

$\rho$  : 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.5.3 Mécanisme de 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 [27]. 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. 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 [25].

### I.5.3.1 Origine des particules

Du point de vue de leur origine, les particules de faibles dimensions présentent dans les transformateurs peuvent être classées en trois catégories [12] :

- 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 [12].

### I.5.3.2 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 [28] :

- 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.

#### a. 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 [3, 28].

#### b. 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 [3,12].

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

## I.6 Génération des streamers dans les diélectriques liquides

### I.6.1 Phase de génération de bulles

Dans un système d'électrodes pointe-plan, l'initiation du streamer est précédée par l'apparition (à la pointe) d'une perturbation de faible indice de réfraction par rapport au liquide environnant et de taille d'environ quelques micromètres. Dans des travaux antérieurs [29], il a été montré à partir d'investigations expérimentales dans différents liquides que la perturbation est de nature gazeuse quelle que soit la polarité de la pointe. En effet, le volume de la perturbation est réduit voire même annulée lorsqu'une pression modérée lui est appliquée [29, 30, 31, 32]. De plus, la perturbation est caractérisée par un premier pic de courant.

Par ailleurs, dans du cyclohexane ultra pur en géométrie pointe-plan, Kattan et al [17, 33] ont observé juste après un premier pic de courant, la formation d'une première bulle gazeuse, qui pour eux est la conséquence d'une avalanche électronique dans le liquide suivie d'une vaporisation. Ils établissent une relation entre l'énergie injectée  $W$ , la pression  $P$  appliquée au liquide et le rayon maximum  $R_m$ , de la bulle générée par :

$$R_m = K \left( \frac{W}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [I.9]$$

Où  $K$  est un coefficient qui dépend de  $P$  et des propriétés thermodynamiques du liquide selon

$$\text{l'expression: } K = \left[ \frac{3RT_{eb}}{4\pi \int_{T_{amb}}^{T_{eb}} C_p(T) dt + L_v} \right]^{\frac{1}{3}} \quad [I.10]$$

Avec:

$T_{amb}$  : Température ambiante,

$T_{eb}$  : Température d'ébullition à la pression hydrostatique appliquée,

$R$  : Constante des gaz parfaits,

$C_p(T)$  : Capacité thermique massique à pression constante,

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation à volume constant.

Dans leurs investigations, ils estiment que dans la phase gazeuse de la première bulle, les électrons peuvent être accélérés sous l'action du champ électrique et acquérir une énergie importante afin d'y favoriser les décharges et conduire à la formation de bulles successives. Watson et Sharbaugh [15] considèrent que le claquage est dû à des phénomènes d'ionisation en avalanche dans une bulle qui résulterait de la vaporisation d'une masse  $m$  de diélectrique liquide aux voisinages d'aspérités cathodiques où l'énergie  $W$  nécessaire à la vaporisation est :

$$W = m[C_p(T_b - T_o) + L_v] \tag{I.11}$$

Ils ont aussi établi une relation reliant le champ  $E$  et l'énergie  $H$ . Toute fois--, le courant est limité par la charge d'espace. Le champ de claquage  $E_c$  est lié à l'énergie  $W$  nécessaire à la vaporisation du liquide par la relation :

$$W = a.E_c^n . \tau \tag{I.12}$$

Avec  $a$  une constante.  $\tau$  : le temps de séjour du liquide dans la région de champ important.

Dans le même ordre d'idée, Kao [15] pense que les bulles peuvent apparaître dans le liquide de plusieurs façons : à partir du gaz adsorbé sur les électrodes ; par une répulsion électrostatique des charges d'espace, qui dépasserait la tension superficielle, à partir de vaporisations locales au voisinage des irrégularités des électrodes, provoquées par le champ électrique et la dissociation des molécules sous les chocs des électrons émis par la cathode.

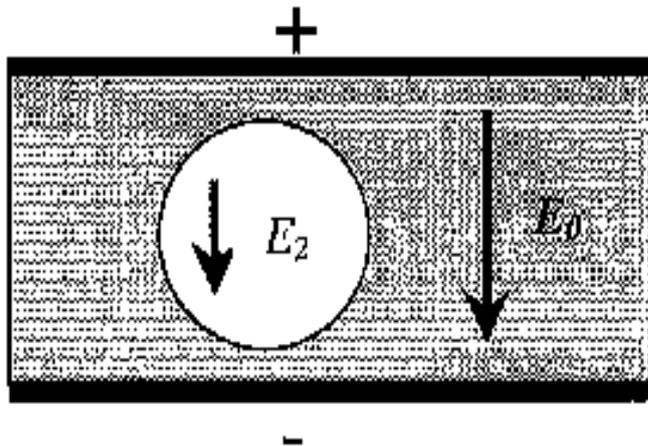


Figure (I.3): Bulle immergée dans un diélectrique liquide

L'énergie emmagasinée dans un diélectrique contenant une cavité de volume  $V$  (Fig I.3) est égale à :

$$W = \frac{1}{8\pi} \int_v (\epsilon_1 - \epsilon_2) E_2 E_0 dv \tag{I.13}$$

Où  $E_0$  est le champ appliqué,  $E_2$  le champ à l'intérieur de la bulle et  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  les constantes diélectriques du liquide et de la bulle.

## I.7 Propagation des streamers dans les diélectriques liquides

### I.7.1 Phase de propagation du streamer

Lorsqu'ils sont générés, les streamers sont caractérisés par leur faible indice de réfraction [29] par rapport à celui du diélectrique liquide. Ils se développent en progressant de façon plus ou moins ramifiée dans le milieu liquide donnant lieu à des structures diverses. Durant leur déplacement, ils produisent des pics de courant brefs et irréguliers corrélés à la lumière qu'ils émettent accompagnés d'ondes de choc [34, 35].

Par rapport à la génération, l'étude de la propagation est plus élaborée. En utilisant diverses techniques de mesure (visualisation et photographie ultra rapide, mesure électrique, optique, acoustique, par effet Kerr,...) [29], il a été possible de progresser de manière significative dans la compréhension des mécanismes qui régissent la propagation de streamer.

Selon la polarité de la tension appliquée, la géométrie des électrodes et la structure moléculaire du liquide, différentes structures de streamer peuvent être observées.

Cette structure sont associées à des vitesses: les streamers lents dits buissonneux (bush-like) émanant le plus souvent des pointes négatives et les rapides dits filamenteux (filamentary) issus des pointes positives. Cependant, si l'énergie électrique injectée dans le milieu est importante, on peut avoir des streamers négatifs filamenteux et rapides.

#### I.7.1.1 Effet de la polarité et de la géométrie des électrodes

Dans les champs électriques divergents (systèmes d'électrodes pointe-pointe, pointe-plan, pointe-sphère, sphère-sphère, sphère-plan...), les streamers évoluant dans les diélectriques liquides présentent plusieurs types de structure (ou modes) [29]. L'apparition de chaque structure est liée à la valeur du champ d'initiation [31].

#### I.7.1.2 Streamers positifs

Les streamers positifs issus de pointe anodique peuvent être classés en trois stades consécutifs: streamers primaires, secondaires et tertiaires [36]. En augmentant la tension, il se forme au début un streamer positif primaire (ou 1er mode) produisant des arborescences très intenses. Le streamer en forme de parapluie se propage à vitesse presque constante d'environ 2 à 3 km/s, le champ d'initiation étant supérieur à 2 MV/cm. Aux tensions encore plus importantes, la structure primaire conduit à la formation de streamers positifs secondaires (ou 2ème mode) avec plus d'arborescences et un champ d'initiation supérieur à 12 MV/cm. Ces streamers peuvent atteindre des vitesses de l'ordre de 32 km/s.

Aux champs très élevés, un streamer moins ramifié, souvent filamenteux, très rapide (plus de 100 km/s) dit streamer positif tertiaire (ou 3<sup>e</sup> mode) est observé.

#### I.7.1.3 Streamers négatifs

Contrairement aux streamers positifs, ceux dits négatifs présentent seulement deux types de structure (primaire et secondaire) [36]. Aux champs électriques supérieurs à 2.5 MV/cm, les streamers négatifs primaires (le 1er mode) démarrent en donnant lieu à une arborescence plus ou moins sphérique d'environ 30 à 70  $\mu\text{m}$ , celle-ci se propage à une vitesse approximative de 1 km/s, qui est inférieure de 2 à 3 fois la vitesse des streamers positifs primaires. Aux champs électriques encore plus élevés, les streamers négatifs secondaires (2<sup>e</sup> mode) apparaissent en formant une structure touffue se propageant à des vitesses de 1 à 3.5 km/s.

#### I.7.1.4 Géométrie des électrodes

La structure des streamers aussi bien que leurs caractéristiques sont très influencées par la géométrie des électrodes : espacement entre les électrodes et le rayon de courbure. Ces facteurs décident de l'initiation de différentes structures de streamers [29].

Yamashita et Yamazawa [37] ont montré le rôle que joue le rayon de courbure des pointes dans l'initiation et les structures de streamer. Par ailleurs, le rayon de courbure de la pointe influence la probabilité d'apparition des streamers filamenteux lents selon Gournay et Lesaint [31]. Pour les streamers filamenteux, au-dessus d'une tension seuil, ils établissent l'existence d'un rayon de courbure critique, à distance inter-électrode fixe, où coexistent les streamers filamenteux et buissonneux.

### **I.8 Conclusion**

Il ressort de cette analyse bibliographique, que les mécanismes de claquage et pré claquage, dans le diélectrique liquide sont très complexes. La phase de génération est l'étape initiatrice de la dégradation des diélectriques liquides soumis à un champ électrique intense. Lors de cette phase on peut regrouper les mécanismes suivants:

- Mécanismes électroniques basés sur un processus cumulatif d'ionisations et de collisions entre les électrons et les molécules créées à l'interface liquide/solide ou dans le volume du liquide.
- Mécanismes faisant intervenir un changement de phase (bulle), la phase gazeuse joue le rôle de détonateur, due à l'établissement d'un pont de particules entre les électrodes.

Ces deux mécanismes agissent simultanément, la prédominance de l'un ou l'autre dépend des propriétés physico-chimiques des liquides, du champ électrique dans l'intervalle inter-électrodes.

# **Claquage des Diélectriques Solides**

## II.1 Introduction

L'isolation solide fait partie intégrale de structures à haute tension. Les isolants solides constituent un support mécanique pour les parties conductrices et isolent en même temps les conducteurs les uns des autres. L'état solide se caractérise par sa matière condensée et un faible libre parcours moyen.

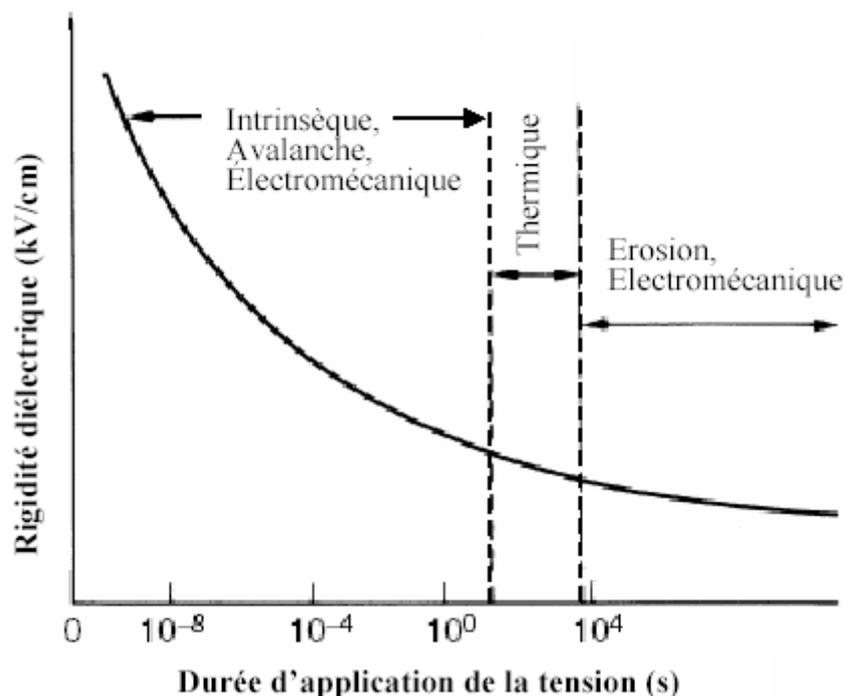
## II.2 Isolant solide non réutilisable

Le claquage dans un diélectrique peut provoquer la fusion, brûlure ou perforés le diélectrique et les électrodes. Après un claquage, une trace du claquage sous forme de perforation, de fonte ou de brûlure sur le diélectrique peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant. Si une tension est de nouveau appliquée à cet isolant, un claquage survient dans la majorité des cas, suivant le canal tracé par la décharge précédente et même à une tension inférieure. Donc un arc qui survient dans les isolants solides nécessite leur remplacement [38].

Si le claquage survient dans les isolants liquides ou gazeux, la grande mobilité des particules permet à la trace de disparaître et l'isolant est ainsi régénéré (si le claquage n'a pas eu lieu pendant une durée assez grande pour changer les propriétés intrinsèques de l'isolant). Chaque type de matériau possède une résistance au claquage différente des autres.

## II.3 Différents mécanismes de claquage

Bien que de nombreux chercheurs aient étudié le claquage des isolants solides, pendant presque un siècle, et qu'un certain nombre de chercheurs ait proposé des théories qui ont visé à expliquer quantitativement les processus de claquage, l'état de la connaissance actuelle dans ce domaine est toujours limité. En pratique, le mécanisme de claquage et la rigidité diélectrique changent avec la durée d'application de la tension. Il est d'usage de classer les mécanismes de claquage suivant la durée d'application de la tension comme montré à la figure(II.1) [38, 39, 40].



**Figure(II.1):** Variation de la rigidité diélectrique, en fonction de la durée d'application de la tension [40]

### II.3.1 Claquage intrinsèque

Ce type de claquage, appelé quelquefois "claquage électrique pur", pour le distinguer des autres types de claquage où le champ  $E$  intervient, n'est autre que la destruction de l'isolant sous l'action des forces électriques. Les processus secondaires (échauffement, réactions chimiques, etc....) qui peuvent intervenir et faciliter le claquage ne sont pas considérés dans le "claquage électrique pur". Ce type de claquage se produit sous l'action des collisions des électrons et ions accélérés par le champ électrique avec les particules de l'isolant.

Le claquage intrinsèque est accompli en une durée de formation de l'ordre de  $10^{-8}$  s, et on admet que le claquage est de nature électronique. Les valeurs de champ électrique nécessaires pour provoquer un claquage intrinsèque pur dépassent  $10^6$  V/cm. On admet généralement que la valeur critique de claquage est atteinte lorsque les électrons de l'isolant acquièrent une énergie suffisante de la part du champ appliqué pour passer de la bande de valence à la bande de conduction [4,38].

Le claquage peut se distinguer par :

- Un temps de développement du claquage court (de l'ordre de la  $\mu$ s et moins).
- Une faible dépendance de la tension  $U_c$  de la fréquence.
- Une faible dépendance de la tension  $U_c$  de la température.

Expérimentalement, la tension critique de claquage intrinsèque est rarement atteinte, mais de nombreuses tentatives ont été faites pour la mesure pour différents matériaux. Jusqu'à nos jours, il n'y a eu aucune, preuve expérimentale franche pour affirmer si le claquage observé est intrinsèque ou pas, excepté pour les matières plastiques comme le polyéthylène.

### II.3.2 Claquage par avalanche « streamer »

Dans certaines conditions contrôlées, dans les champs uniformes seulement avec les électrodes incorporées dans l'isolant, le claquage peut être accompli après le passage d'une avalanche simple, semblable à l'avalanche dans les gaz [38]. Un électron entrant dans la bande de conduction du diélectrique à la cathode dérivera vers l'anode sous l'influence du champ, gagnant l'énergie entre les collisions et la perdant après les collisions. Quel que fois, le libre parcours moyen peut être assez long pour que l'énergie cinétique acquise excède l'énergie d'ionisation qui se termine par la libération d'un électron. Le processus se répète et peut mener à la formation d'une avalanche électronique semblable au cas des gaz. Le claquage se produit si l'avalanche dépasse une certaine taille critique [3]. Le concept est semblable à la théorie de claquage "streamer" développée par Raether, Meek et Loeb pour les gaz.

### II.3.3 Claquage électrothermique

Le claquage électrothermique se développe comme suit : un diélectrique soumis à une tension libre de la chaleur, la température du diélectrique augmente et les pertes croient encore plus. Le processus s'intensifie jusqu'à ce que l'échauffement soit tel que l'isolant est endommagé (Fondu, brûlé, percé avec des fissures...). Le claquage dépend de la nature de l'isolant et des conditions environnantes, et se produit à des valeurs de tensions relativement faibles. Si le facteur de pertes  $\tan \delta$  (en courant alternatif) et la conductivité (en courant continu) sont faibles et leur augmentation en fonction de la température également faible, tandis que la conductivité thermique est élevée (qui aide à dégager la chaleur et à installer un équilibre stable entre l'échauffement et le dégagement de la chaleur), le claquage thermique devient difficile et l'isolant peut fonctionner pendant longtemps [38].

La comparaison entre les claquages électrique et thermique s'arrête dès que le claquage se produit. La différence par la suite ne s'explique que par le type de matériau diélectrique et de la nature de la source.

D'autre part, généralement le claquage thermique se produit dans la région au centre des électrodes là où le refroidissement est difficile, tandis que le claquage électrique se produit dans les parties pointues des électrodes dans les régions à champ  $E$  condensé (rebords, défauts de fabrication du diélectrique...). Il est également possible d'assister à une transition claquage électrique-claquage thermique et vice-versa.

En règle générale, l'augmentation de l'épaisseur du diélectrique ne se traduit pas proportionnellement par l'accroissement de la tension de claquage. Dans le cas d'un claquage thermique, cela est expliqué par la difficulté d'évacuation de la chaleur pour les grandes épaisseurs.

Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en tension continue. Le courant passant à travers un isolant en tension continue est également constant et est appelé courant résiduel.

En tension alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif. Quand un isolant est chauffé, dans un premier temps la résistance augmente suite à l'élimination de toute trace d'humidité. Après que l'isolant soit tout à fait sec, la résistivité commence alors à diminuer. Il n'est pas nécessaire que la totalité du volume soit chauffé, il suffit qu'une petite partie soit altérée là où l'échauffement est intense [38].

La rigidité diélectrique dépend considérablement de :

- La fréquence du réseau : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la fréquence.
- La température : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la température.
- La durée d'application de la tension: en tension alternative les pertes sont beaucoup plus grandes qu'en tension continue. Par conséquent, la tension de claquage thermique est généralement plus faible pour les champs alternatifs, et elle diminue avec l'augmentation de la fréquence de la tension appliquée.

### II.3.4 Claquage électromécanique

Les substances qui peuvent sensiblement se déformer sans rupture peuvent claquer quand les forces électrostatiques de compression appliquées à l'isolant en essai excèdent sa résistance mécanique à la pression [38]. Les forces de compression résultent de l'attraction électrostatique entre les charges externes qui apparaissent quand la tension est appliquée. La pression exercée peut être de plusieurs  $kN/m^2$ , quand le champ atteint environ  $10^6$  V/cm [39].

Quand un champ électrique est appliqué à un diélectrique entre deux électrodes, une force mécanique sera exercée sur le diélectrique dû à la force d'attraction entre les charges de surface. Cette compression diminue l'épaisseur du diélectrique en augmentant l'effort efficace.

La force de compression est donnée par la relation suivante [40, 41] :

$$P_c = \frac{1}{2} D.E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{V^2}{d^2}$$

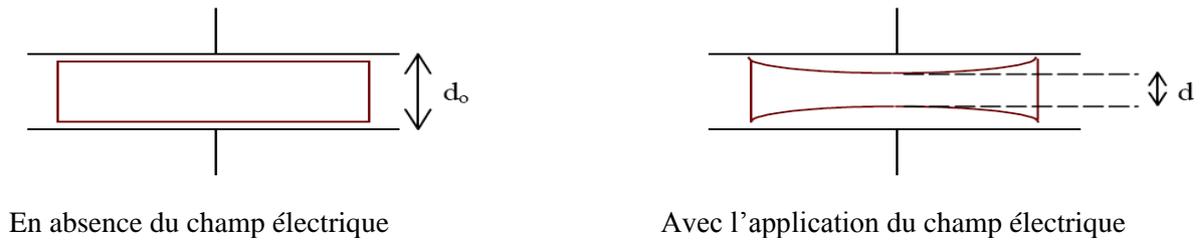
En différenciant en ce qui concerne  $d$ , le système devient instable quand  $d < 0.6.d_0$ .

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 :

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

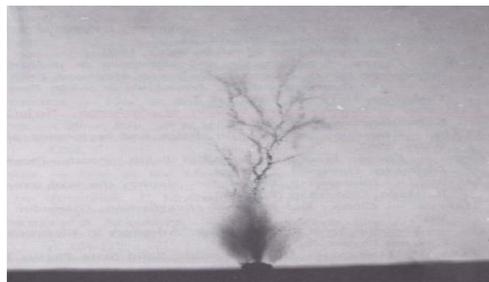
avec  $V$ : la tension appliquée;  $Y$ : module de Young;  $\varepsilon_0$ : la constante diélectrique de l'air;  $\varepsilon_r$ : la constante diélectrique relative du diélectrique;  $d_0$ : Epaisseur initiale de l'isolant.



**Figure(II.2):** Processus de rupture électromécanique [39]

### II.3.5 Décharge arborescente

L'arborescence est un phénomène de pré claquage électrique, qui se présente sous forme d'arbre (figure ci-dessous), et dont le développement est favorisé par la présence de défauts, ou d'impuretés au sein du matériau [42, 43, 44].



**Figure (II.3) :** Arborescence électrique observée dans un câble HT [39]

L'arborescence peut être révélatrice d'un stade relativement avancé de la dégradation du matériau, et reste considérée comme un phénomène précurseur de la rupture.

Les arborescences sont classées en deux principales catégories:

- les arborescences électriques
- les arborescences d'eau.

D'autres types particuliers d'arborescences peuvent être aussi observés telles que les arborescences appelées "chimiques".

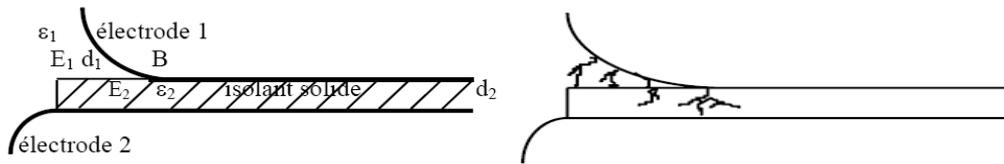
Ces décharges sont surtout provoquées par les décharges apparaissant aux bords des électrodes, où le matériau isolant solide est en contact avec un autre matériau de permittivité généralement inférieure à la sienne (liquide ou gaz).

Dans le cas du système présenté à la figure II.4, le champ  $E_1$  dans le milieu 1 est donné par la formule suivante:

$$E_1 = U_1 / [\varepsilon_1 (d_1 / \varepsilon_1 + d_2 / \varepsilon_2)] \quad \text{[II.2]}$$

- $E_1$  : le champ dans le milieu 1 ;
- $\varepsilon_1$  : la permittivité du milieu 1 ;
- $\varepsilon_2$  : la permittivité du milieu 2 ;
- $d_1$  : l'épaisseur moyenne du milieu 1;

$d_2$  : l'épaisseur du milieu 2.



**Figure (II.4) :** La rupture par arborescence [39]

Quand  $d_1$  diminue, le champ  $E_1$  augmente, et devient maximum au point B. Ce champ peut atteindre des niveaux relativement grands (environ 10MV/cm) qui risquent de dépasser la valeur correspondante à la rigidité intrinsèque du matériau. Nous aurons dans ce cas une rupture locale suivie de la formation de plusieurs canaux en branches conduisant à la rupture totale de l'isolant solide.

### II.3.6 Claquage par décharge partielle

Les isolants habituellement utilisés en haute tension ne sont jamais parfaitement homogènes. Il existe dans le matériau des cavités de formes et dimensions diverses. Elles sont la cause principale de vieillissement et de destruction des isolations solides à moyen et à long terme [39]. La mesure des décharges partielles est considérée comme un outil très important pour perfectionner la fiabilité des systèmes d'isolation en Haute Tension. L'interprétation et l'analyse des grandeurs mesurées constituent la clé pour estimer le risque de défaillance de cette isolation.

Quel que soit le mécanisme de détérioration, il en résulte une érosion lente de l'isolant et une réduction considérable de la tension critique de claquage.

#### II.3.6.1 Comportement de la décharge partielle en fonction de la tension appliquée

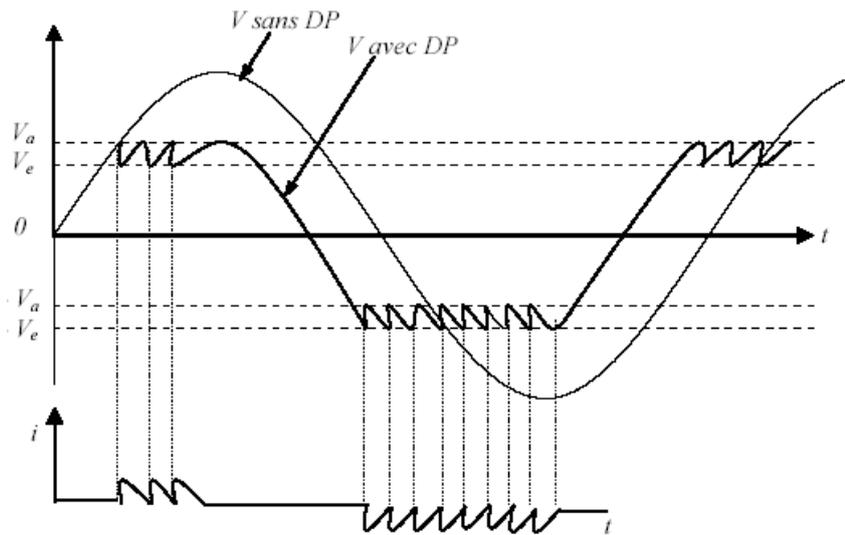
Lorsqu'une décharge se produit dans la cavité gazeuse, les charges (ions et électrons) sont entraînées par le champ électrique et se déposent sur les parois isolantes et y restent fixées. Ces charges créent un champ antagoniste au champ appliqué qui entraîne l'extinction de la décharge. La succession des décharges est différente selon que la tension appliquée est continue ou alternative [42].

#### II.3.6.2 Décharge partielle en continu

Le champ dans la cavité  $E_{cav}$  reste maintenu car les charges ne peuvent disparaître que par neutralisation due à la conduction dans l'isolant. Comme la conduction est très faible, la fréquence d'apparition des décharges partielles reste très faible, d'où la faible dégradation des isolants par les DP sous tension continue. C'est la raison de l'excellente tenue des isolants en tension continue [42].

#### II.3.6.3 Décharge partielle en alternatif

En tension alternative, le champ dans la cavité  $E_{cav}$  opposé au champ appliqué pendant l'alternance positive va au contraire renforcer le champ appliqué dans l'alternance négative, car ils auront le même sens (Fig II.5). Par conséquent, tant que la tension appliquée persiste et reste suffisamment élevée, les DP ne cesseront pas. Si la tension appliquée continue à croître après amorçage de la 1<sup>ère</sup> DP à la tension  $V_a$ , la tension dans la cavité après avoir chuté à la valeur d'extinction  $V_e$ , croît parallèlement à la tension appliquée  $V$ . Une 2<sup>ème</sup> puis une 3<sup>ème</sup> DP peut avoir lieu. Dans la partie descendante de l'alternance, les DP cessent. Dès que la tension dans la cavité atteint de nouveau la valeur  $V_a$  dans l'alternance négative (en valeur absolue), une nouvelle rafale de DP se produit. Ensuite le phénomène se répète cycliquement [42].



Figure(II.5): Schéma de succession de DP sous tension alternative [43]

### II.3.6.4 Dégradation de l'isolation sous décharge partielle

Les décharges apparaissent soit à la surface de l'isolant solide, soit dans des inclusions gazeuses ou liquides dans le volume du matériau. L'action des DP sur le matériau se manifeste par :

- Erosion : L'usure mécanique du matériau dans le temps qui conduit à la formation des trous et craquelures et parfois à la décroissance de l'épaisseur de l'isolant.
- Effets chimiques : Les décharges partielles peuvent conduire à l'oxydation du matériau, à sa réticulation ou à une coupure de chaînes. Les effets cumulés des décharges partielles entraînent la formation d'arborences (défauts générés dans les isolants sous forme d'arbuste), l'élévation du niveau des pertes diélectriques et donc l'échauffement du matériau [42].

## II.4 Rupture après Vieillessement

Le vieillissement est caractérisé par une altération partielle des propriétés diélectriques de ces isolants [39].

Les principaux types de vieillissement sont:

- le vieillissement thermique: provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique
- le vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles): résultant des décharges dans les espaces, surtout gazeux, enfermés dans les diélectriques.

Les vieillissements sont caractérisés surtout par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques (par exemple: augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité). Très souvent différents mécanismes apparaissent en même temps et influent mutuellement l'un sur l'autre.

### II.4.1 Vieillessement thermique

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. D'après J.Fabre [39], les principaux processus de vieillissement thermique sont:

- La rupture de chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques.
- le dégagement de gaz à faible poids moléculaire.
- l'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques.

### II.4.2 Vieillissement Electrique

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée. Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau.

La dégradation est particulièrement accentuée par la présence d'impuretés de différentes natures, plus particulièrement des vacuoles de gaz au sein du diélectrique. Ces impuretés sont en général le siège de décharges partielles qui peuvent engendrer après un temps relativement long l'érosion du matériau et finalement la rupture diélectrique [39].

### II.4.3 Contournement

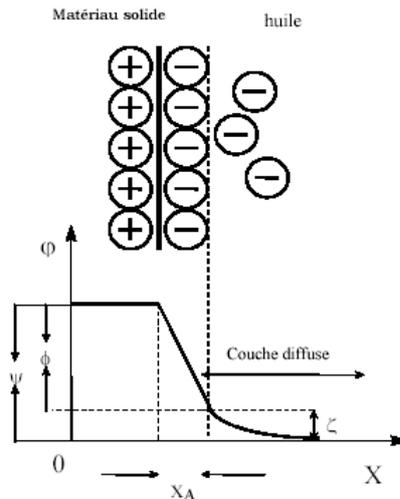
Il est évident que la rigidité diélectrique des isolants solides est beaucoup plus grande que celle des isolants liquides et gazeux. Par conséquent, il peut se produire une décharge superficielle plutôt qu'une perforation dans le cas des systèmes stratifiés. Le contournement correspond à la disruption du système le long de la surface de séparation entre les deux milieux (solide-gaz ou solide-liquide) [38].

## II.5 Décharges glissantes aux interfaces liquide/solide

Lorsque l'épaisseur du solide est assez grande pour empêcher une perforation en volume ou lorsque ce dernier est utilisé comme barrière dans un intervalle de liquide, 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 [45].

### II.5.1 Propriétés de l'interface liquide/solide diélectrique

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 [46, 47, 48]; il a été amélioré par Gouy et Chapman en 1910 et plus tard par Stern [49]. Dans ces modèles, on suppose 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. II.6). Cependant, ces modèles considèrent 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(II.6):** Schéma de la double couche selon le modèle de Stern [47]

## II.6 Influence des barrières dans des intervalles d'air et d'huile

### II.6.1 Introduction

L'influence des barrières isolantes dans l'air a été remarquée par C.P Steinmetz vers 1920 [50]. Il a constaté l'augmentation de la tension disruptive de l'air entre deux électrodes sphériques, séparées par une barrière. La présence d'un écran isolant transforme l'intervalle d'air initial en un système stratifié (air –barrière). Les ions dans le cas d'une décharge positive sont alors freinés par la barrière en se répartissant sur sa surface, provoquant la déformation du champ électrique et engendrant ainsi une nette augmentation de la tension disruptive du système. D'après les études qui ont été faites, cet emploi doit tenir compte de plusieurs paramètres dont les plus importants sont: la polarité et le genre de tension appliquée, les paramètres de configuration de l'intervalle (longueur de l'intervalle, nombre de barrières, position de la barrière) et les paramètres concernant la barrière elle-même (son matériau, sa forme, ses dimensions...etc.) [51, 52]

Marx montra en 1930 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 $\mu$ 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 [53].

**H. Roser** a été le premier à étudier l'influence des barrières de différentes permittivités au choc de foudre, en tension alternative et continue, pour divers systèmes d'électrodes. La charge d'espace positive qui se dépose à la surface de la barrière tend à uniformiser le champ entre la barrière et le plan. Ceci engendre l'augmentation de la tension. Par contre avec une pointe négative, il peut y avoir une réduction de la tension de décharge disruptive. Dans le cas des barrières poreuses et compactes trouées, il a constaté qu'elles n'entraînent aucune amélioration [54].

**M.P.Verma** a travaillé sur les chocs de foudre positifs des intervalles d'air pointe-barrière-plan, de 4 à 14cm. Les caractéristiques tension–distance inter-électrodes obtenues présentent des pentes comprises entre 5 et 30kV/cm, selon la position de la barrière [55].

**J.Pilling** a étudié l'influence des barrières, en tension alternative des intervalles d'air 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 [56].

Une étude a été réalisé par M.Awad sur le comportement de barrières polluées dans des intervalles pointe-pointe de longueur inférieure à 12 cm pour des tensions de choc de manœuvres 23/2300 $\mu$ s [57], 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 $\mu$ S dans le cas ou la surface polluée est en face de la pointe HT.

Les travaux réalisés par A.Boubakeur sur les intervalles pointe-plan de 40 à 200cm, en tension de chocs de foudre et de manœuvres positive et en tension alternative à fréquence industrielle, ont montré que la barrière joue un rôle d'obstacle géométrique provoquant l'augmentation de la tension, quand la barrière est proche de la pointe aux environ de 20% de la distance pointe-plan. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge disruptive [51, 58].

## II. 6.2 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 [47, 50, 59].

### II.6.3 Influence de la polarité de l'électrode pointe

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 [50].

### II.6.4 Influence des paramètres liés à la barrière

#### II.6.4.1 Influence de la position de la barrière

La tension disruptive des petits intervalles d'air allant jusqu'à 40 cm varie essentiellement en fonction de la position de la barrière. Cette tension passe par un maximum quand la barrière est près de la pointe [58]. Certain travaux [50, 51, 59] ont montré que pour des intervalles d'air de 15 à 30cm, le maximum de tension est obtenu lorsque la barrière est colée à la pointe. Ce résultat est valable dans le cas où la largeur de la barrière n'excède pas 50cm. Pour les moyens intervalles d'air de 40cm à 200cm, l'introduction d'une barrière isolante à surfaces propres conduit à une augmentation considérable de la tension disruptive du système quand elle est située particulièrement à 20% de l'intervalle à partir de la pointe. et dans les intervalles d'huile [4, 69].

#### II.6.4.2 Influence de la largeur de la barrière

Quand la largeur de la barrière n'est pas suffisamment grande par rapport à la distance inter-électrodes, la rigidité diélectrique de l'arrangement (pointe-barrière-plan) dépend de la longueur du canal de décharge. Géométriquement, cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière-plan. L'augmentation maximale de la tension disruptive, dans ce cas, est obtenue quand la barrière est pratiquement en contact avec l'électrode pointe [59]. Les types des décharges dépendent essentiellement de la distance entre électrodes et de la largeur de la barrière.

#### II.6.4.3 Influence de l'épaisseur et de la permittivité

Ces deux paramètres ont une influence sur la distribution des porteurs positifs et sur la chute de tension sur la surface de la barrière. Quand ces deux paramètres auront des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, mais l'influence de ces paramètres est beaucoup moins importante par comparaison à l'effet de la largeur et de la position de la barrière [4,50, 59, 69].

### II.6.4.4 Influence des perforations

A. Boubakeur [59] a travaillé avec des barrières trouées en leur centre. Il a remarqué que la barrière a un rôle d'obstacle géométrique au développement direct de la décharge et que la charge d'espace sur la barrière joue le rôle d'obstacle électrostatique. En effet, la décharge ne tend pas à passer par un trou de faible diamètre ( $\varphi < 20\text{mm}$ ), probablement à cause de la forte concentration de la charge d'espace au centre de la barrière. Ainsi la décharge contourne la barrière au lieu de suivre le plus court chemin, passant par le trou.

### II.6.4.5 Influence du nombre de barrières

Les études montrent que l'influence du nombre de barrières dépend de la géométrie des électrodes [60]. Dans une configuration pointe-pointe la tenue diélectrique de la structure avec deux barrières est augmentée parfois de 35% par rapport à celle avec une seule barrière, cependant dans un arrangement pointe-plan l'influence du nombre est insignifiante.

### III.6.4.6 Influence du matériau de la barrière

M. V. Sokolova [61] a effectué des mesures des courants de décharges pour des intervalles d'air avec différents matériaux de la barrière. L'analyse des oscillogrammes a montré que chaque impulsion de courant a une structure complexe avec un caractère irrégulier. Ceci reflète le processus de décharge, la décharge se fait sous forme de micro impulsions consécutives. Les deux matériaux utilisés ont la même épaisseur et la même permittivité, mais ils produisent des effets différents sur la rigidité diélectrique de l'intervalle.

D'autres auteurs [50] 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 ( $\epsilon_r \text{ verre} > \epsilon_r \text{ plexiglas}$ ).

## II.7 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'huile

### II.7.1 Influence de la polarité

A. Zouaghi a montré qu'un système d'électrode pointe-plan avec ( $d=50\text{mm}$ ), est moins rigide en polarité négative qu'en polarité positive. La présence de la barrière améliore la tenue diélectrique de la structure quelle que soit la polarité. La tension de claquage dépend surtout de la position de la barrière dans l'intervalle [4].

### II.7.2 Influence de la distance inter-électrodes

Dans les grands intervalles ( $a=100\text{cm}$ ), l'influence de la barrière est négligeable lorsqu'elle est placée au voisinage de l'électrode plane. Quelle que soit la polarité de la tension appliquée, et la nature de la barrière. La tension de claquage est plus importante au voisinage de l'électrode acérée [4, 69].

### II.7.3 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 et la configuration des électrodes. Les niveaux de tension de claquage 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 [4].

## II.7.4 Influence des dimensions de la barrière

### II.7.4.1 Influence du rayon de la barrière

L'augmentation du rayon de la barrière améliore significativement la rigidité du système (de 1.25 à 1.5 selon la polarité), pour deux barrières de même nature (bakélite) et même épaisseur ( $e=2\text{mm}$ ) mais de rayon deux fois plus grand, avec une distance inter-électrodes constante ( $a=50\text{mm}$ ) [4].

### II.7.4.2 Influence de l'épaisseur de la barrière

L'augmentation de l'épaisseur d'une barrière en bakélite 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 [4].

### II.7.4.3 Influence de la nature de la barrière

En polarité positive, une barrière en bakélite est plus efficace qu'une barrière en polyéthylène. Mais lorsque la distance inter-électrodes augmente, la barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite. La différence entre eux réside, en plus des valeurs de leurs permittivités et des pertes diélectriques, dans la résistance mécanique de chocs de chaque matériau [4].

### II.7.4.4 Influence des perforations

Lorsque la barrière se trouve au voisinage de l'électrode acérée, la probabilité du passage de la décharge à travers l'ouverture est plus grande, elle devient faible lorsqu'on s'approche de l'électrode plane. Il apparaît que l'influence des perforations est d'autant plus marquée pour les petits intervalles que pour les grands intervalles [4].

### II.7.4.5 Influence du nombre de barrières

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 [4].

## II.8 Conclusion

Les barrières isolantes ont des propriétés différentes l'une par rapport à l'autre. Selon les paramètres (La rigidité diélectrique, la permittivité ainsi que les décharges partielles). L'amélioration de la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan avec barrière dépend des paramètres concernant la barrière (Matériau, dépôt de charge, forme, permittivité, nombre des barrières, présences des perforations et dimensions).

La position optimale de la barrière correspond à 20% de l'intervalle inter-électrodes. L'évolution de la décharge peut être directe ou par étapes selon la position de la barrière. L'introduction d'une barrière dans un intervalle pointe-plan, augmente la rigidité diélectrique du système, en modifiant la distribution du champ électrique dans l'intervalle. Elle est fonction de plusieurs paramètres: position, épaisseur et permittivité.

Nous pouvons conclure aussi que quelles que soient la nature, les dimensions, et la position de la barrière dans l'intervalle inter électrodes, une barrière montée perpendiculairement aux lignes du champ augmente significativement la rigidité du système, car la barrière joue le rôle d'obstacle géométrique à la décharge disruptive.

A decorative rectangular frame with a double-line border and ornate, curved corners. The text is centered within this frame.

**Techniques Expérimentales et  
Résultats**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude de la tension de claquage, des courants de pré-claquage et de l'impédance, dans un système pointe-plan avec et sans barrière sous tension alternative. Nous présentons tout d'abord les différents éléments et dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que les caractéristiques des échantillons solides et liquides isolants considérés. Nous présentons les différentes figures de tension de claquage qui ont été relevées au cours de notre étude expérimentale, ainsi que les paramètres qui peuvent influencer la valeur de cette tension, telles que: la nature, l'épaisseur et la dimension des solides isolants utilisés.

Les courants de pré claquage avec barrière, enregistrés sont présentés et comparés avec ceux sans barrière.

### III.2 Techniques expérimentales

#### III.2.1 Cellule d'essais

La cellule d'essais est une cuve en plexiglas, de 50 cm de longueur, 50 cm de largeur et 70 cm de hauteur. Ses parois transparentes sont d'épaisseur 1.5cm, servant à la visualisation des phénomènes de claquage et de pré claquage. La cellule contient 175 L d'huile de transformateur et un système d'électrode pointe-plan, monté horizontalement dans la cuve. Cette dernière est posée sur une table en bois à 80.6 cm du sol (Figures III.1 et III.2).

Le système d'électrodes est constitué d'une pointe et d'un plan. L'électrode pointe de forme conique est en laiton de différents rayons de courbures (1, 2, 3, 4, 5 et 6mm), l'utilisation du laiton permet d'effectuer un très grand nombre d'essais sans trop éroder la tête de la pointe. Elle est montée sur une tige mobile en acier.

L'électrode plane est un disque en acier de 35cm de diamètre. La distance inter-électrodes est ajustable; et peut varier de 0 jusqu'à 12 cm.

#### III.2.2 Objets d'essais

Les barrières utilisées pour l'expérimentation sont de forme circulaire et de diamètre variable. Elles sont maintenues verticalement entre les électrodes par des fils isolants (fig.III.3).

Celles-ci sont issues de deux types de matériaux : la bakélite et le press-pahn. Les barrières ont pour épaisseur respectivement 2 et 4mm. Leur état de surface est contrôlé après chaque claquage. Elles sont changées dans le cas d'une perforation.



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

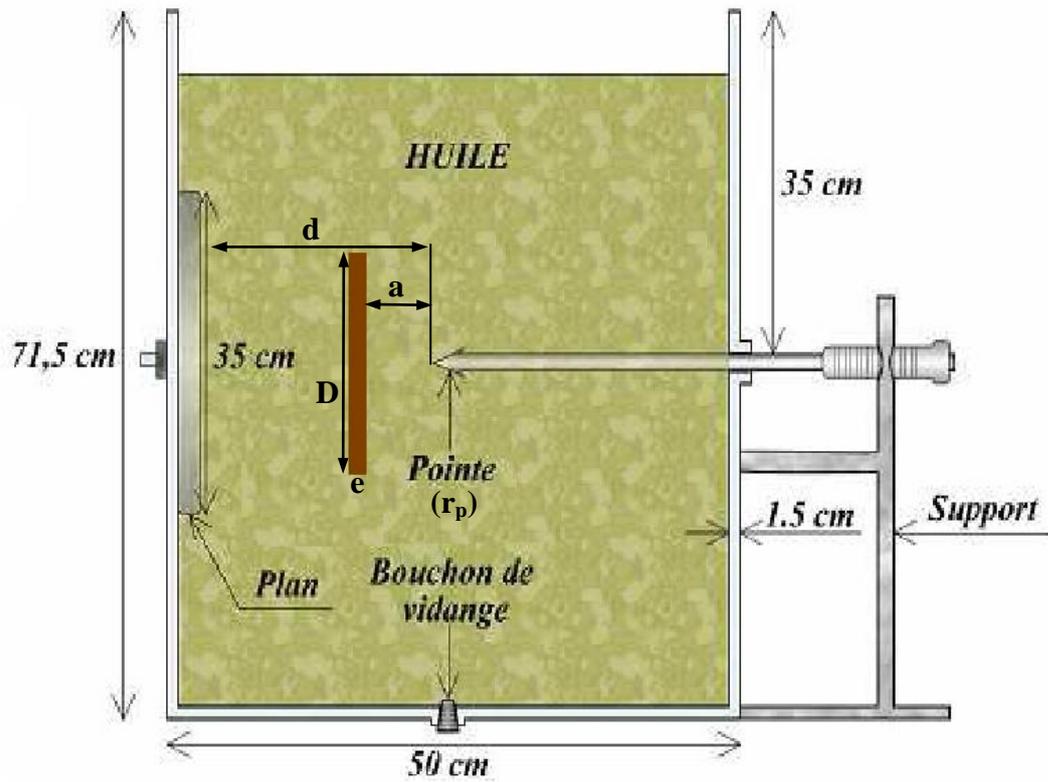


Figure (III.2) : Schéma de la cellule d'essais

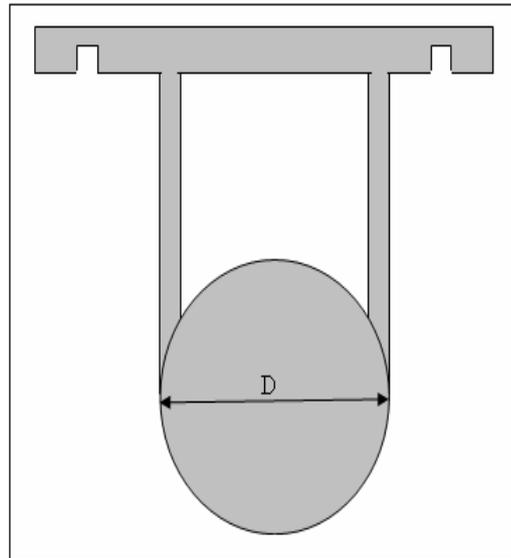


Figure (III.3) : Forme de la barrière utilisée

### III.2.3 Propriétés diélectrique des matériaux utilisés

Les barrières isolantes sont bien nettoyées avec de l'alcool propyléque puis insérées entre les électrodes. Les différents paramètres sont donnés dans le tableau (III.1)

Matériaux Isolants	Permittivité relative	Rigidité diélectrique (kV/mm)	Epaisseurs (mm)	Diamètres (cm)	Nbr de barrières
Press-pahn	3	25	2	10	12
				14	13
				20	13
			4	10	18
				14	15
				20	12
Bakélite	5	30	2	10	5
				14	5
				20	5
			4	10	5
				14	5
				20	5
L'huile minérale	2,12	9,4	-	-	-

Tableau (III.1)

### III.2.4 Présentation de l'huile

Le liquide utilisé dénommé « Borak 22 », est une huile minérale, de type naphénique de permittivité ( $\epsilon_r = 2.12$ ), les propriétés physiques sont présentées dans le tableau (III.1). Celle ci obéit à des conditions de stockage rigoureuses dans des fûts étanches, en vu de sa protection de la dégradation et de l'humidité.

### III.2.5 Circuit d'essai du laboratoire de l'ENP

Le dispositif expérimentale est constitué d'une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque HEAFELY, comporte un transformateur d'essai 300kV- 50 Hz, un transformateur de réglage, un diviseur capacitif de tension, un pupitre de commande et un dispositif de protection. (Figure III.4).

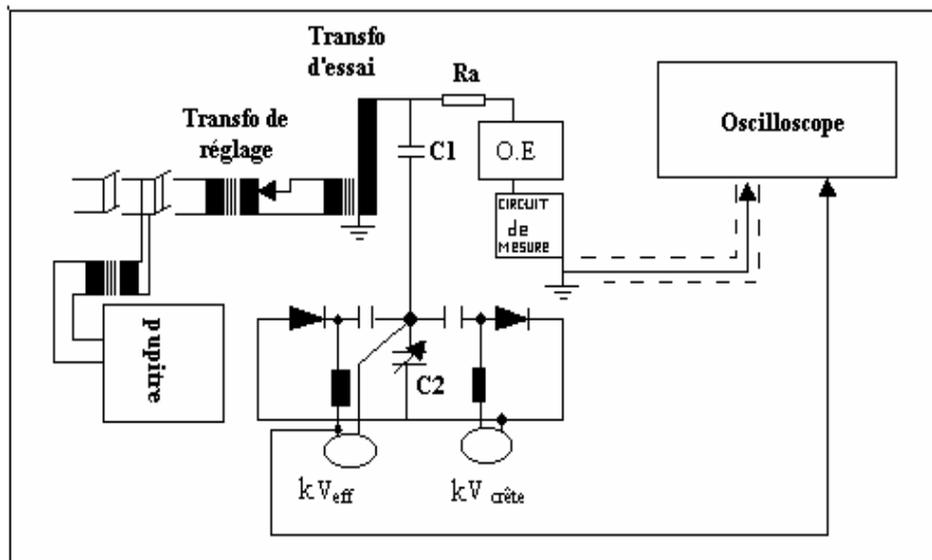


Figure (III.4) : Dispositif expérimentale

### III.2.5.1 Station d'essai

Cette station d'essais comprend les organes suivants :

#### ❖ Un transformateur de réglage

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), soit à l'aide d'un moteur dont le fonctionnement est commandé à partir du pupitre. Ses caractéristiques sont :

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

#### ❖ Un transformateur d'essais

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

- Tension primaire  $U_{1n} = 0.5 \text{ kV}$  (50Hz).
- Tension secondaire nominale :  $U_n = 300 \text{ kV}$ .
- Puissance apparente nominale :  $S_n = 50 \text{ kVA}$ .
- Tension de court-circuit :  $U_{cc} = 5.46 \%$ .
- Résistance d'amortissement:  $R_a \cong 30 \text{ } \Omega/\text{kV}$  de la tension d'essais, la résistance de l'enroulement BT :  $r_1 = 0.0365 \Omega$  , celle de l'enroulement HT =  $4893 \Omega$ .

#### ❖ Un diviseur capacitif de tension

Il est alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés sur le pupitre de commande. Le diviseur capacitif est formé d'une capacité 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 tension et d'un galvanomètre échelonné en  $\text{kV}_{\text{max}}$  permettant la lecture de la valeur crête de la tension.

#### ❖ Un pupitre de commande

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

### ❖ Des appareils annexes de protection

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire à l'extérieur de la plate-forme d'essai ayant effet cage de Faraday. Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250 A. Ces protections sont liées au circuit de la bobine du contacteur principal. La protection est suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

## III. 2.6 circuits de mesures

### III. 2.6. 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 efficace. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'impact de la configuration du modèle sur la tension de claquage, mais aussi de déterminer les paliers des tensions à appliquer, pour l'enregistrement du courant. La tension de claquage est déterminée sur une moyenne de six mesures pour chaque essai [62]

### III.2.6. 2 Mesure du courant

Le courant est mesuré à travers une résistance  $R$  de  $1k\Omega$ , non inductive, connectée entre l'électrode plane et la terre comme le montre la figure (III.5). 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.

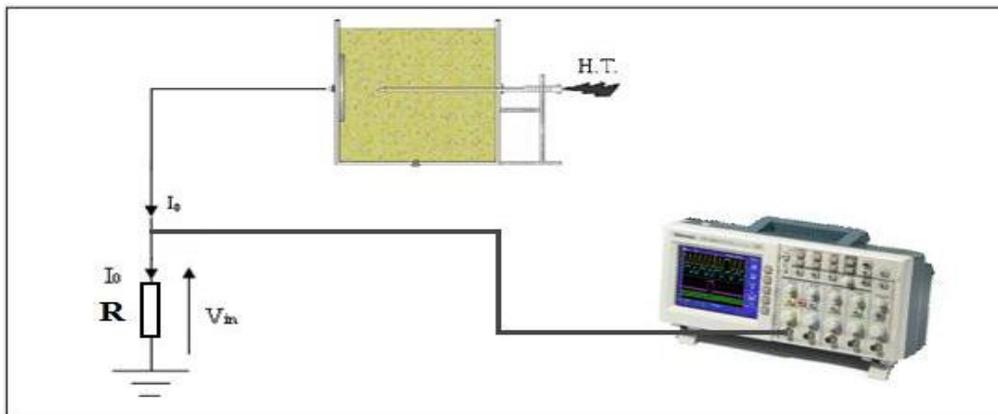


Figure (III.5) : Circuit de mesure du courant

Pour protéger la station de mesure contre les perturbations dues au champ électriques émis par les décharges électriques, nous avons introduit la résistance dans une boîte métallique en Aluminium couverte avec du papier Aluminium que nous avons relié à la terre, torsadé les fils de connexion pour réduire la surface présentée aux champs perturbateurs et réduire par conséquent les phénomènes induits.

Pour déduire le caractère du courant traversant entre les électrodes, nous avons visualisé simultanément le courant et la tension d'alimentation reliés à l'oscilloscope.

## III.3 Résultats et commentaires

Dans ce dernier chapitre, Nous avons d'abord effectué des essais en l'absence de la barrière isolante, qui servira de référence pour la comparaison des résultats expérimentaux.

Nous présentons l'évolution de la tension de claquage et la rigidité diélectrique, en fonction de la distance inter-électrodes, ainsi que l'influence du rayon de courbure de l'électrode pointe,

l'évolution du courant efficace en fonction de la tension appliquée et en fonction de la distance inter-électrodes. En deuxième lieu, nous nous intéressons à l'évolution de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes et la position relative de la barrière, de différentes natures et épaisseurs.

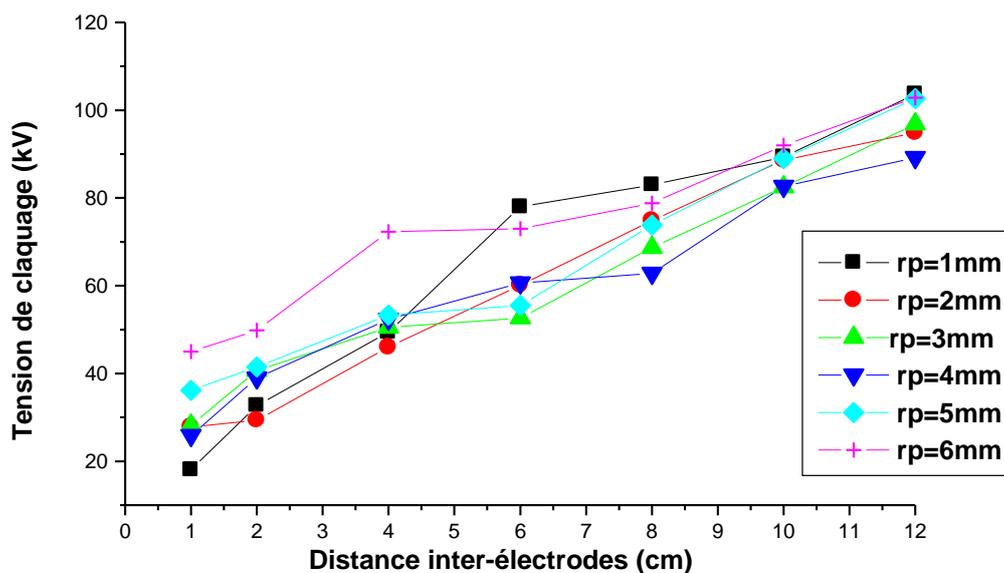
### III.3.1 Essais sans barrière

Les essais effectués sans barrière sont des essais préliminaires, ces essais sont réalisés pour une distance inter-électrodes variant de 1 à 12cm.

#### III.3.1.1 Influence de la distance inter-électrodes

En faisant varier la distance inter-électrodes de 1 à 12cm et en prenant la moyenne pondérée de six essais de claquage pour chaque distance [62], le temps de repos entre deux claquages successifs est de 30s, un temps suffisant pour que l'huile retrouve son équilibre statique [3].

La figure (III.6) représente la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour les différents rayons de courbures (1, 2, 3, 4, 5 et 6mm). Nous remarquons que l'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne un accroissement quasi linéaire de la tension de claquage. Ceci est attribué à la diminution de l'effet du champ électrique. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux trouvés dans la littérature par d'autres chercheurs, sous tension alternative [7, 16] et impulsionnelle en polarité positive [17].



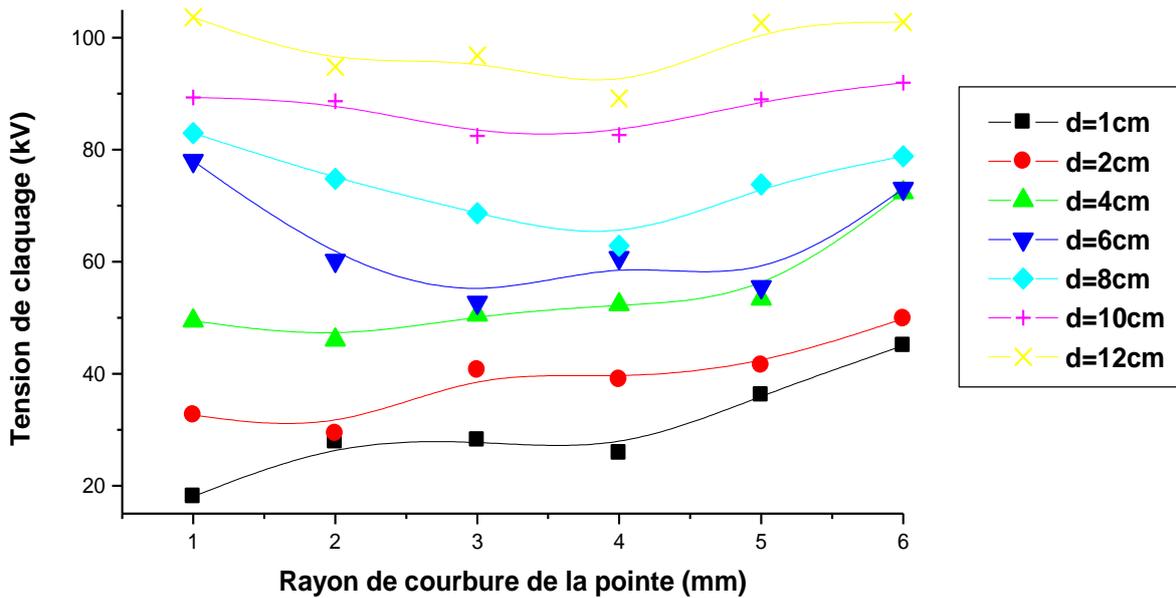
**Figure (III.6) :** Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour différents rayons de courbures de la pointe

#### III.3.1.2 Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe

Sur la figure (III.7) nous représentons la variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes. Nous remarquons que la tension de claquage dépend du rayon de courbure de la pointe. Pour les grandes distances ( $d=10$  et  $12$ cm) le rayon de courbure n'a pas d'influence sur la tension de claquage, tout fois pour les distances inférieures ( $d=6$  et  $8$ cm), la tension de claquage diminue légèrement pour les rayons ( $rp=1, 2$  et  $3$ mm) et augmente pour les rayons supérieurs à  $4$ mm.

Par contre pour les petites distances ( $d=1, 2$  et  $4$ cm), nous constatons que la tension de claquage augmente légèrement avec le rayon de courbure.

Ceci s'explique par le fait que pour les grandes distances le champ est plutôt uniforme et pour les petites distances, l'augmentation du rayon de courbure de la pointe engendre une diminution de l'intensité du champ électrique et devient de plus en plus uniforme dans l'intervalle.



**Figure (III.7):** Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes

### III.3.2 Rigidité diélectrique

Les figures (III.8) et (III.9) 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.8), la rigidité diélectrique diminue quand la distance inter-électrodes augmente. Nos résultats coïncident avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [25].

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.9), 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 devient plus uniforme, par contre pour les grandes distances ( $d= 6, 8, 10$  et  $12$ cm), la rigidité d'électricité est pratiquement constante.

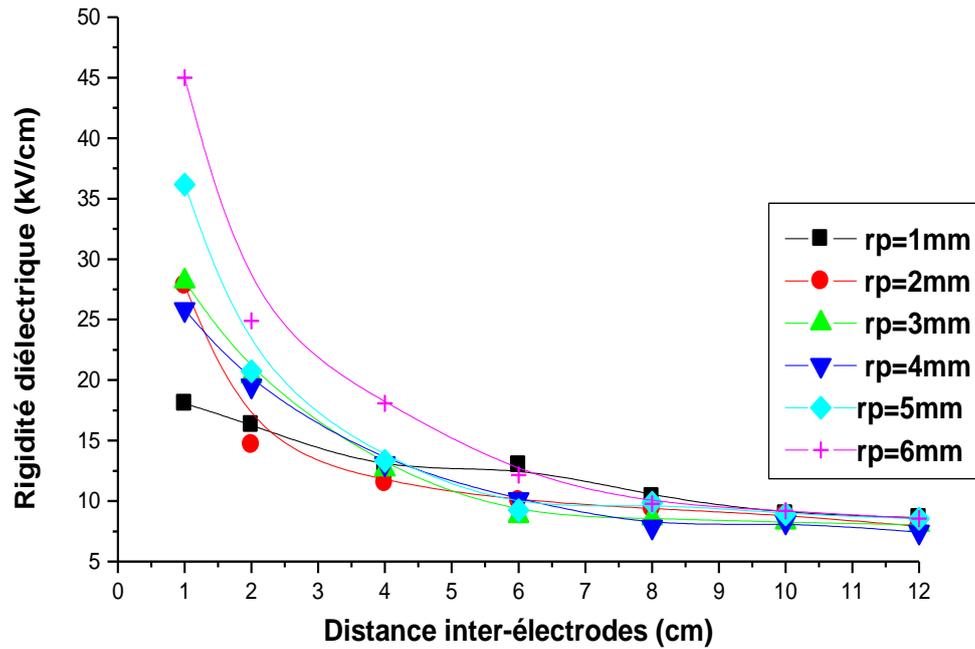


Figure (III.8): Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour différents rayons de courbure

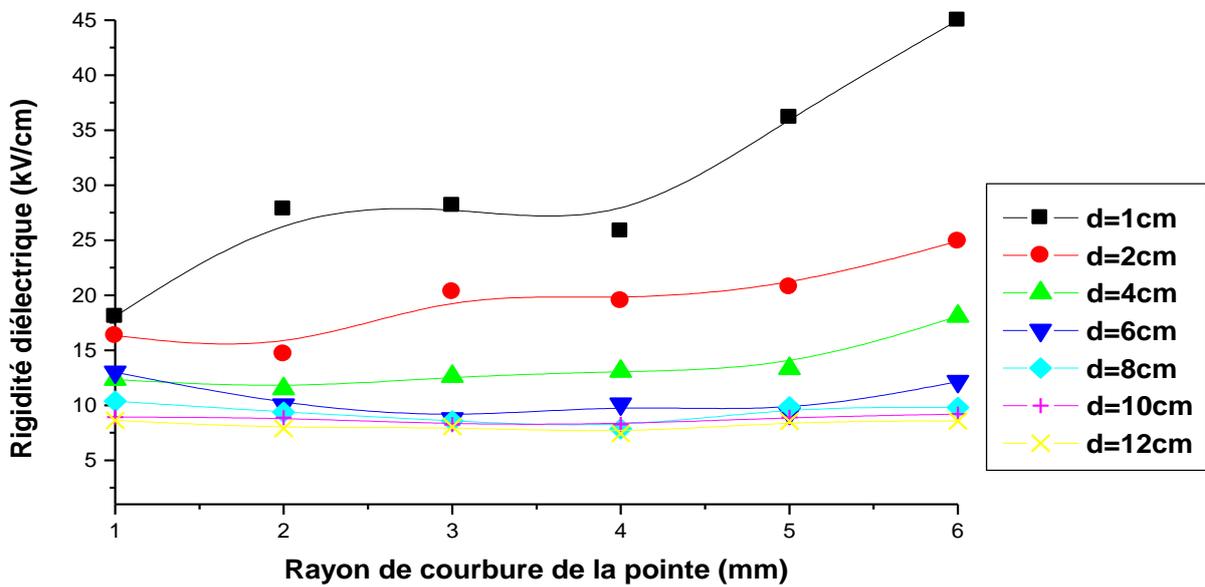


Figure (III.9) : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes

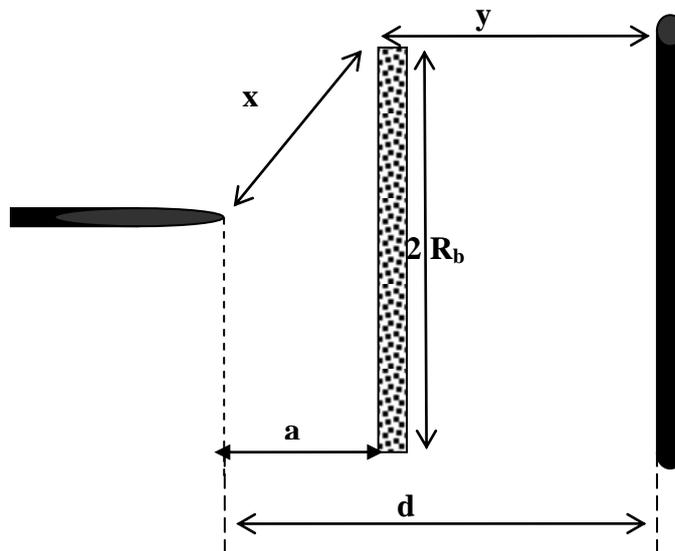
### III.3.3 Essais avec barrière

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

$d$ : étant la longueur axiale de l'intervalle pointe – plan, figure (III.10).

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

Toutes ces expériences sont effectuées avec une pointe de rayon de courbure constant ( $r_p=6\text{mm}$ ).



**Figure (III.10):** Représentation schématique de la position relative de la barrière

#### III.3.3.1 Influence de l'insertion de la barrière

Pour étudier l'effet de l'insertion de la barrière sur la tension de claquage, nous procédons à une comparaison entre les tensions de claquage des deux systèmes (sans et avec barrière).

Pour le système avec barrière, nous utilisons des barrières isolantes de forme circulaire en press-pahn et en bakélite. Les barrières en presspahn et en bakélite sont de diamètre  $D=10, 14$  et  $20\text{cm}$  et d'épaisseurs  $e=2$  et  $4\text{mm}$ . Ces barrières sont maintenues perpendiculaires à l'axe portant l'électrode pointe.

D'après les résultats obtenus (Fig. III.11 à III.14), nous constatons que l'insertion de la barrière isolante correctement placée dans l'intervalle, exerce une influence considérable sur la tension disruptive du système sans barrière. Cette influence se traduit par l'augmentation de la tension disruptive. Cette augmentation est remarquable quels que soient la nature, l'épaisseur et le diamètre de la barrière.

Ceci est dû au fait que l'insertion de la barrière conduit à uniformiser le champ électrique entre la barrière et le plan. Dans les diélectriques liquides ou gazeux, la barrière change la distribution de la charge déposée, les ions positifs créant la charge sont alors freinés par la barrière et se répartissent sur sa surface constituant une surface équipotentielle [4,68]. Dans ce cas le système pointe-plan en présence de la barrière 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 coïncident avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [4, 40].

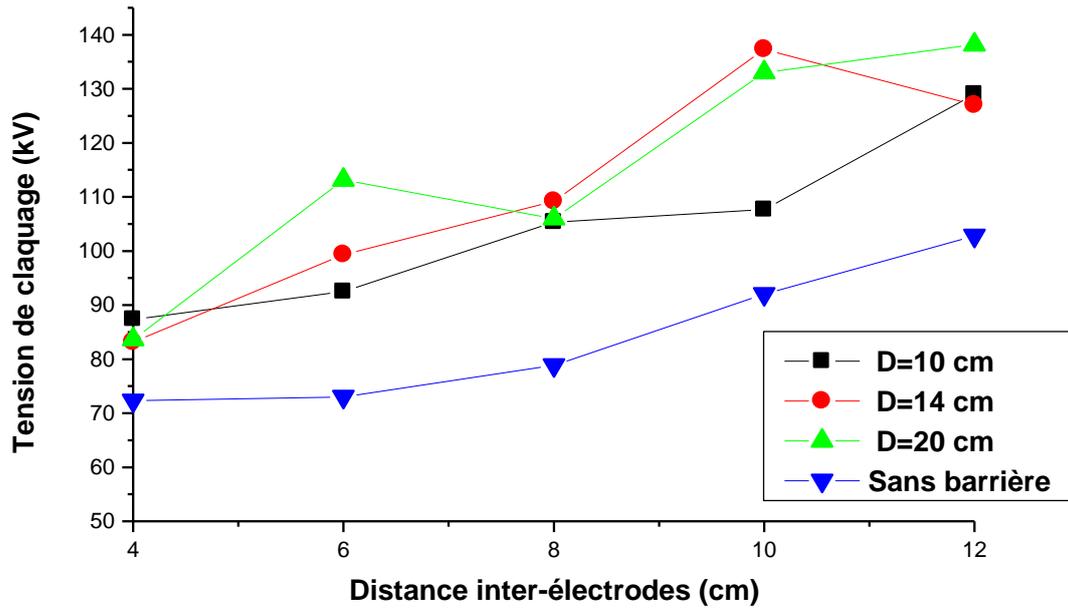


Figure (III.11) : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en press-pahn ( $e=2\text{mm}$ )

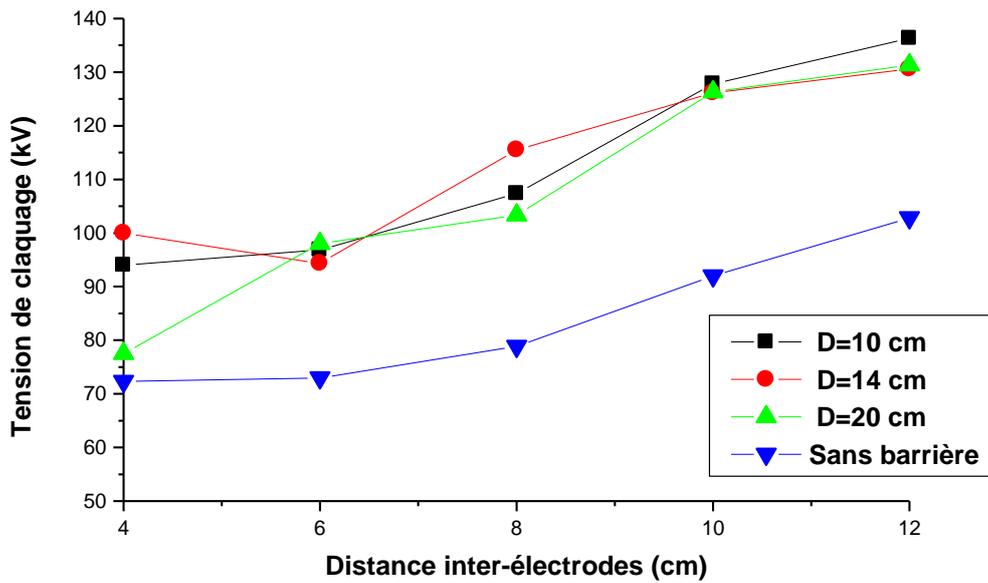


Figure (III.12) : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en press-pahn ( $e = 4\text{mm}$ )

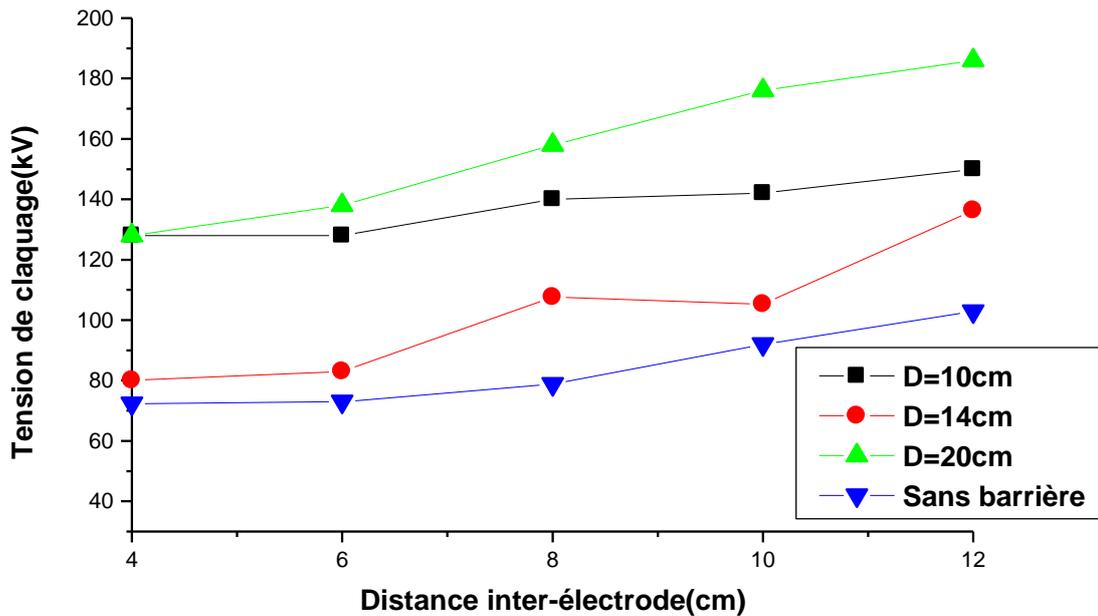


Figure (III.13) : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en bakélite (e=2mm)

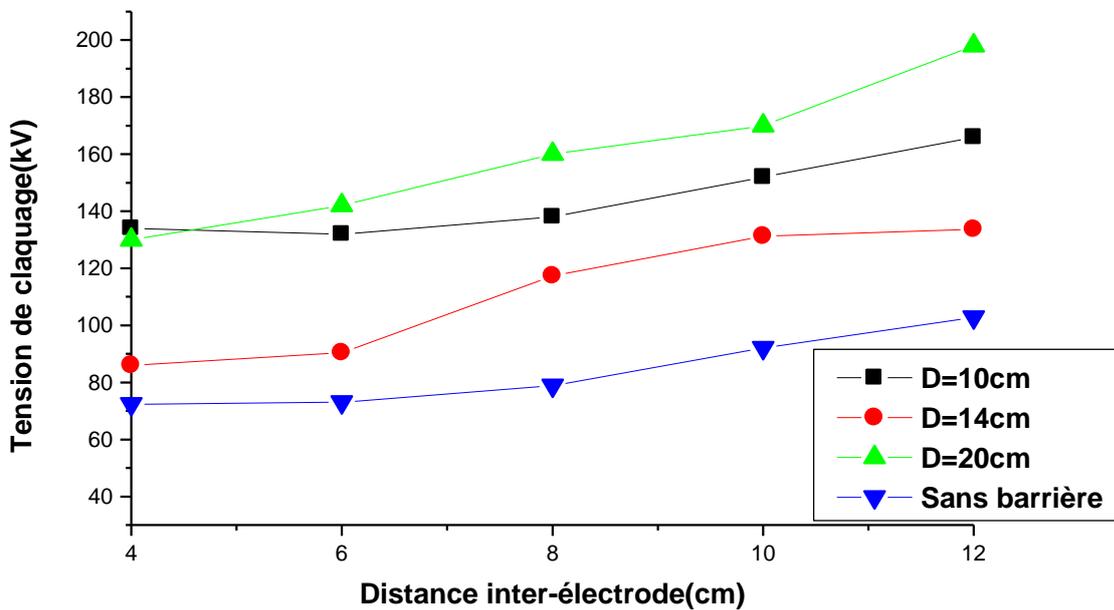
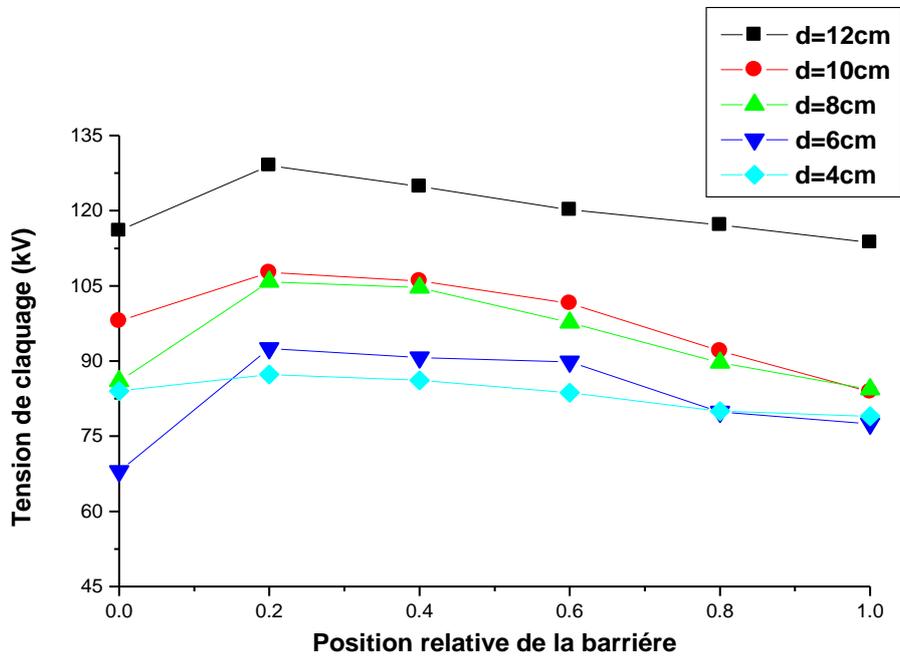


Figure (III.14) : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en bakélite (e=4mm)

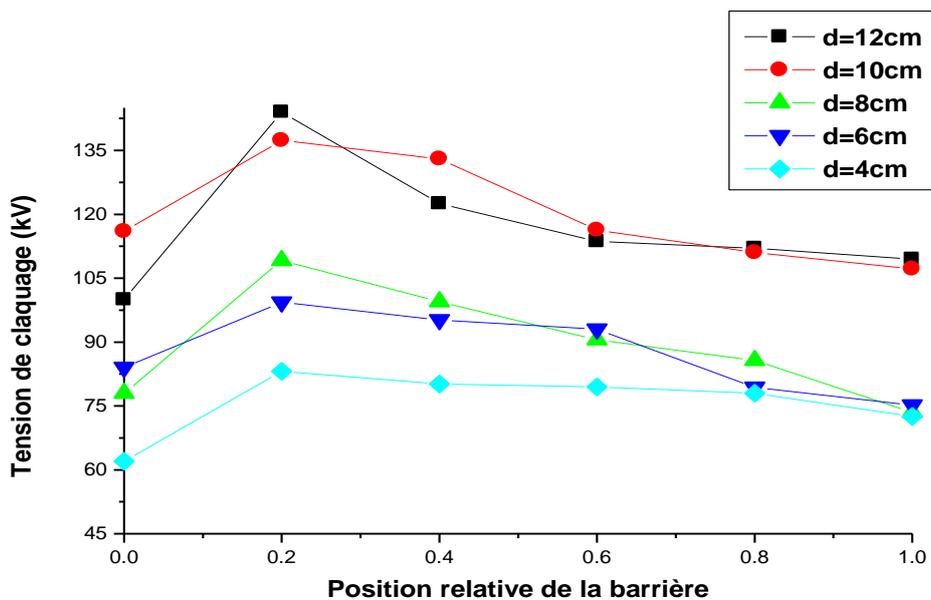
### III.3.3.2 Influence de la position de la barrière

Il ressort des résultats obtenus (Fig. III.15 à III.26), que l'influence de la position de la barrière est d'autant plus importante quand elle est placée au voisinage de la pointe. La barrière joue un rôle d'obstacle géométrique provoquant l'augmentation de la tension disruptive, quand elle est proche de la pointe à environ 20% de la distance pointe-plan. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge disruptive [4, 51]. Cependant, lorsque la position relative de

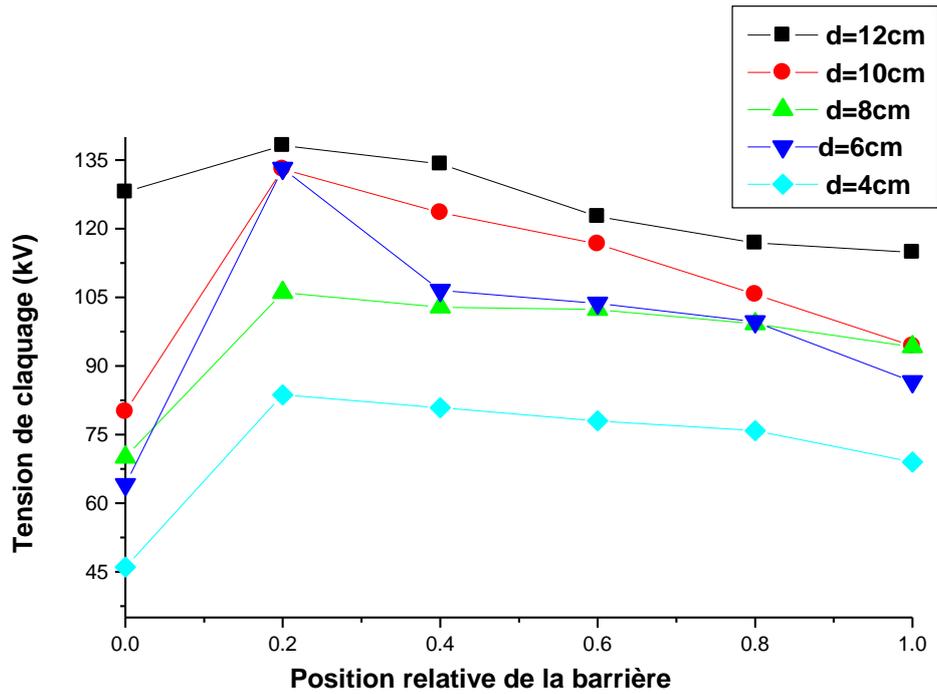
la barrière augmente (supérieure à 20%), la longueur minimale de fuite de la décharge décroît ainsi que la tension de claquage. Quand la barrière touche le plan mis à la terre ( $a/d=100\%$ ), son influence reste faible et la tension disruptive est proche de celle sans barrière [67]. Nous remarquons que la tension de claquage prend des valeurs élevées pour les grandes distances. Cette remarque est générale quels que soient la nature, le diamètre et l'épaisseur de la barrière.



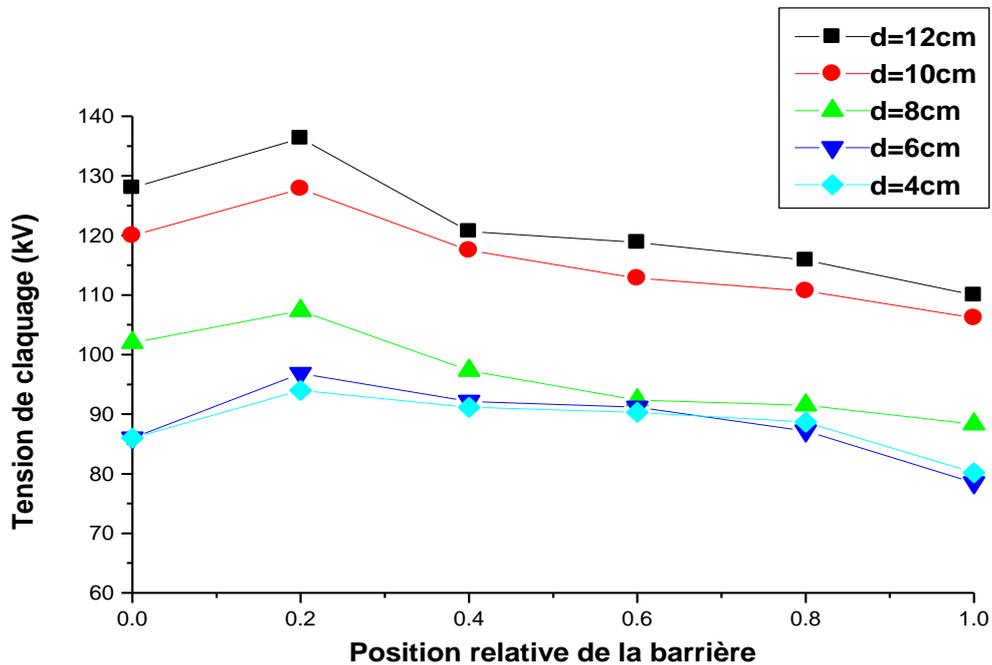
**Figure(III.15):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en press-pahn ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=10\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes



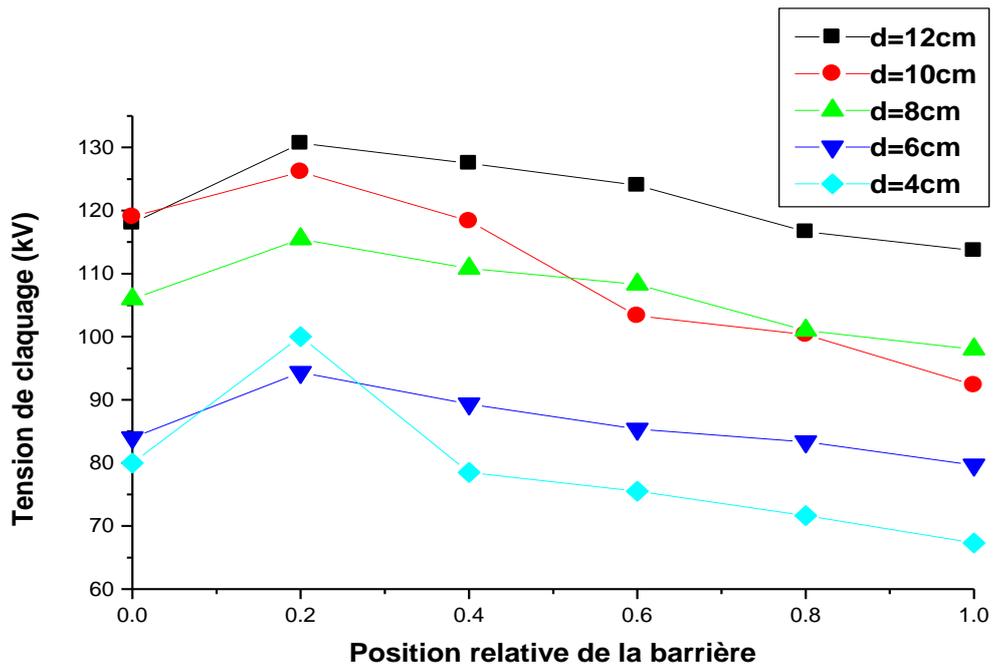
**Figure(III.16):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en press-pahn ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ), pour différentes distances inter-électrodes



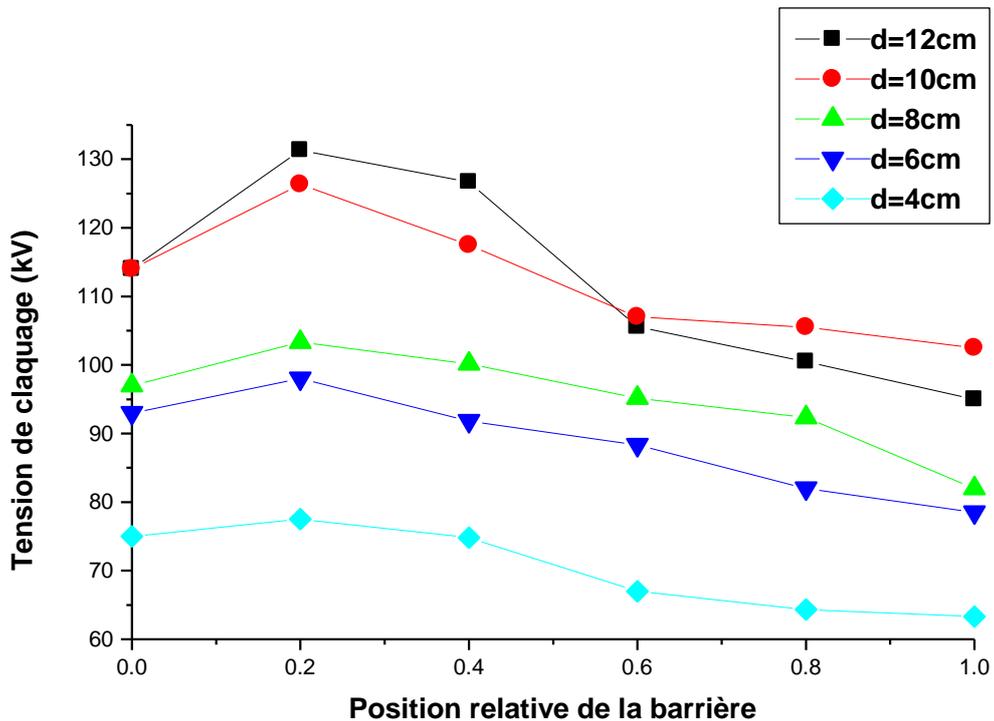
**Figure(III.17):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en press-pahn ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes



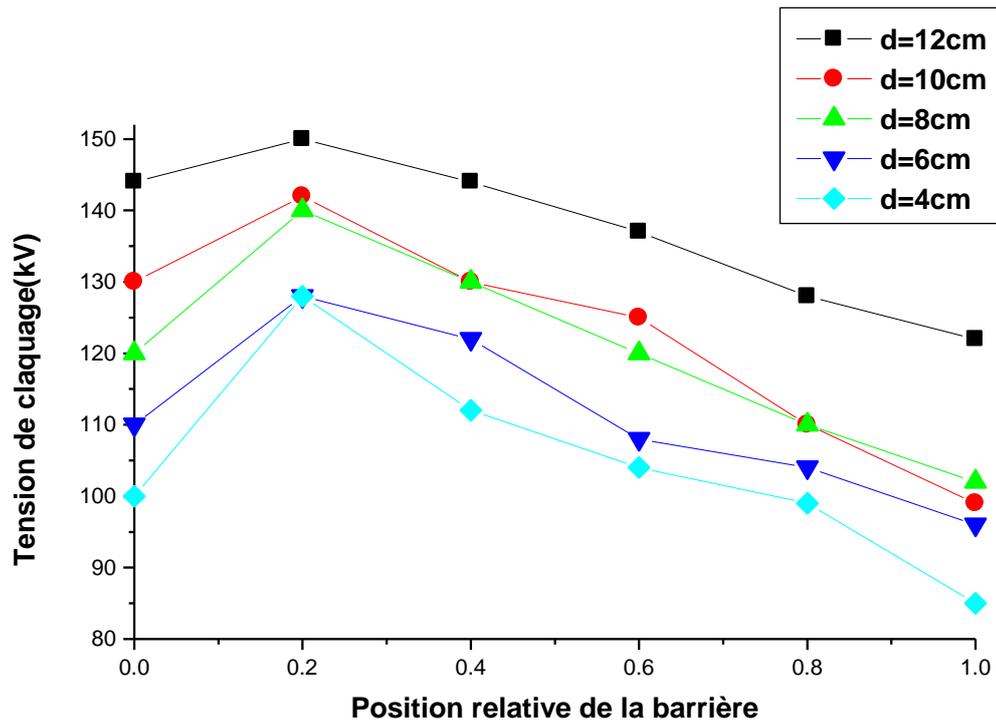
**Figure(III.18):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en press-pahn ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=10\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes



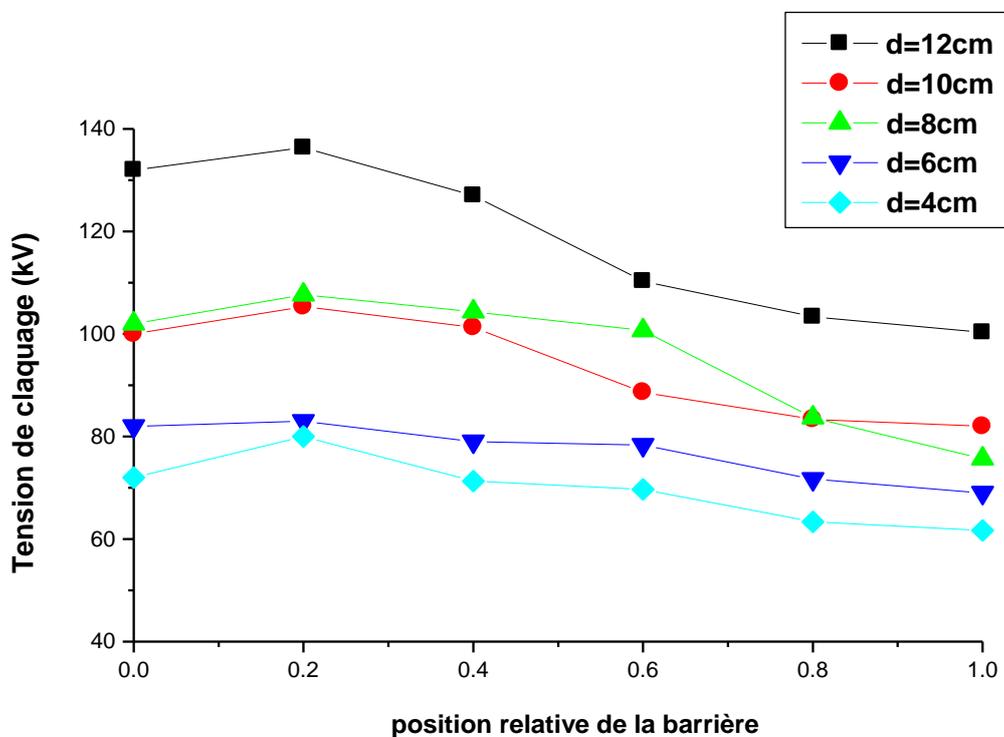
**Figure(III.19):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en press-pahn ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes



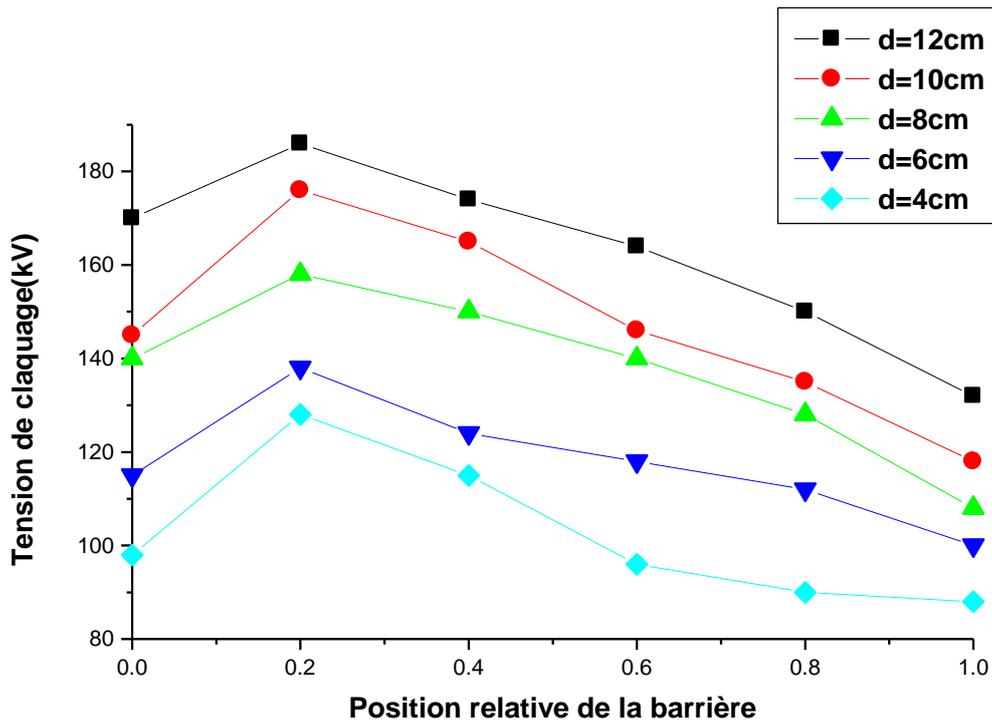
**Figure(III.20):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en press-pahn ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes



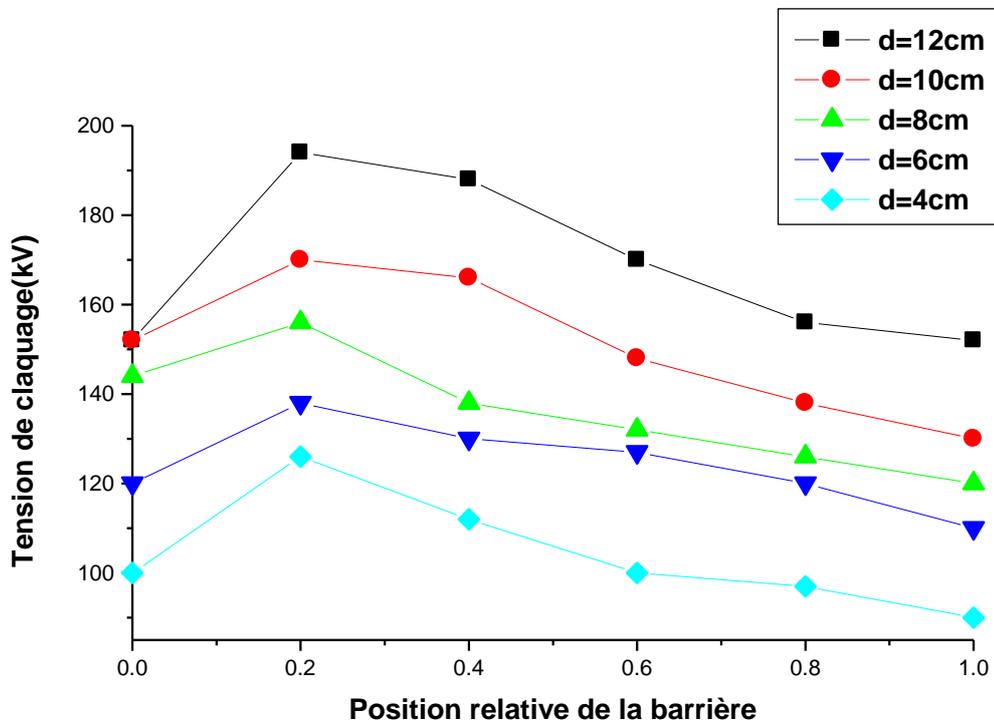
**Figure(III.21):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite (e=2mm, D=10cm) pour différentes distances inter-électrodes



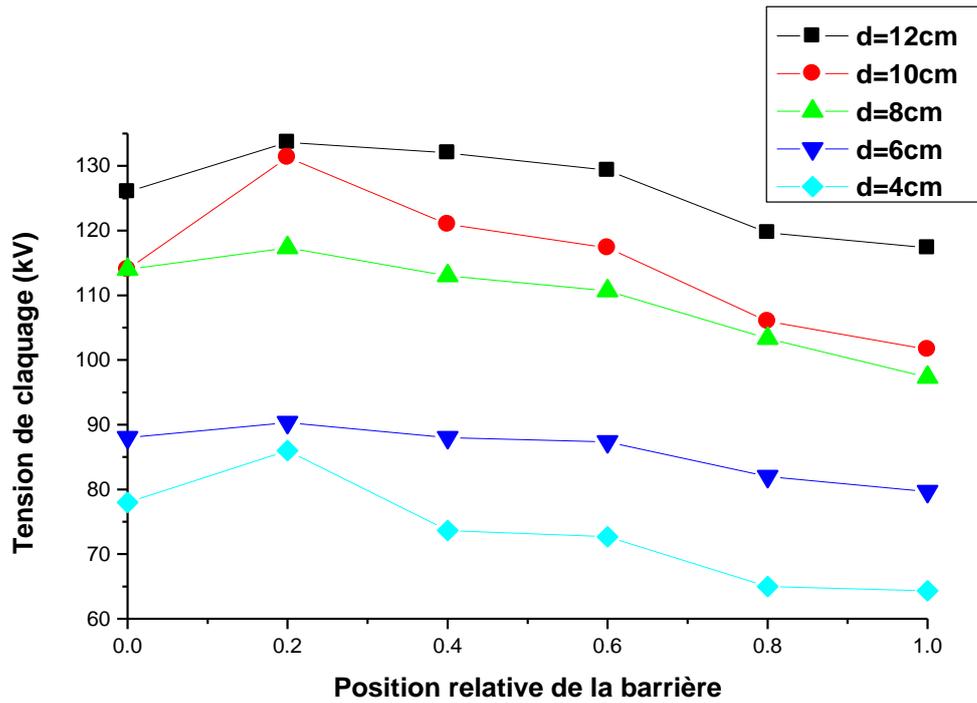
**Figure(III.22):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite (e=2mm, D=14cm) pour différentes distances inter-électrodes



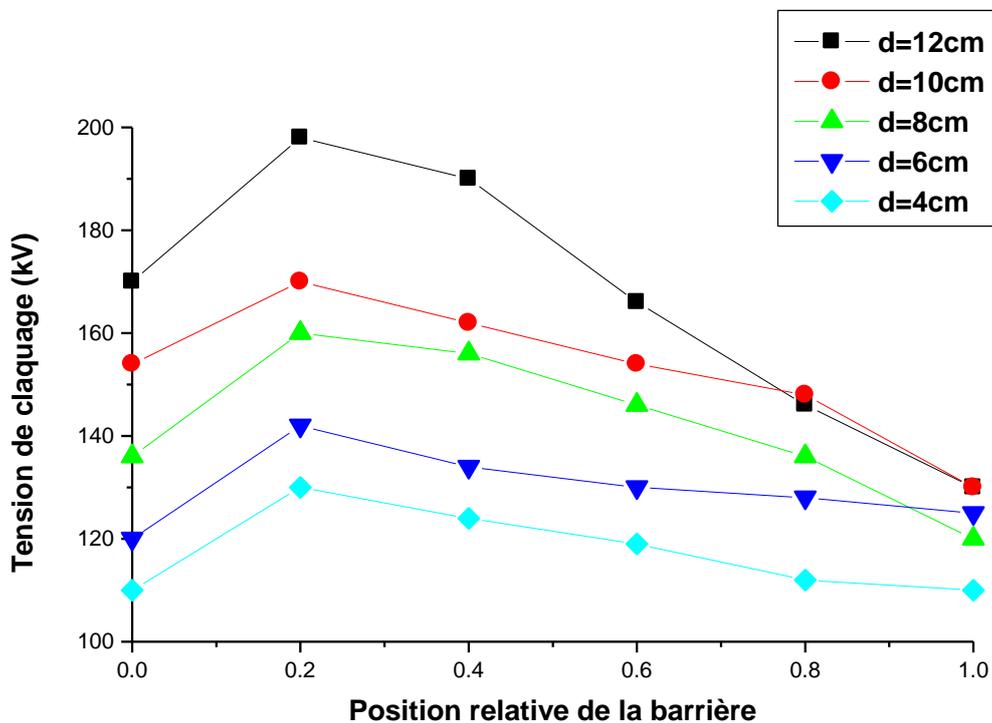
**Figure(III.23):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite ( $\epsilon=2\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes



**Figure(III.24):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite ( $\epsilon=4\text{mm}$ ,  $D=10\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes



Figure(III.25): Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite ( $\epsilon=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes

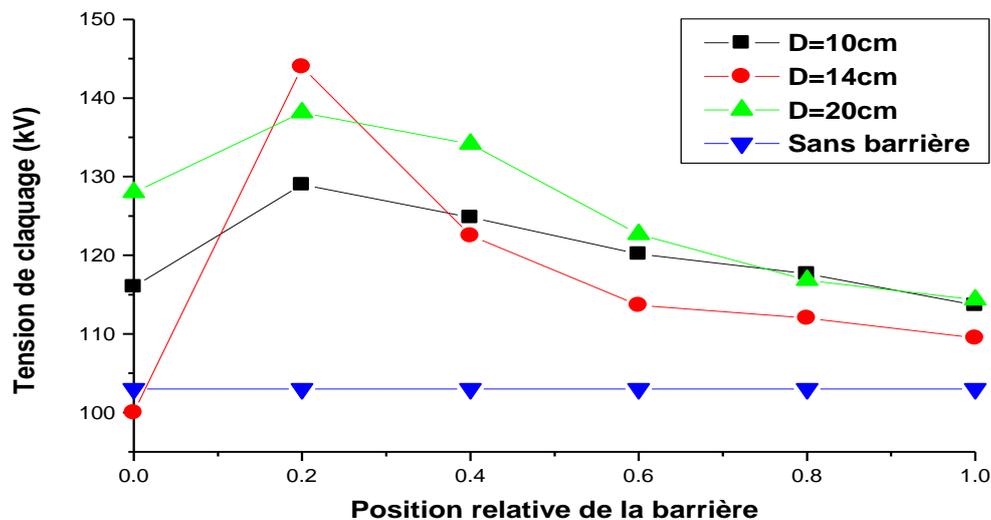


Figure(III.26): Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière en bakélite ( $\epsilon=4\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ ) pour différentes distances inter-électrodes

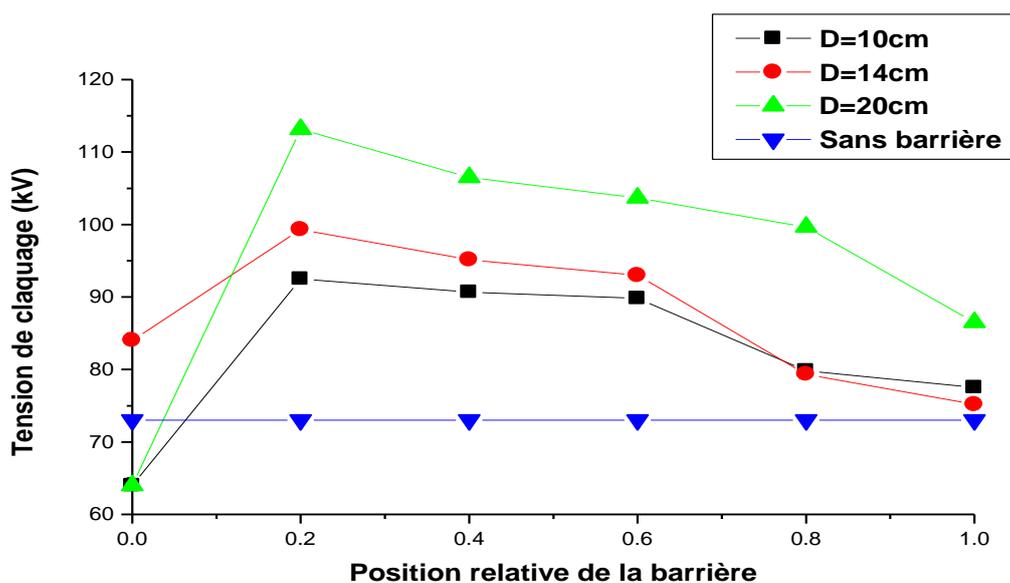
### III.3.3 Influence des dimensions de la barrière

#### III.3.3.1 Influence du diamètre de la barrière

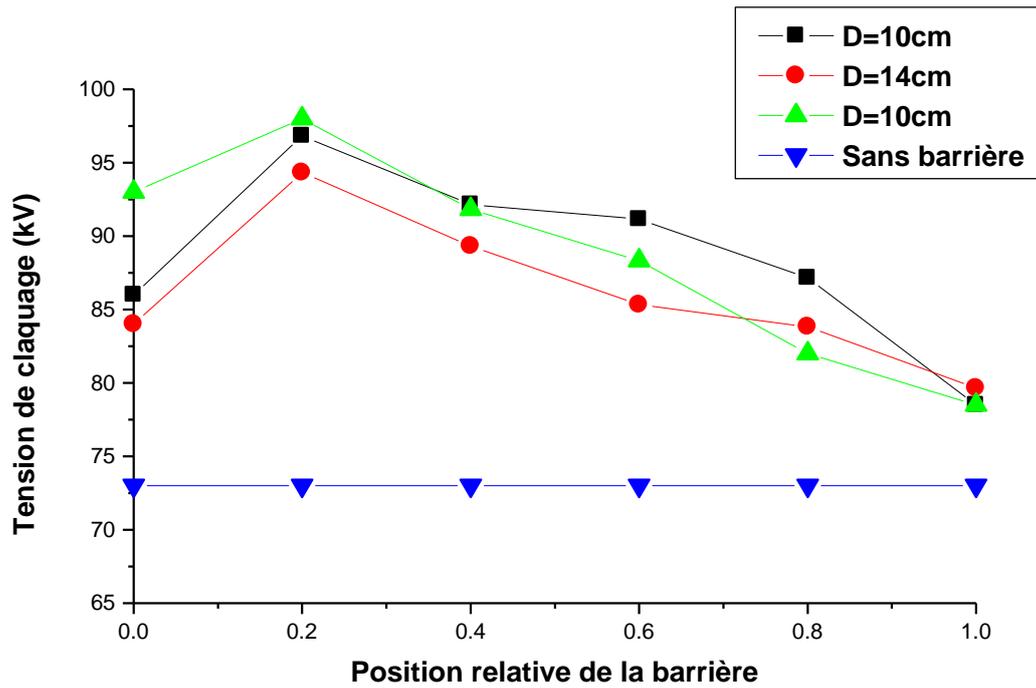
Nous observons sur les figures (III.27 à III.39), que la tension de claquage augmente avec l'augmentation du diamètre de la barrière surtout à la position 20% [4], son effet est aléatoire lorsqu'elle est placée au voisinage de l'électrode plane (supérieure à 40%) et au voisinage de l'électrode acéré (0%), au cours de nos essais il peut y avoir une perforation du solide isolant, la durée de l'application de la tension jusqu'au claquage, l'homogénéité structurale du matériau et du milieu ambiant, jouent un rôle sur la rigidité diélectrique. La diminution de la tension de claquage lors de l'éloignement de la barrière de la pointe peut être attribuée à la réduction de la longueur globale de la décharge et à la faible influence de charges dans l'intervalle pointe-barrière [63]. Cette amélioration est due à l'augmentation de la longueur minimale de la décharge, définie par la somme des distances pointe-bord de la barrière, épaisseur de la barrière et entre la barrière et le plan. Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [4, 40].



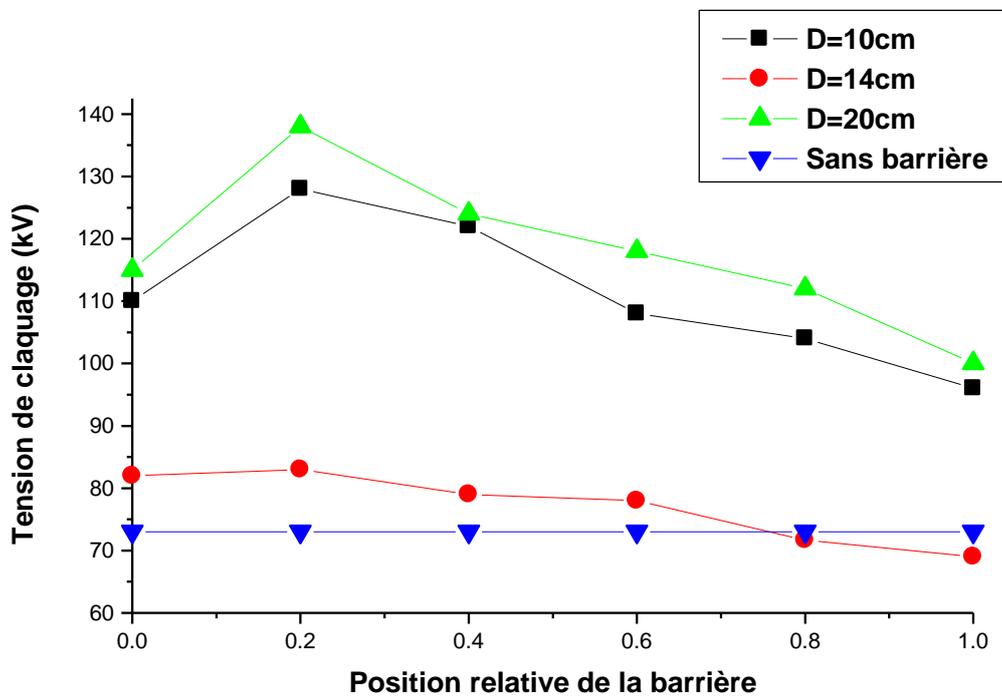
**Figure(III.27):** Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en press-pahn ( $e=2\text{mm}$ ,  $d = 12\text{cm}$ ) pour différentes positions.



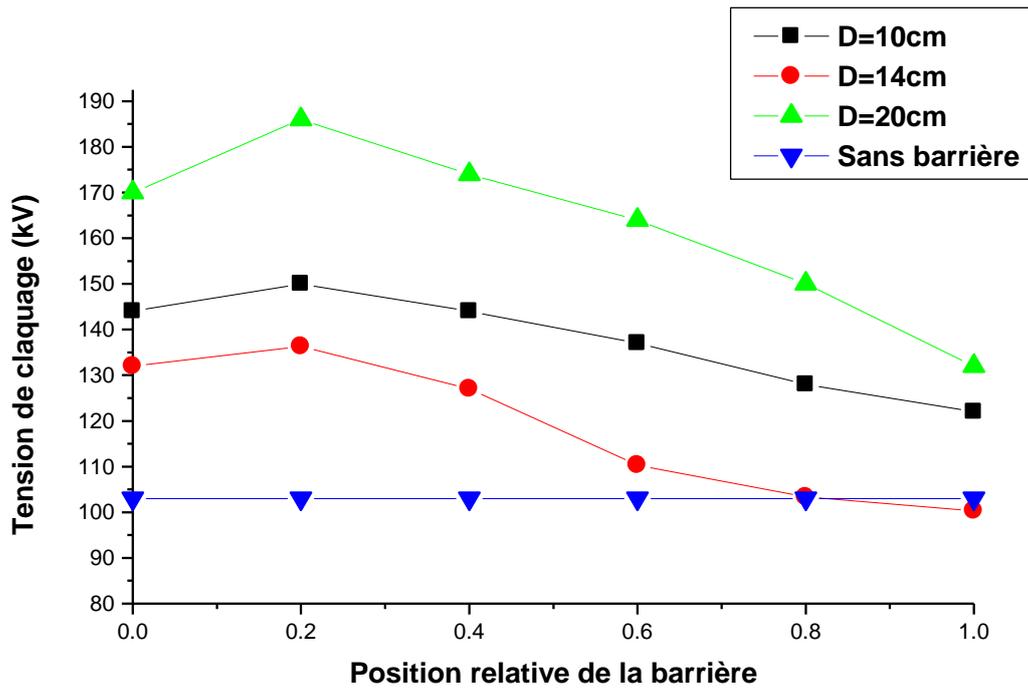
**Figure(III.28):** Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en press-pahn ( $e=2\text{mm}$ ,  $d = 6\text{cm}$ ) pour différentes positions



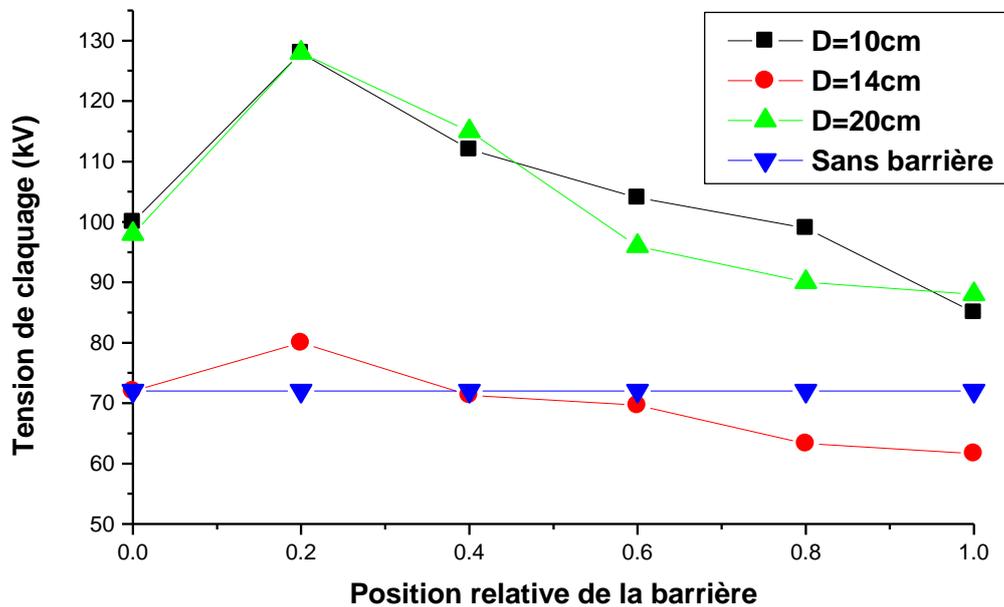
Figure(III.29): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en press-pahn ( $e=4\text{mm}$ ,  $d = 6\text{cm}$ ) pour différentes positions



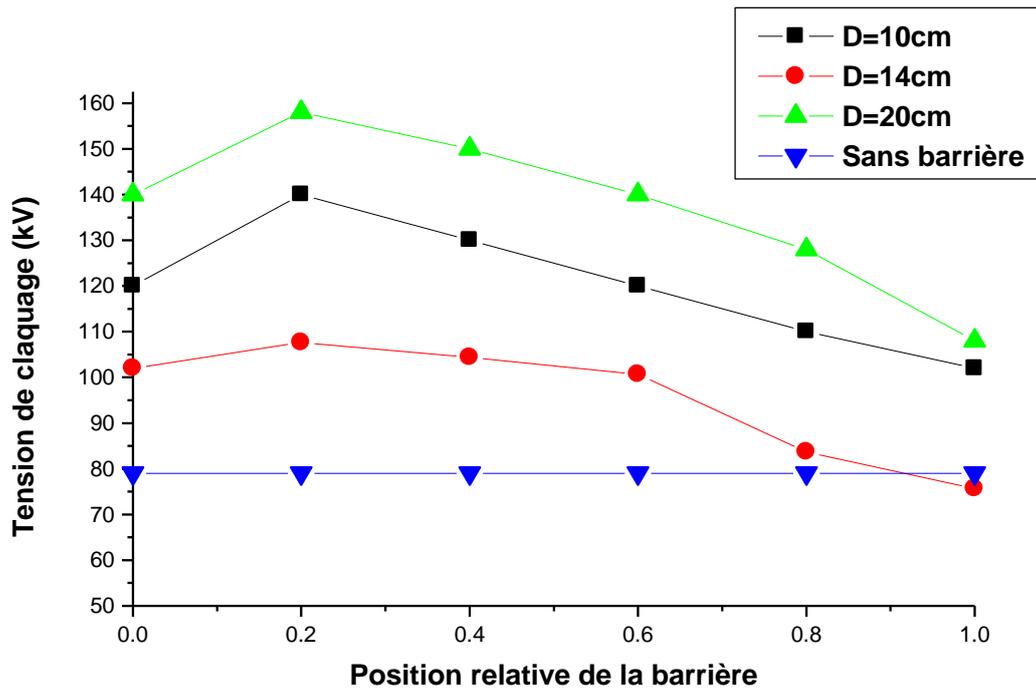
Figure(III.30): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $e=2\text{mm}$ ,  $d = 6\text{cm}$ ) pour différentes positions



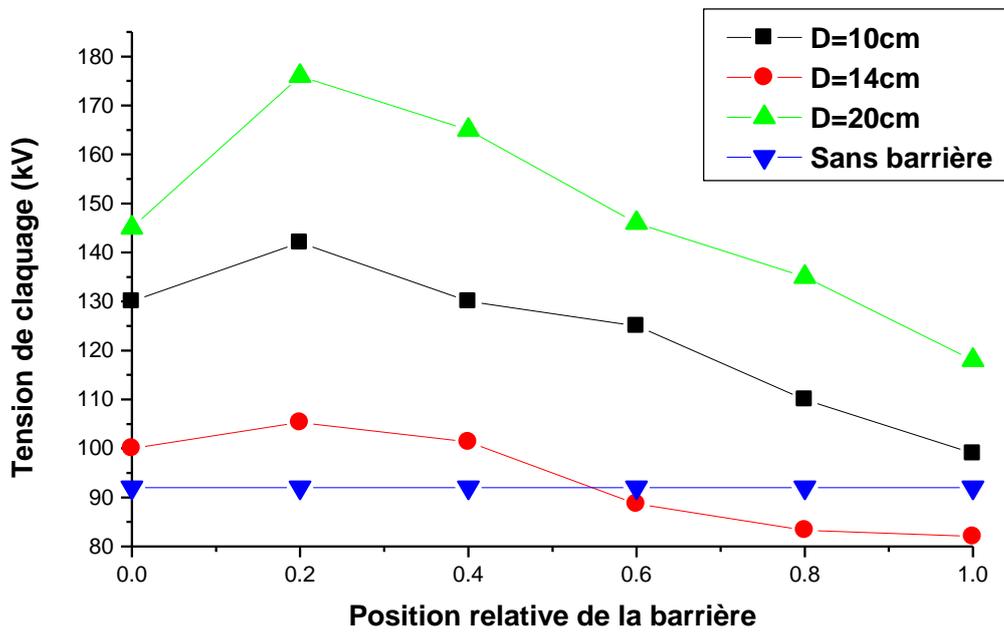
Figure(III.31): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite (e=2mm, d = 12cm) pour différentes positions



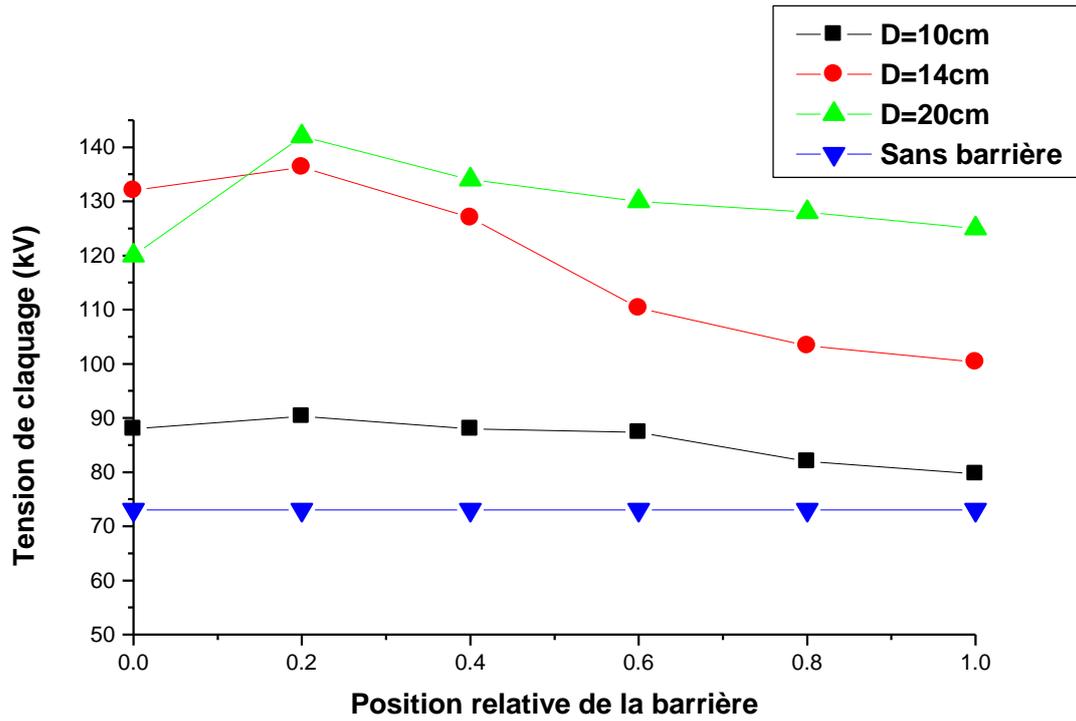
Figure(III.32): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite (e=2mm, d = 4cm) pour différentes positions



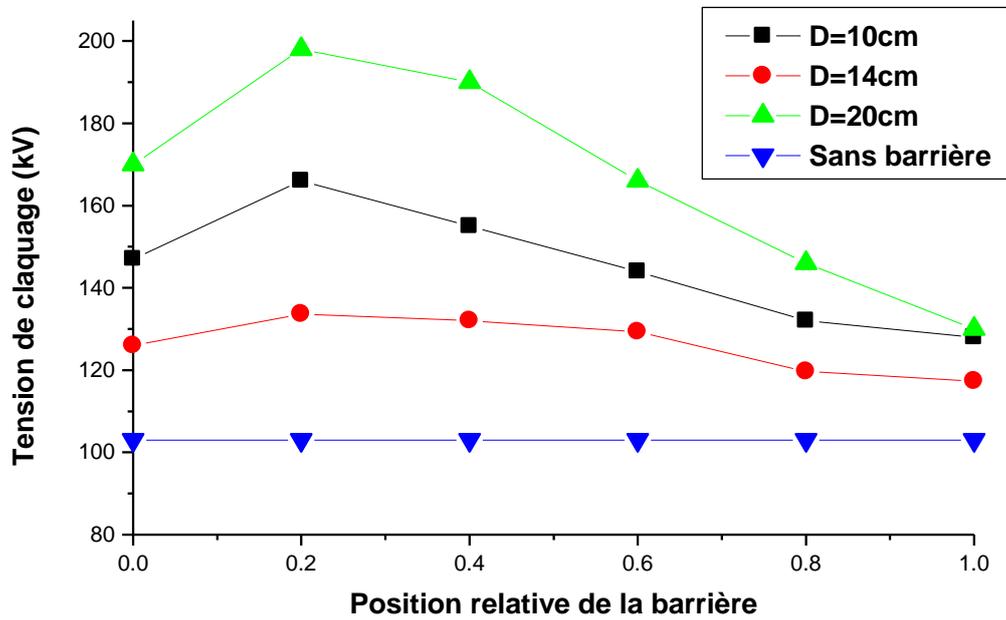
Figure(III.33): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $e=2\text{mm}$ ,  $d = 8\text{cm}$ ) pour différentes positions



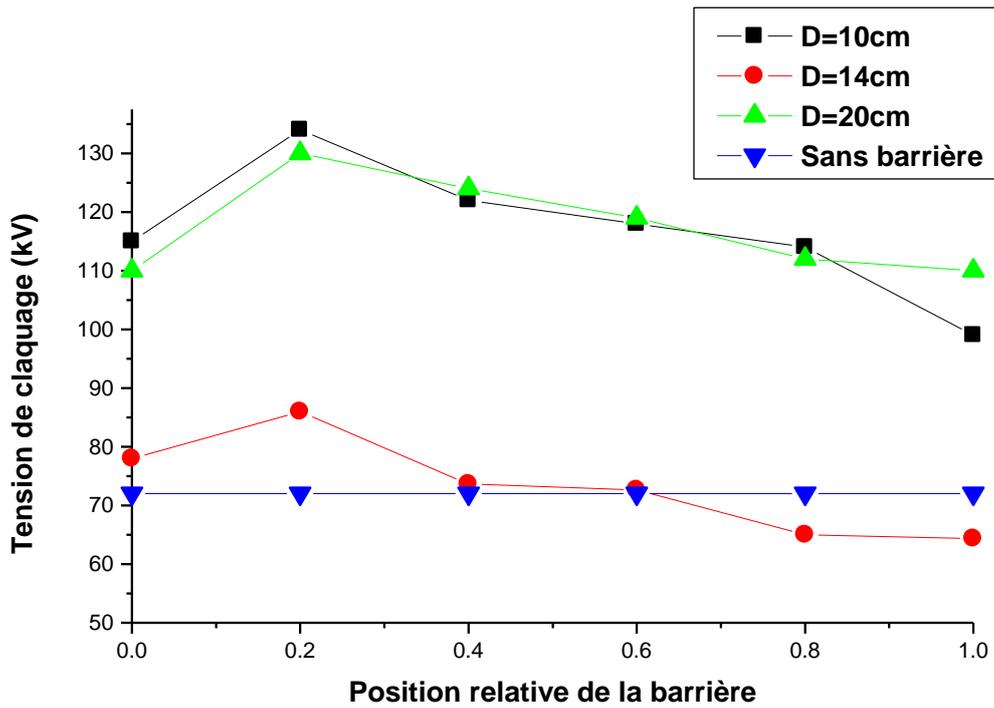
Figure(III.34): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $e=2\text{mm}$ ,  $d = 10\text{cm}$ ) pour différentes positions



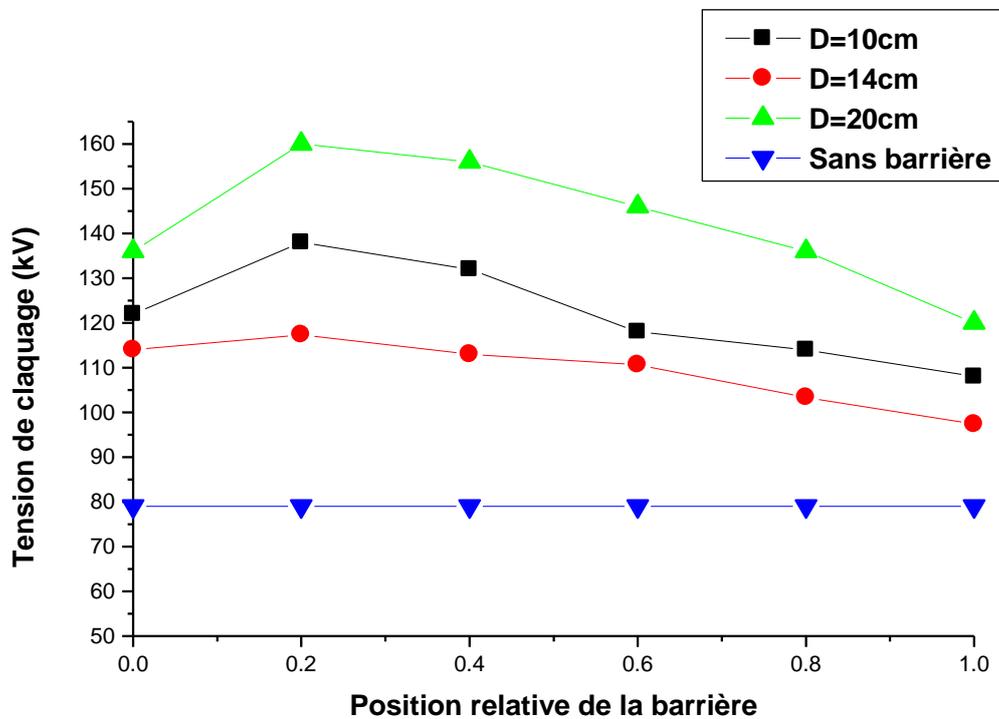
Figure(III.35): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $d = 6\text{cm}$ ) pour différentes positions



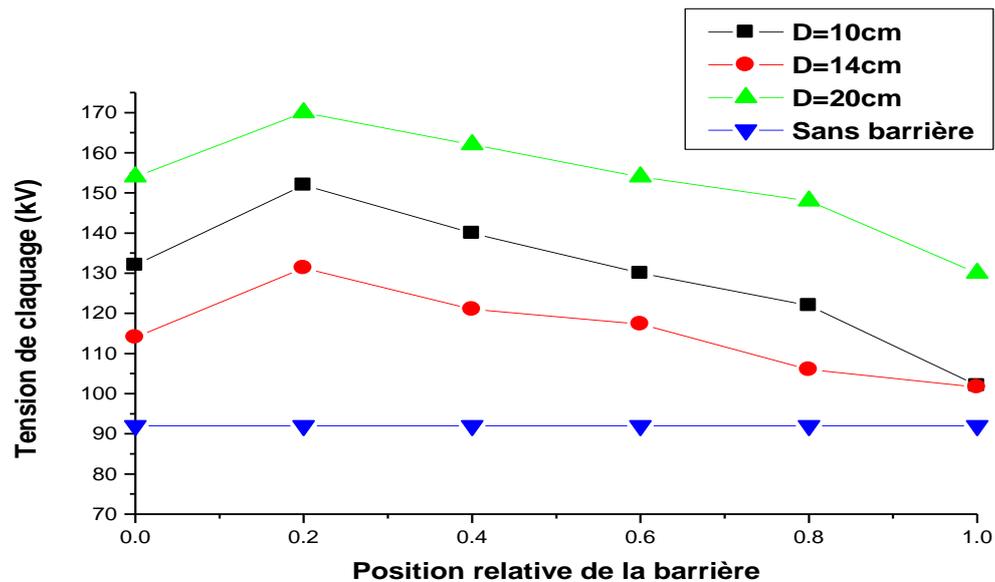
Figure(III.36): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $d = 12\text{cm}$ ) pour différentes positions



Figure(III.37): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $\epsilon=4\text{mm}$ ,  $d = 4\text{cm}$ ) pour différentes positions



Figure(III.38): Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $\epsilon=4\text{mm}$ ,  $d = 8\text{cm}$ ) pour différentes positions

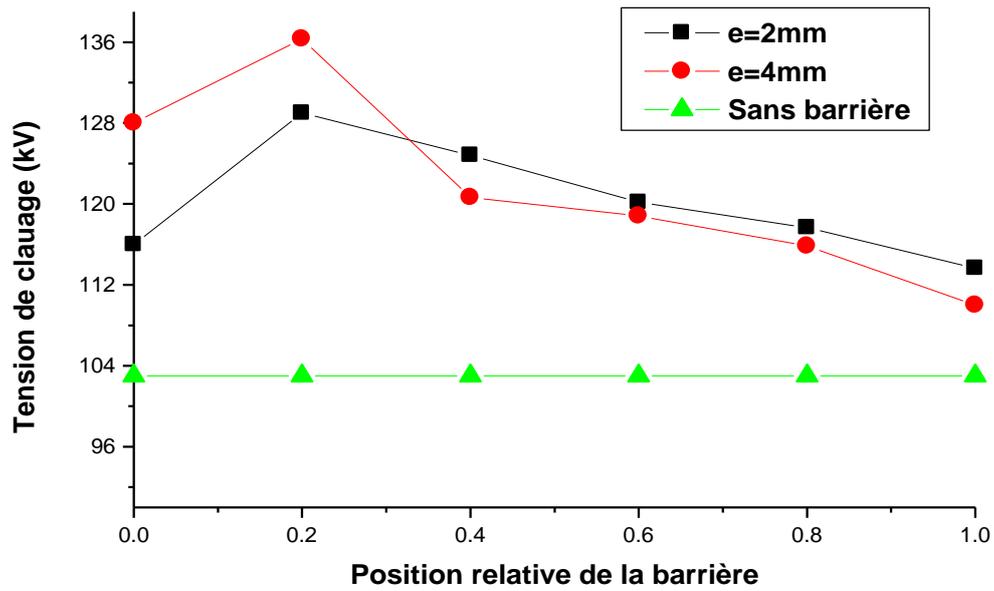


**Figure(III.39):** Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière en bakélite ( $\epsilon=4\text{mm}$ ,  $d = 10\text{cm}$ ) pour différentes positions

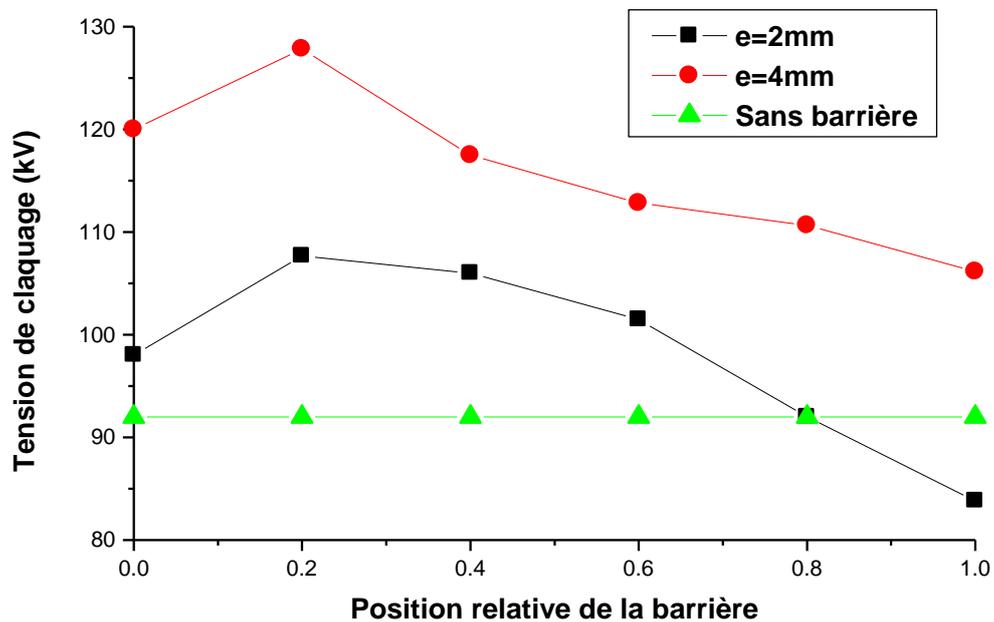
### III.3.3.3.2 Influence de l'épaisseur de la barrière

Dans ce paragraphe, nous étudions l'effet de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage, pour les mêmes diamètres de la barrière en presspahn et en bakélite

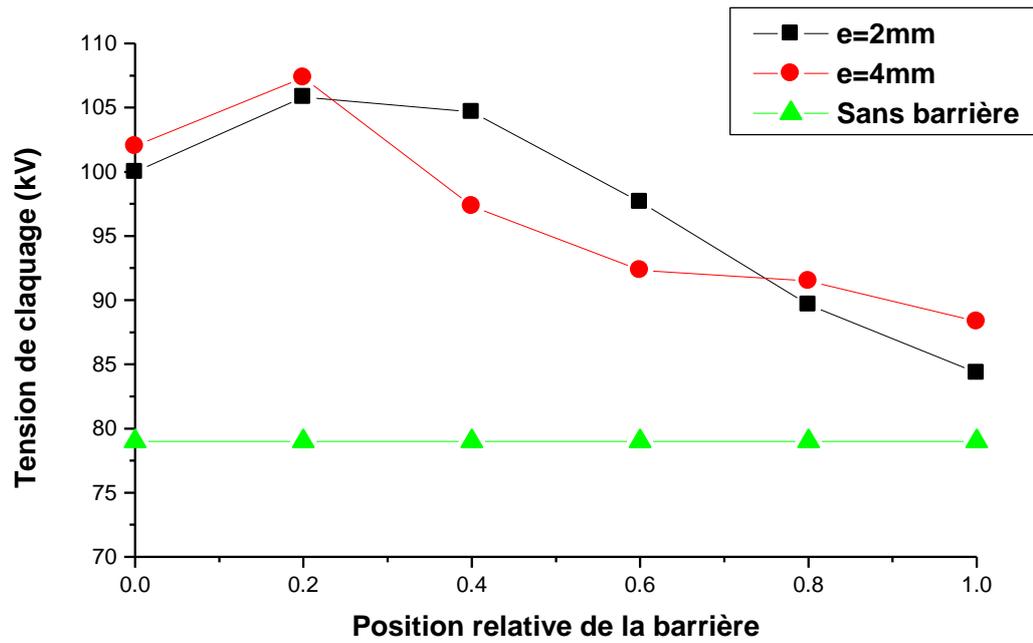
Nous considérons deux barrières de même diamètre mais d'épaisseurs différentes, il en ressort que la tension disruptive de l'intervalle pointe -barrière- plan figures (III.40 à III.59), est améliorée avec l'épaisseur, lorsque la barrière est entre 0% et 20%. Alors que pour une position relative supérieure à 40% son effet est aléatoire surtout pour les grandes distances. Par contre dans le reste des figures, nous remarquons une amélioration de la tension de claquage avec l'épaisseur quelle que soit la position de la barrière entre les électrodes et la distance inter-électrodes. La position optimale ne change pas quand l'épaisseur de la barrière augmente [4]. L'épaisseur, la permittivité, le facteur de dissipation diélectrique et la chute de tension entre les faces opposées de ce dernier, influencent sur la distribution des porteurs de la charge positives sur la surface de la barrière et puis sur la tension de claquage. Le champ électrique correspondant au claquage varie avec l'épaisseur, résultats en accord avec certains chercheurs [25,50, 67].



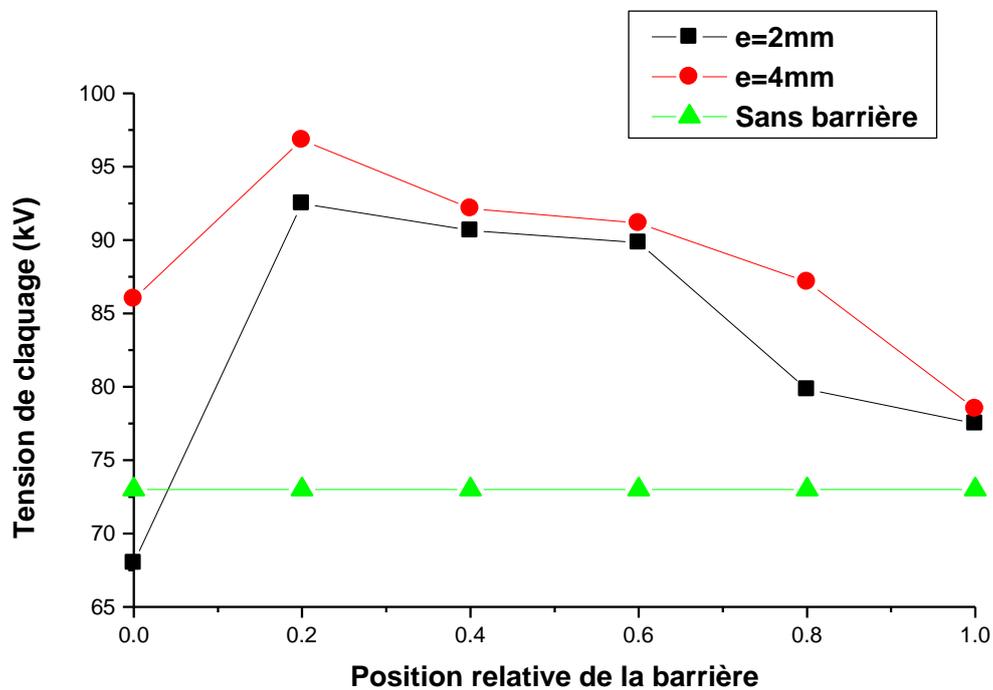
Figure(III.40): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en press-pahn pour différentes positions (d=12cm, D=10cm )



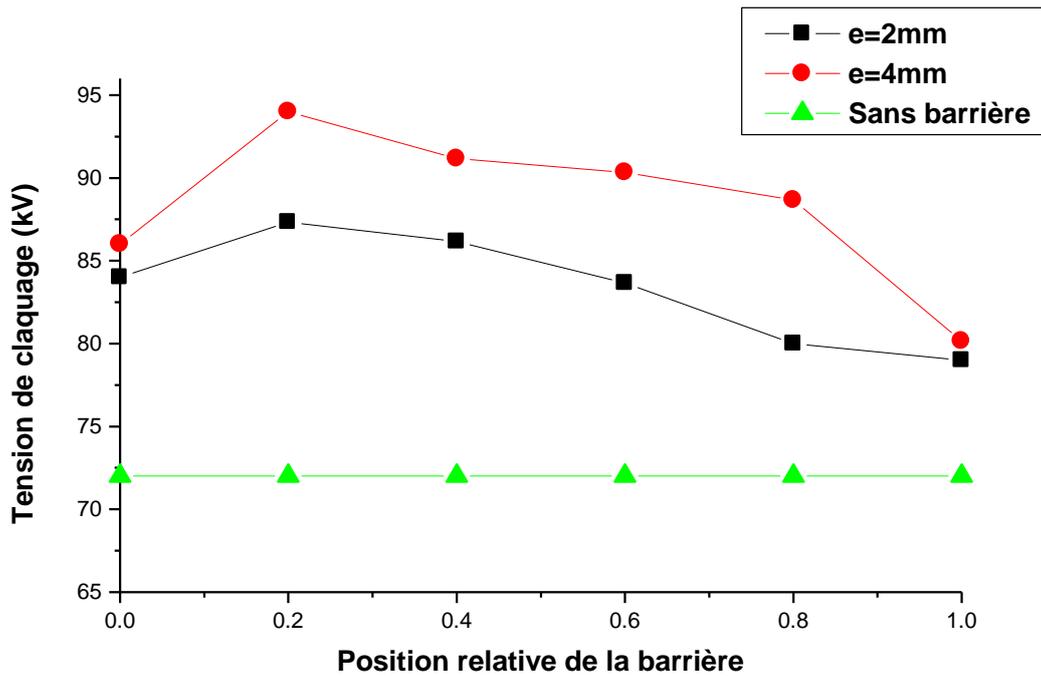
Figure(III.41): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en press-pahn pour différente positions (d=10cm, D=10cm,)



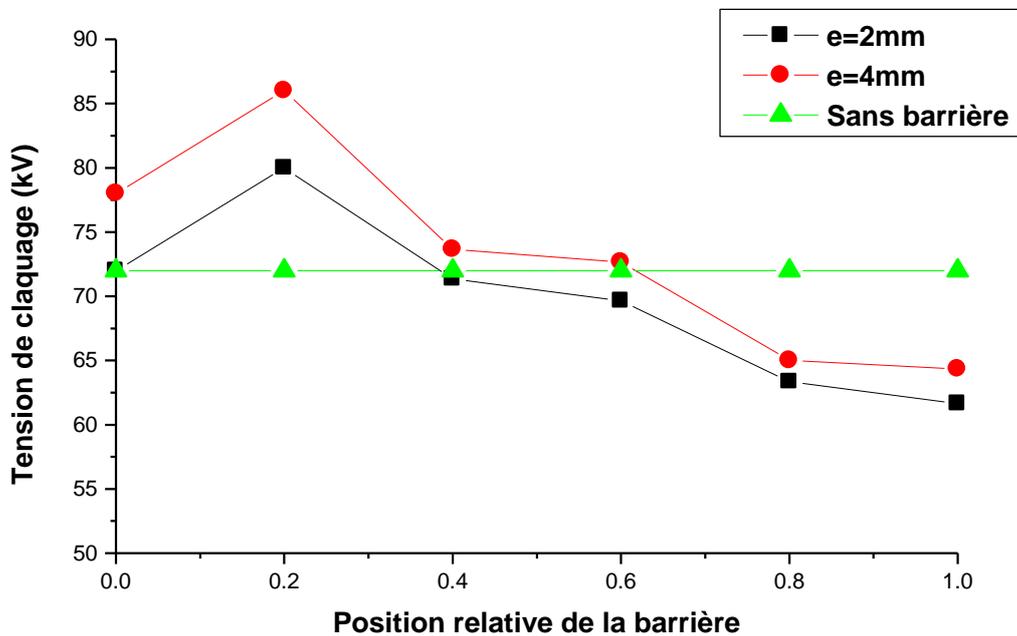
Figure(III.42): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en press-pahn, pour différentes positions (d=8cm, D=10cm)



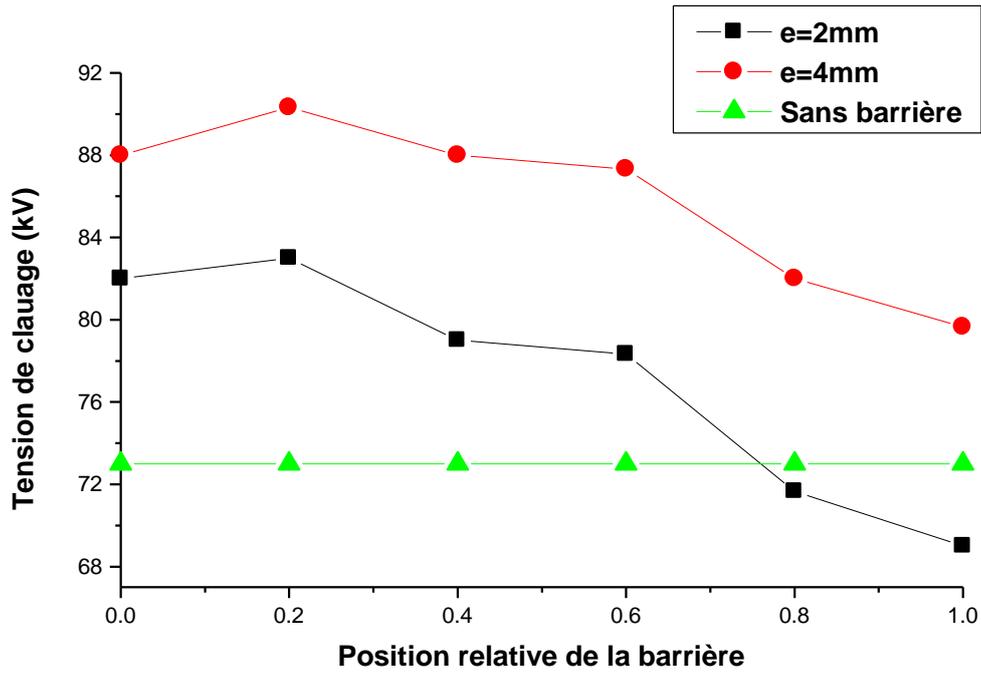
Figure(III.43): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en press-pahn, pour différentes positions (d=6cm, D=10cm)



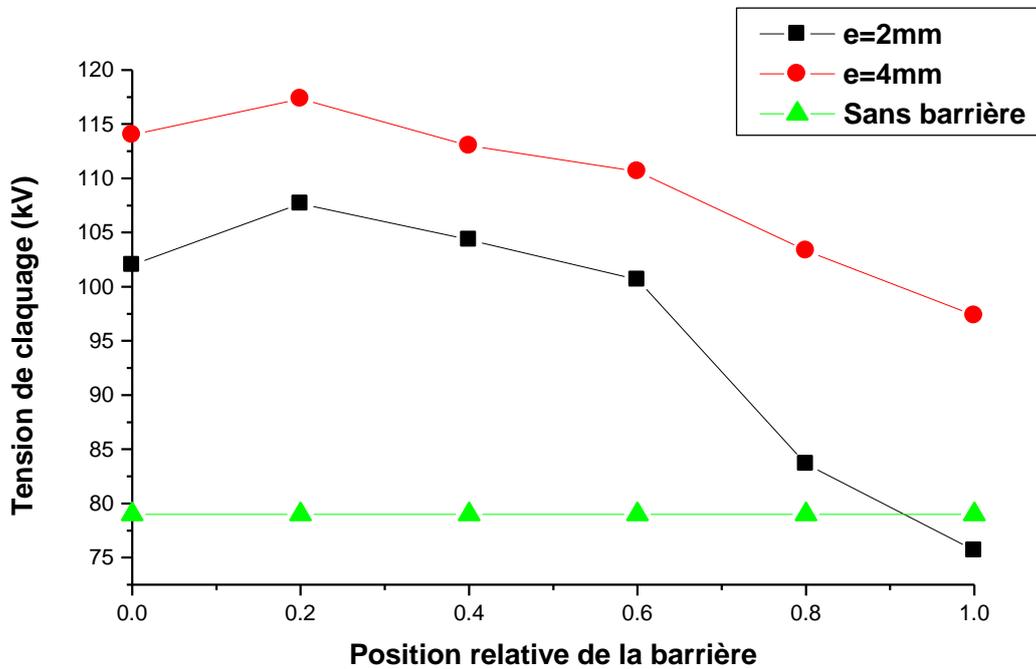
Figure(III.44): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en press-pahn, pour différentes positions (d=4cm, D=10cm)



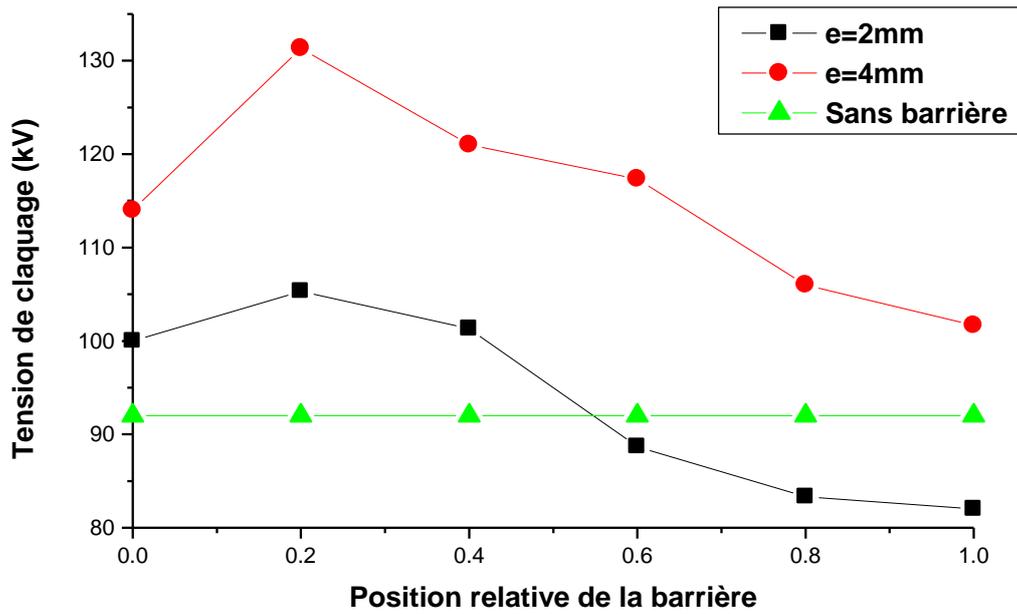
Figure(III.45): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en bakélite, pour différentes positions (d=4cm, D=14cm)



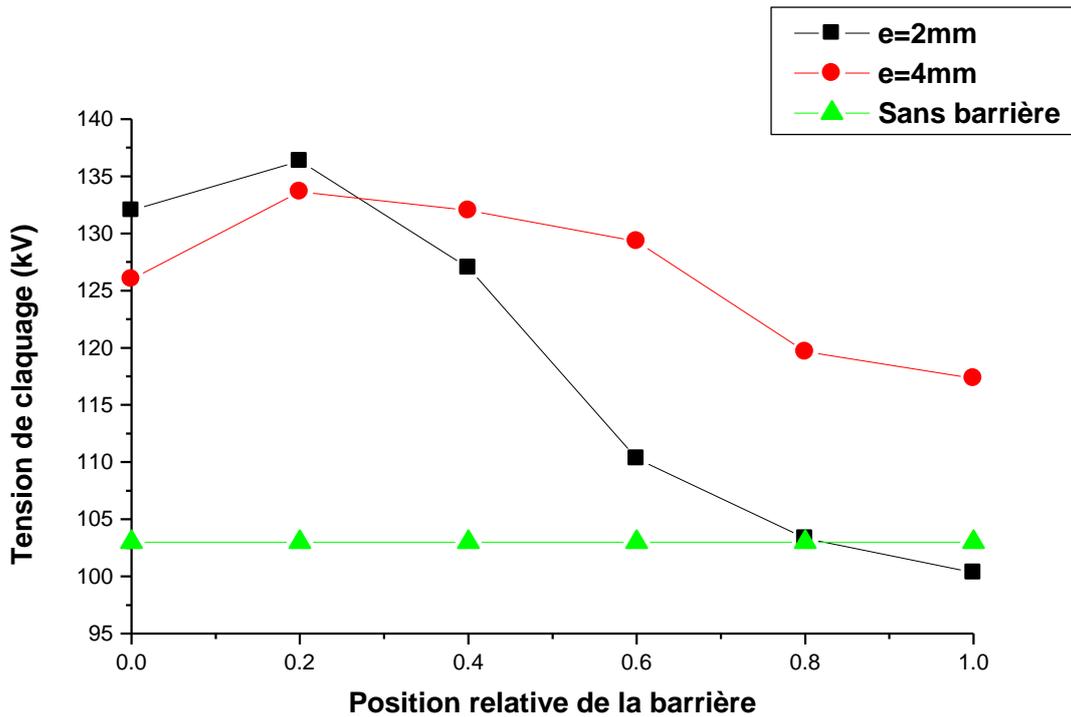
Figure(III.46): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en bakélite, pour différentes positions (d=6cm, D=14cm)



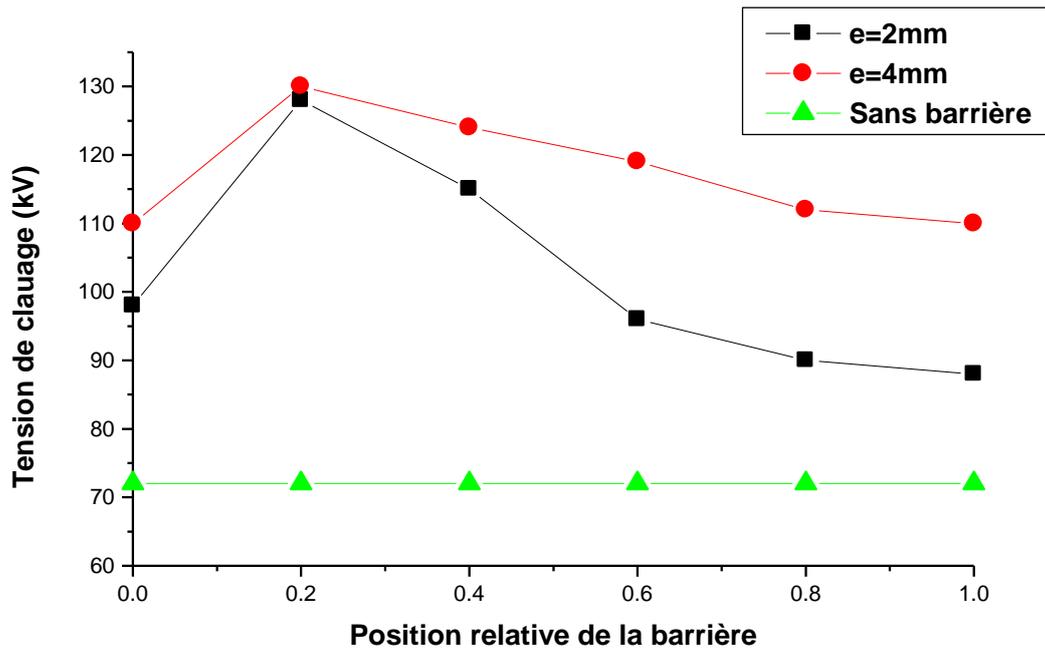
Figure(III.47): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en bakélite, pour différentes positions (d=8cm, D=14cm)



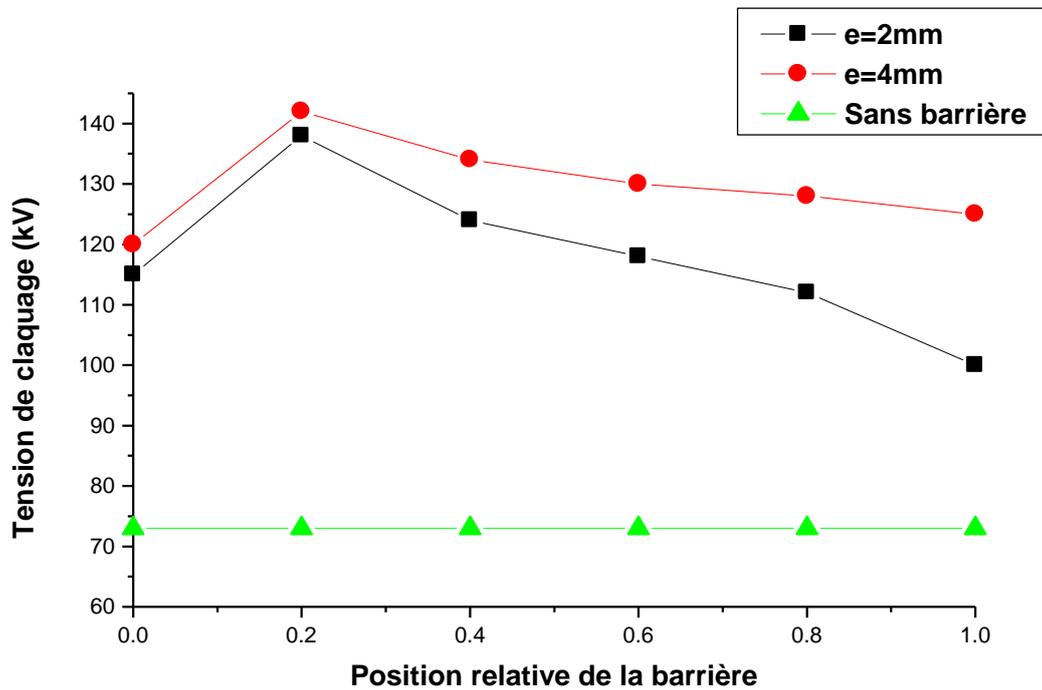
Figure(III.48): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en bakélite, pour différentes positions (d=10cm, D=14cm)



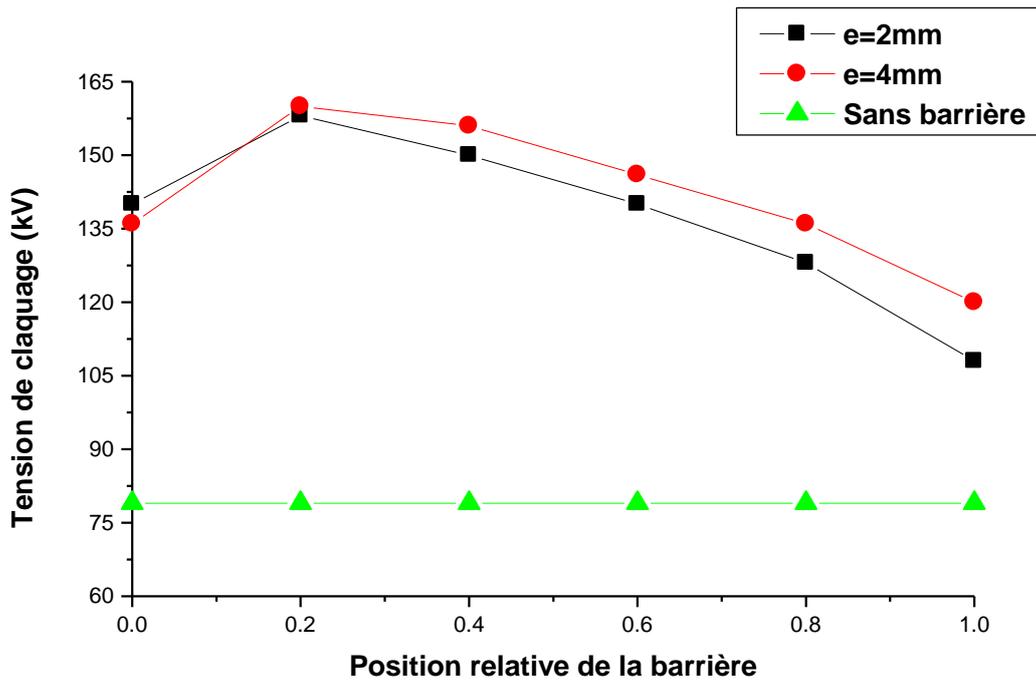
Figure(III.49): Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur de la barrière en bakélite, pour différentes positions (d=12cm, D=14cm)



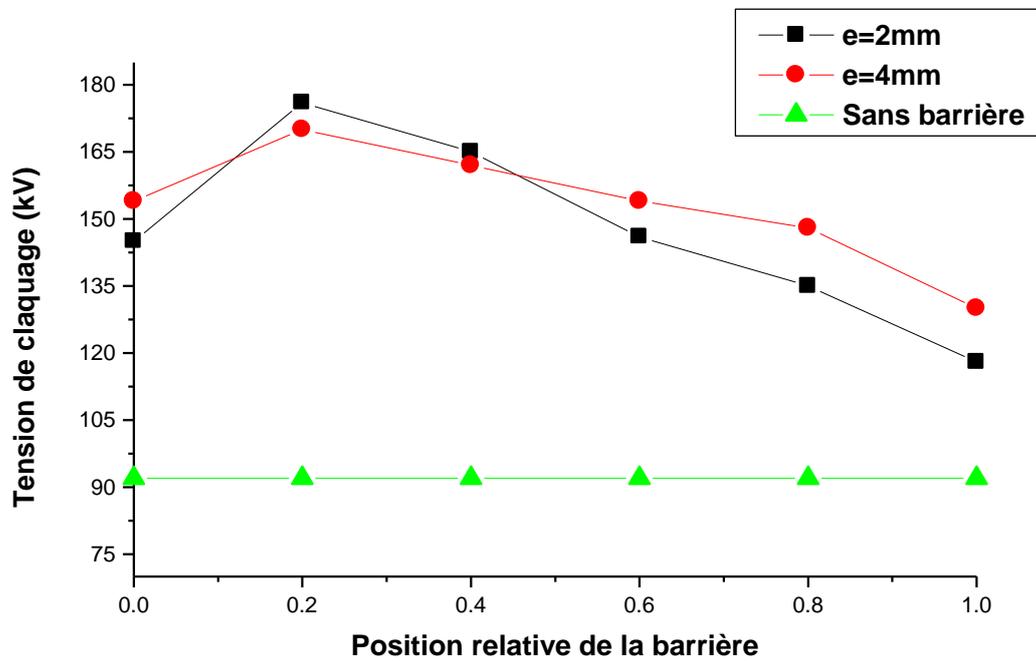
Figure(III.50): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=4cm, D=20cm)



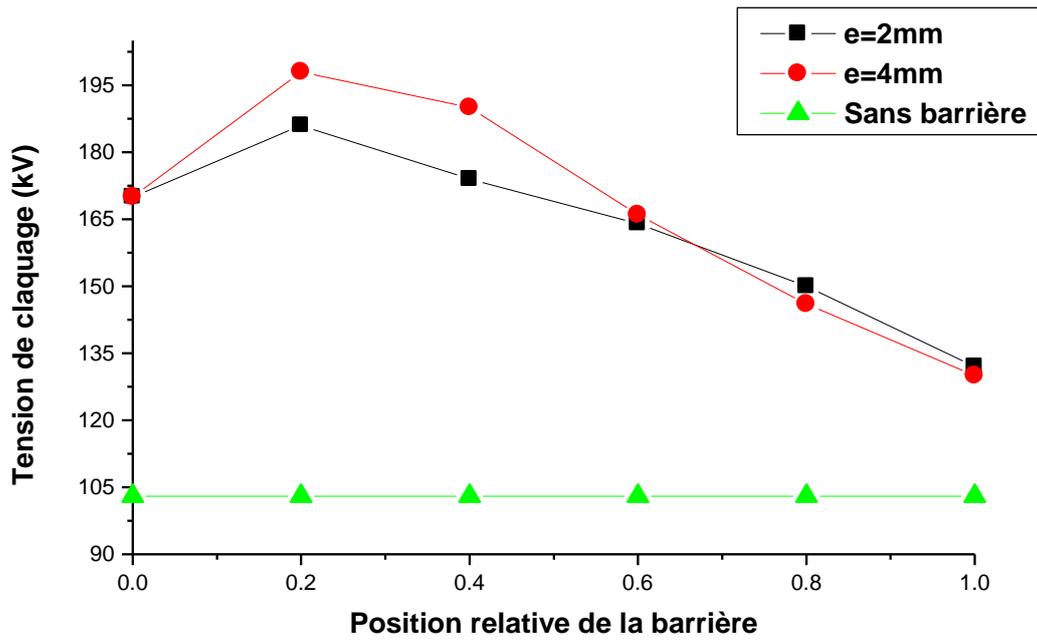
Figure(III.51): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=6cm, D=20cm)



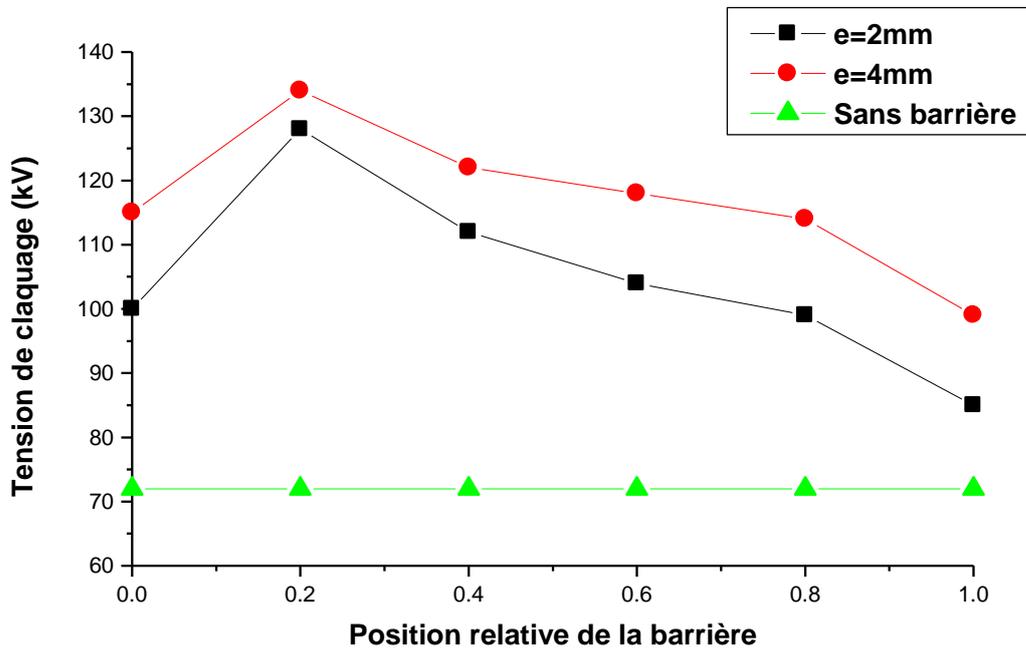
Figure(III.52): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=8cm, D=20cm)



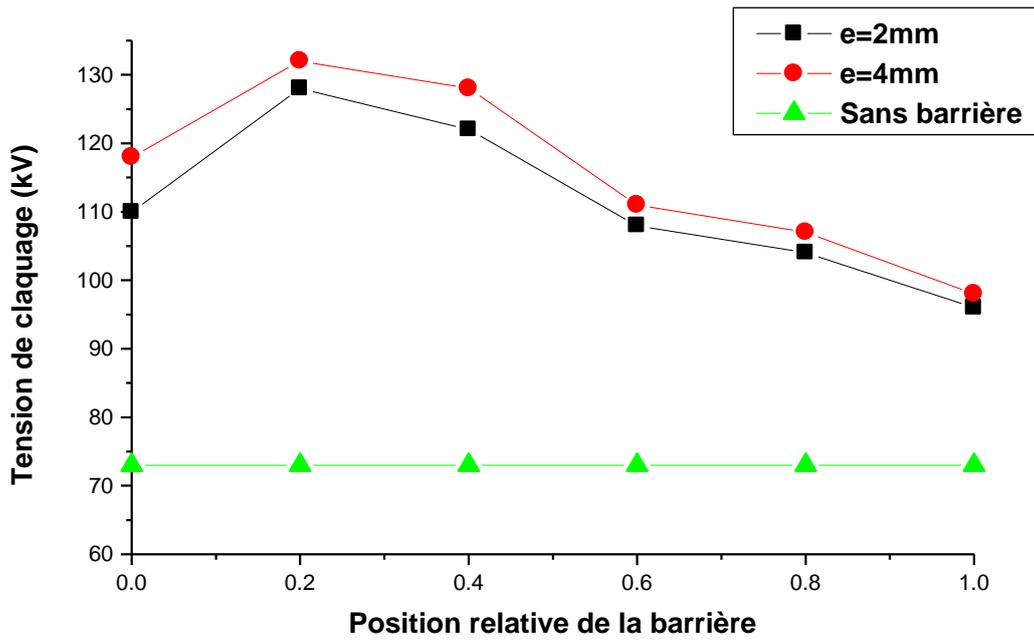
Figure(III.53): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=10cm, D=20cm)



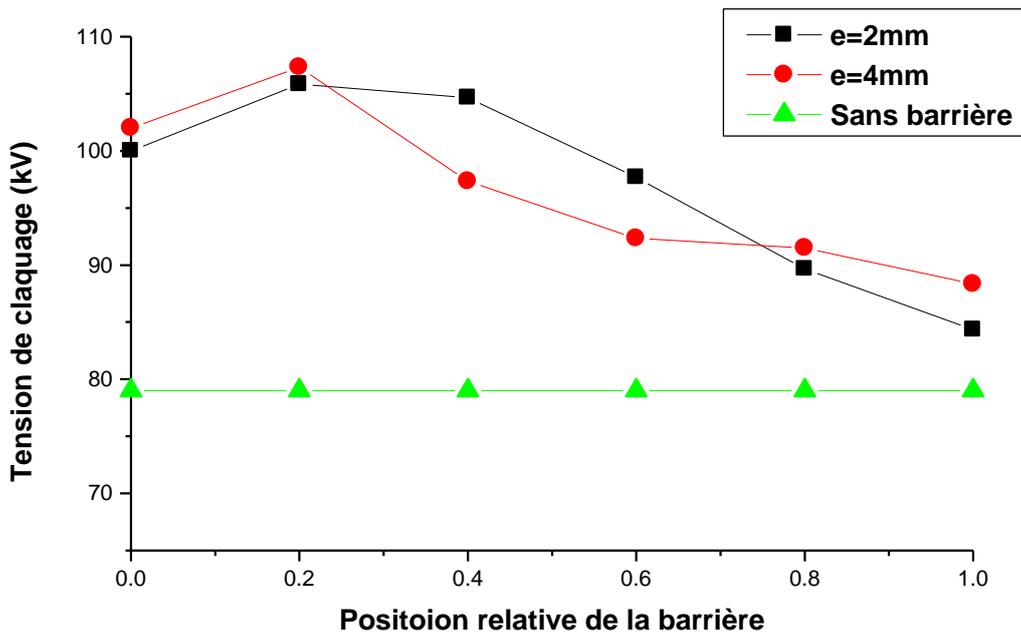
Figure(III.54): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=12cm, D=20cm)



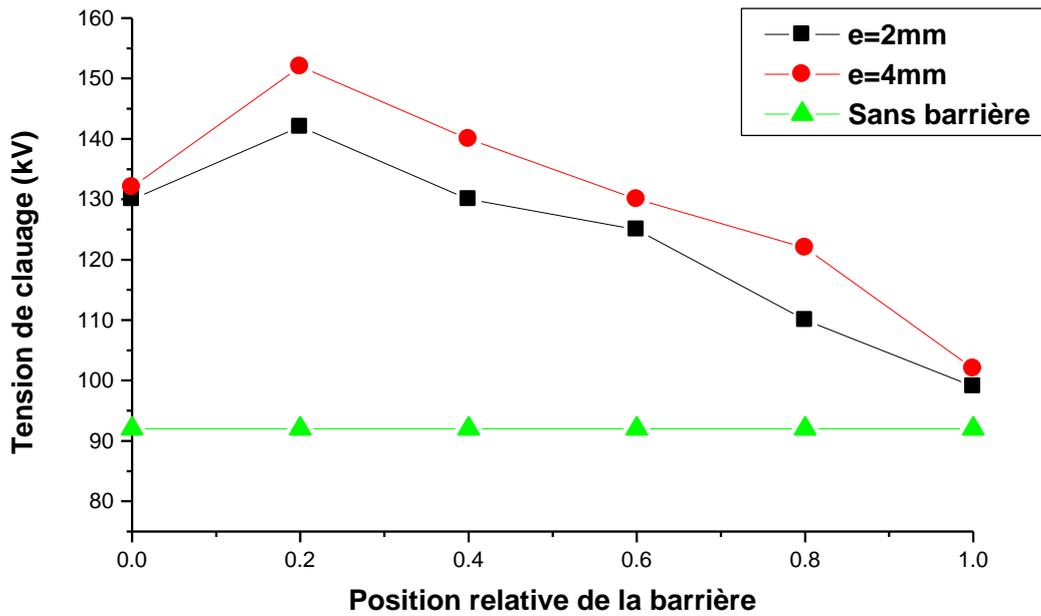
Figure(III.55): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=4cm, D=10cm)



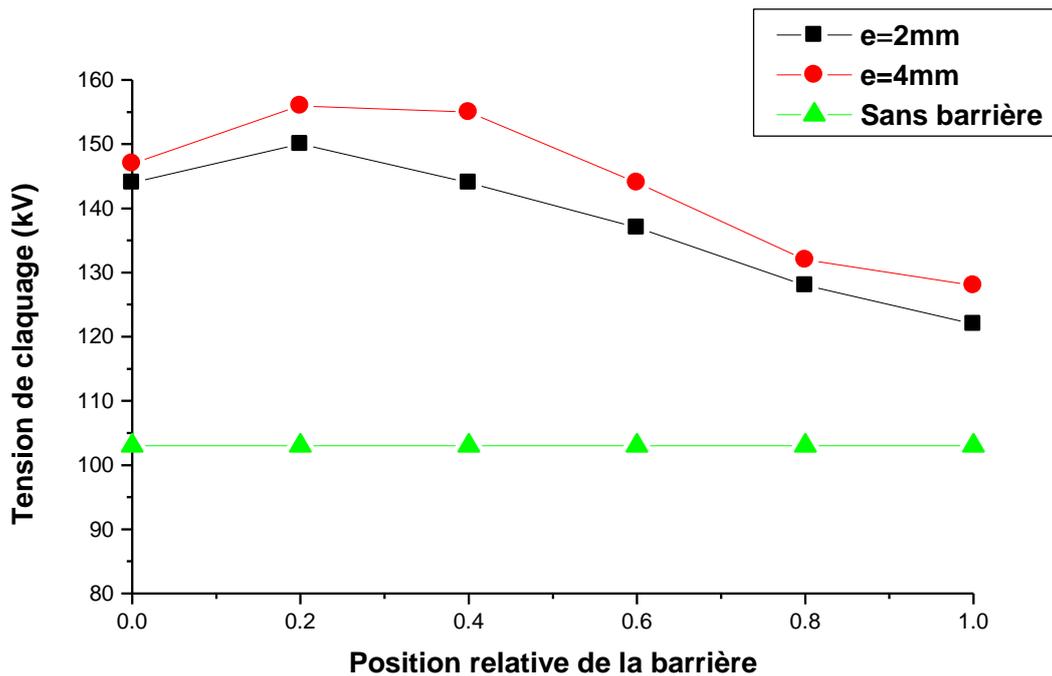
Figure(III.56): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=6cm, D=10cm)



Figure(III.57): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=8cm, D=10cm)



Figure(III.58): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=10cm, D=10cm)

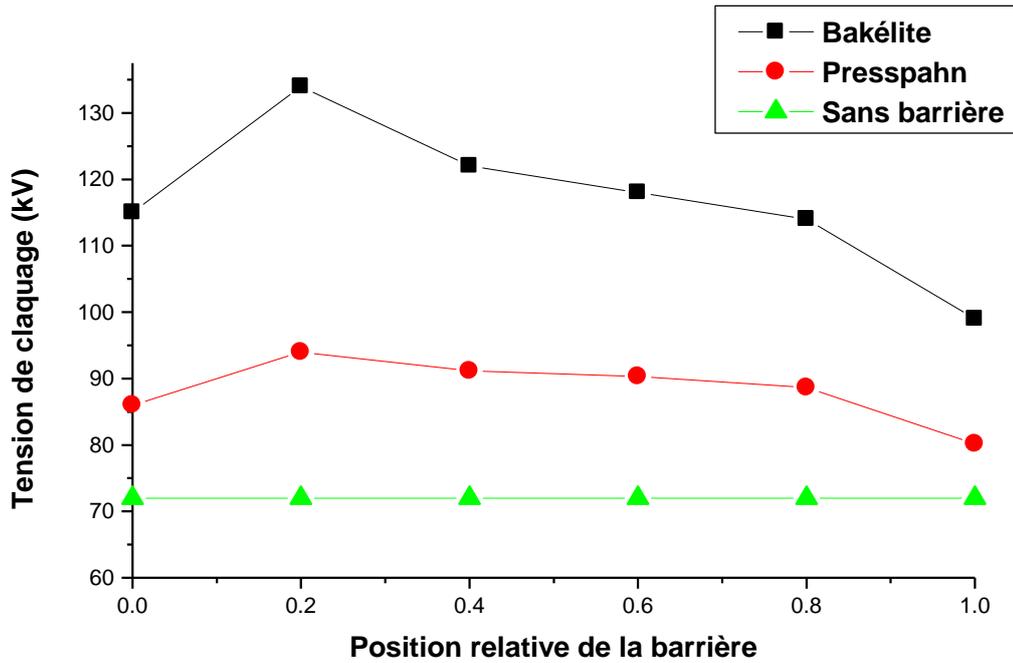


Figure(III.59): Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière en bakélite pour différentes positions (d=12cm, D=10cm)

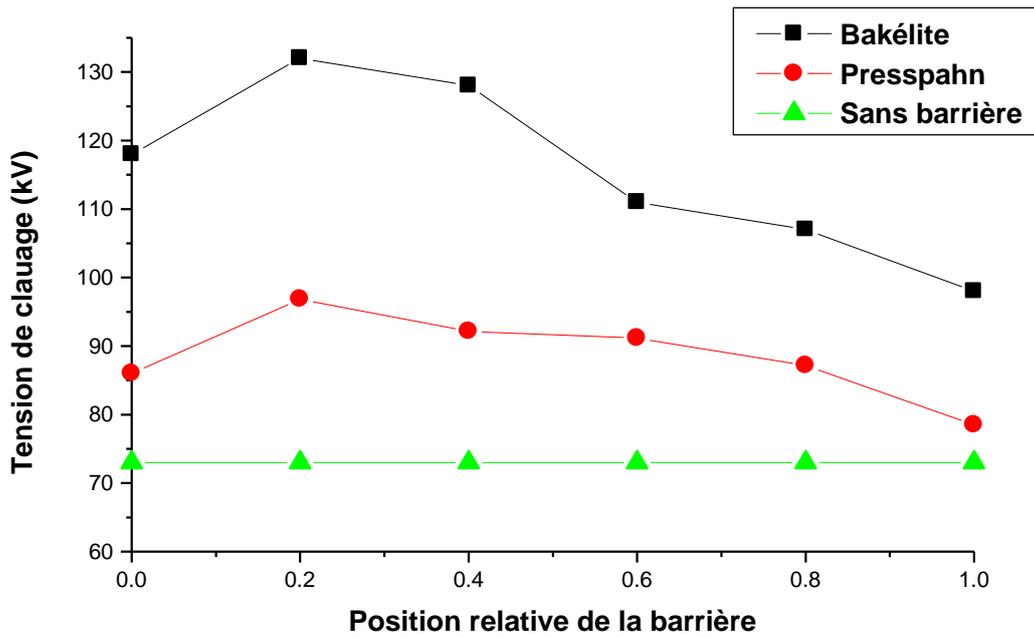
### III.3.3.3 Influence de la nature de la barrière

L'efficacité est définie comme étant le rapport de la tension de claquage en présence de la barrière à celle sans barrière  $U_{ab}/U_{sb}$ . Les figures (III.60 à 89) illustrent la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière, pour les deux natures, épaisseurs et différentes distances inter électrodes.

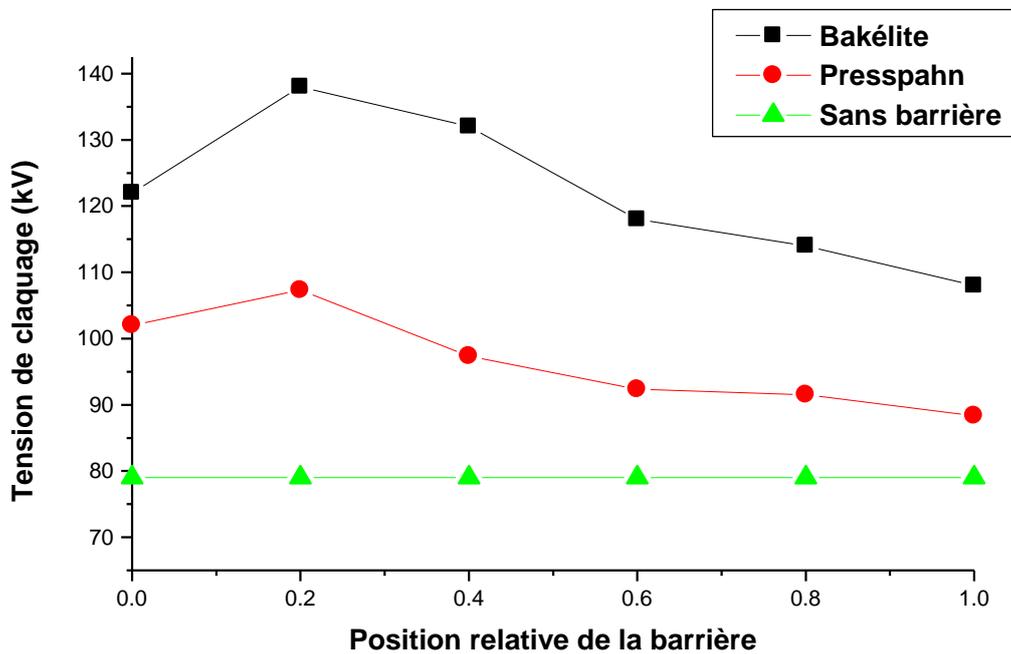
Il apparaît qu'une barrière en bakélite est plus efficace que celle en presspahn, même lorsqu'on augmente la distance inter-électrodes; par la suite on peut dire qu'en plus de la grande résistance mécanique de la bakélite, sa permittivité ( $\epsilon_r = 5$ ) et ses pertes diélectrique sont supérieures à celles du press-pahn ( $\epsilon_r = 3$ ) (la tension de claquage augmente en fonction de l'augmentation de la constante d'électrique) [4, 56]. Ceci est du au fait que le champ électrique est plus important quand la différence entre la permittivité relative de la barrière et celle de l'huile est importante. Cette efficacité est d'autant plus importante que la barrière est proche de la pointe, elle est maximale pour la position 20%, pour les deux natures de la barrière.



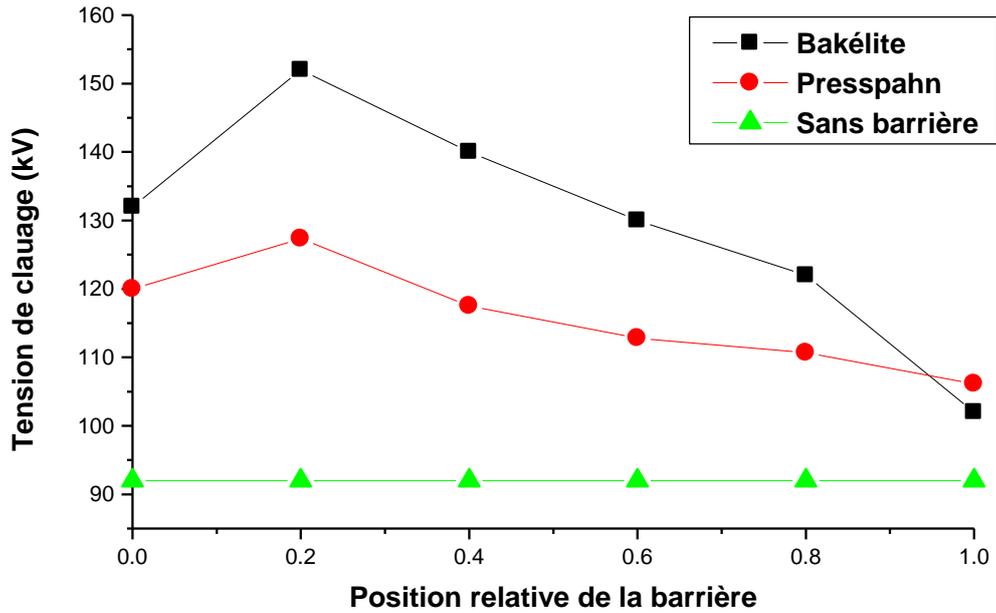
**Figure(III.60):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=10\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ )



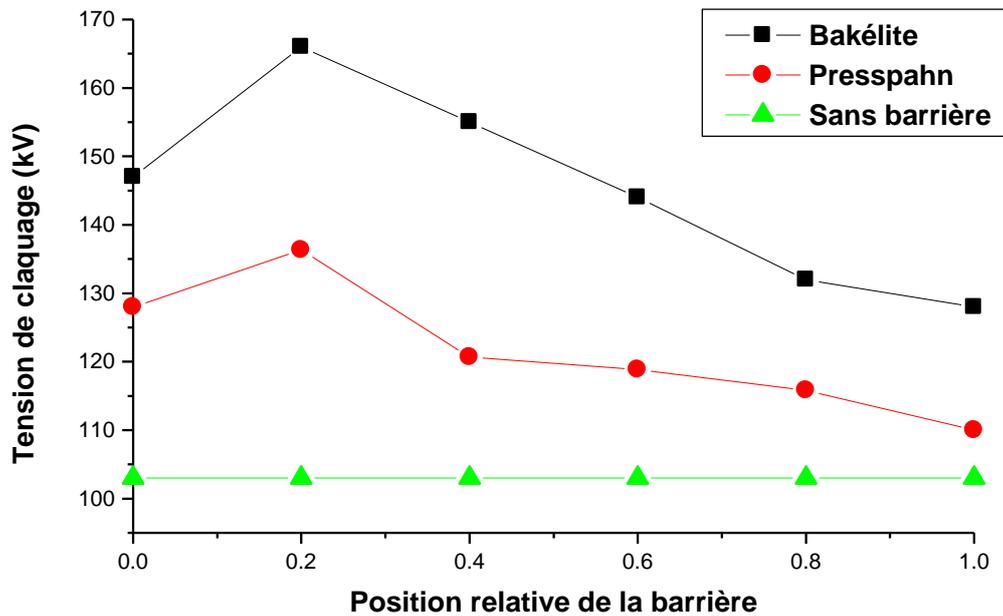
Figure(III.61): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=10cm ,d=6cm)



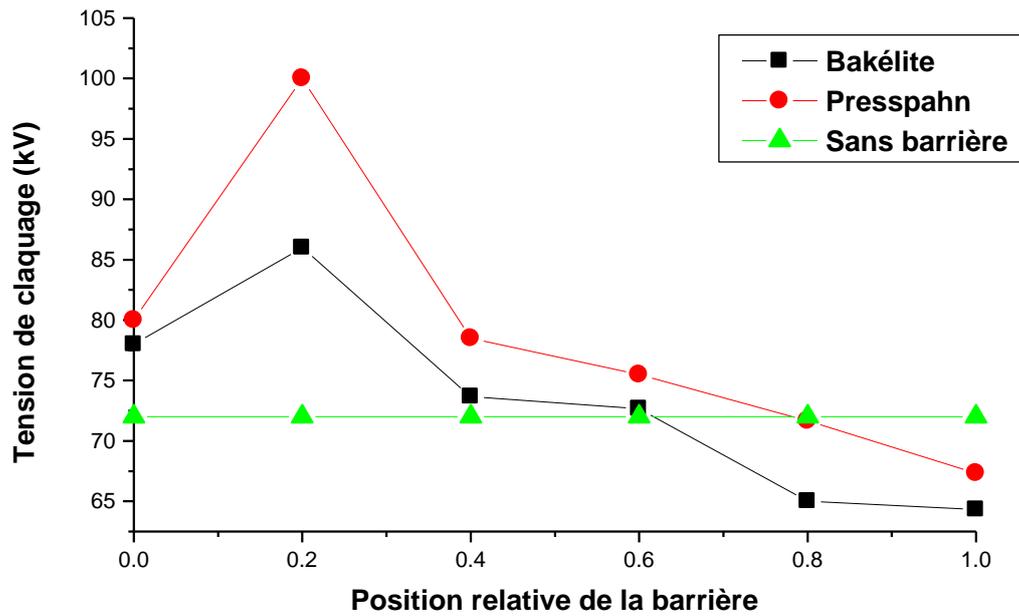
Figure(III.62): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=10cm, d=8cm)



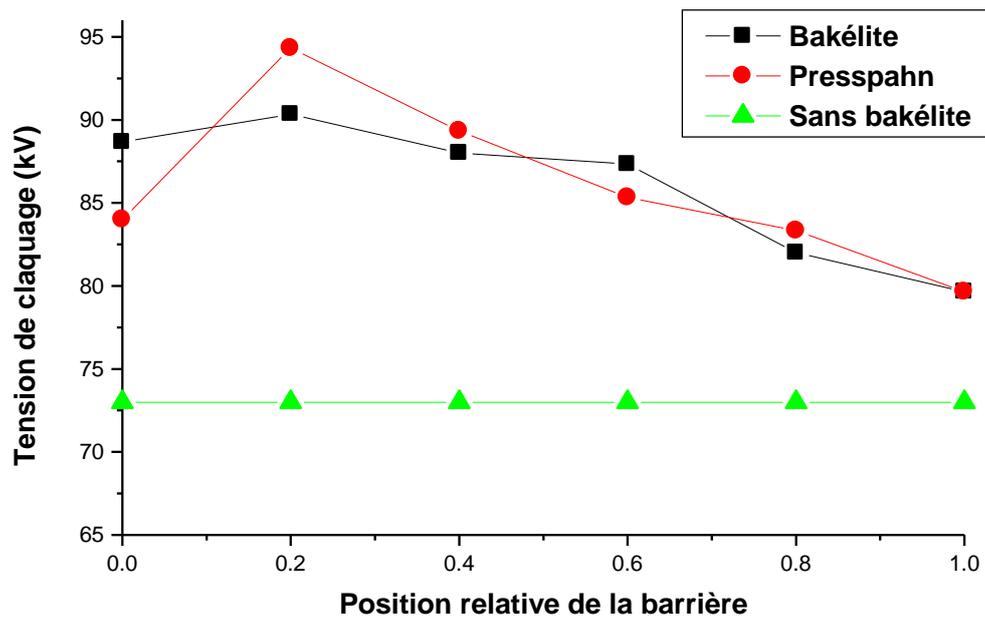
Figure(III.63): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=10cm, d=10cm)



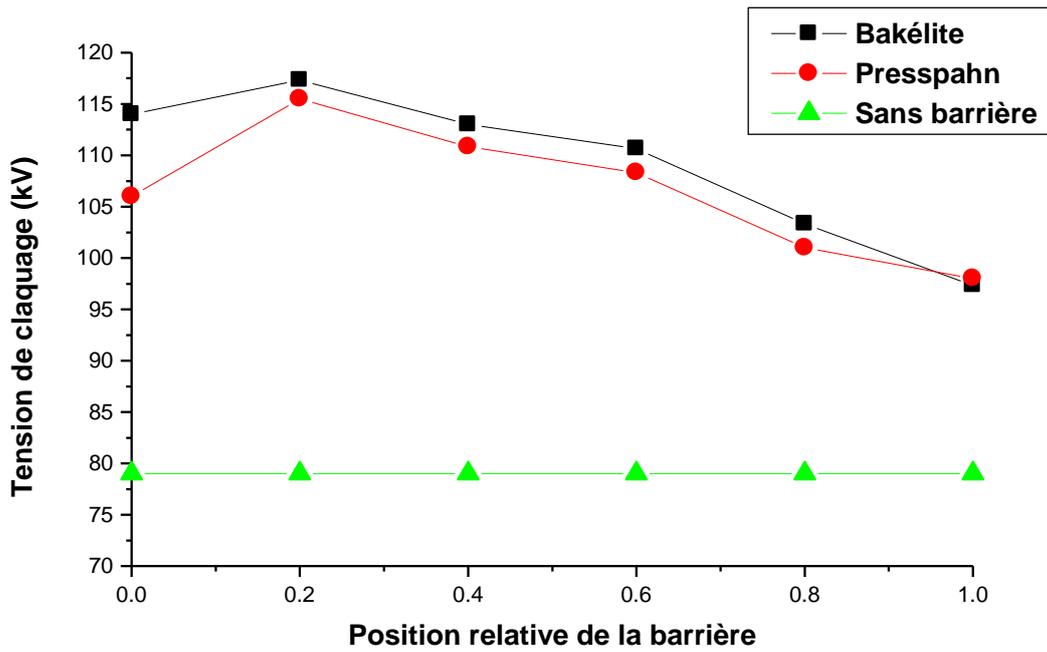
Figure(III.64): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=10cm, d=12cm)



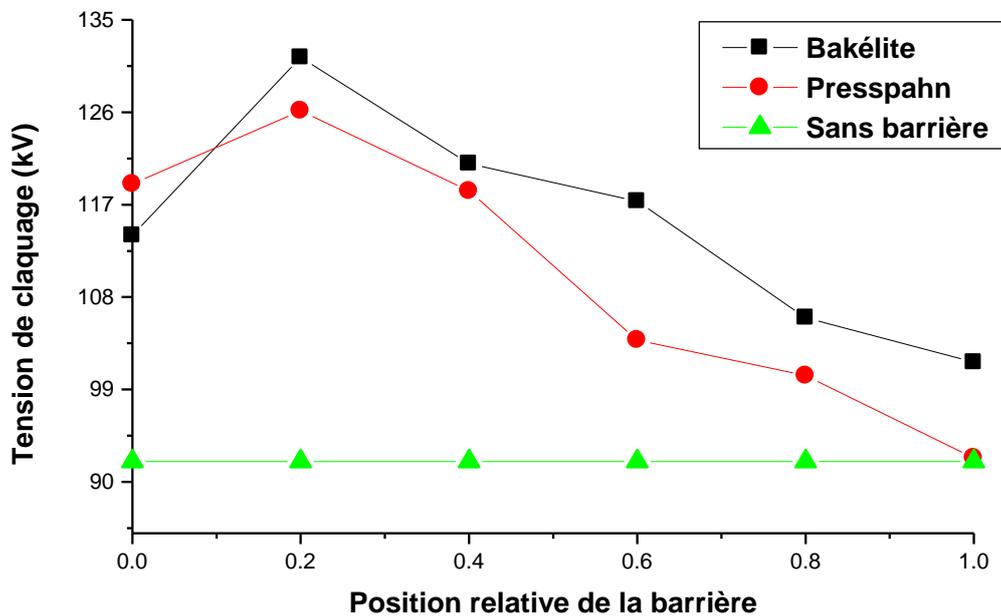
Figure(III.65): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ )



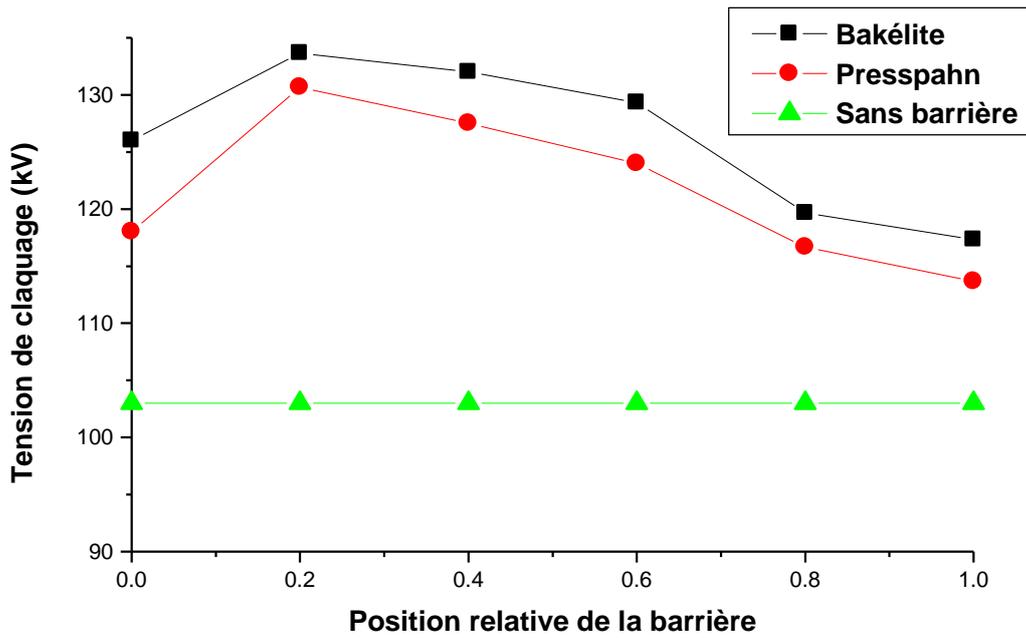
Figure(III.66): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ )



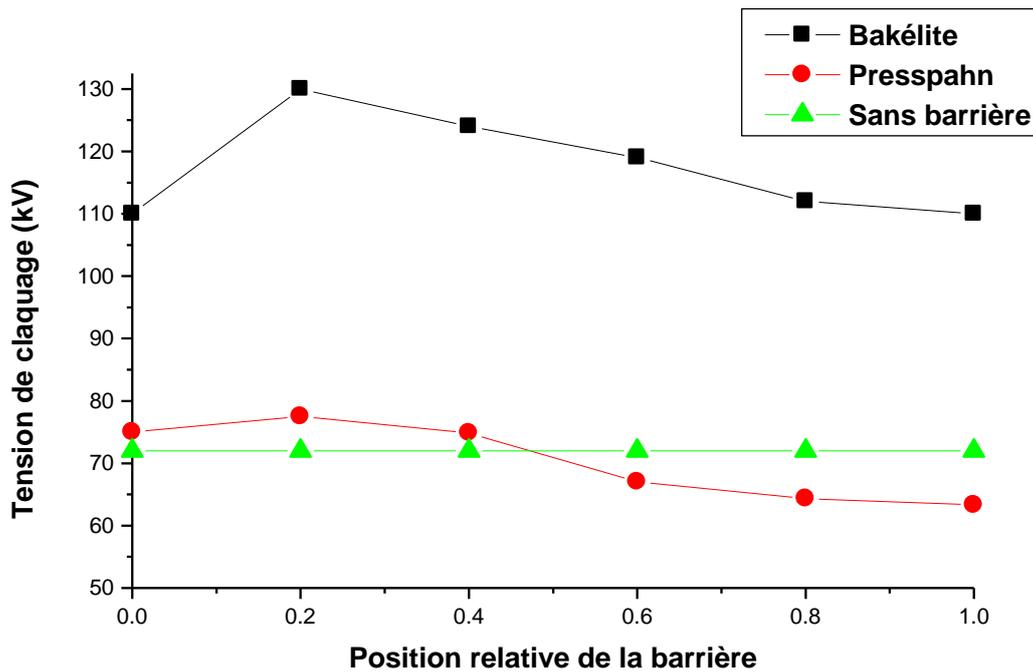
Figure(III.67): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ )



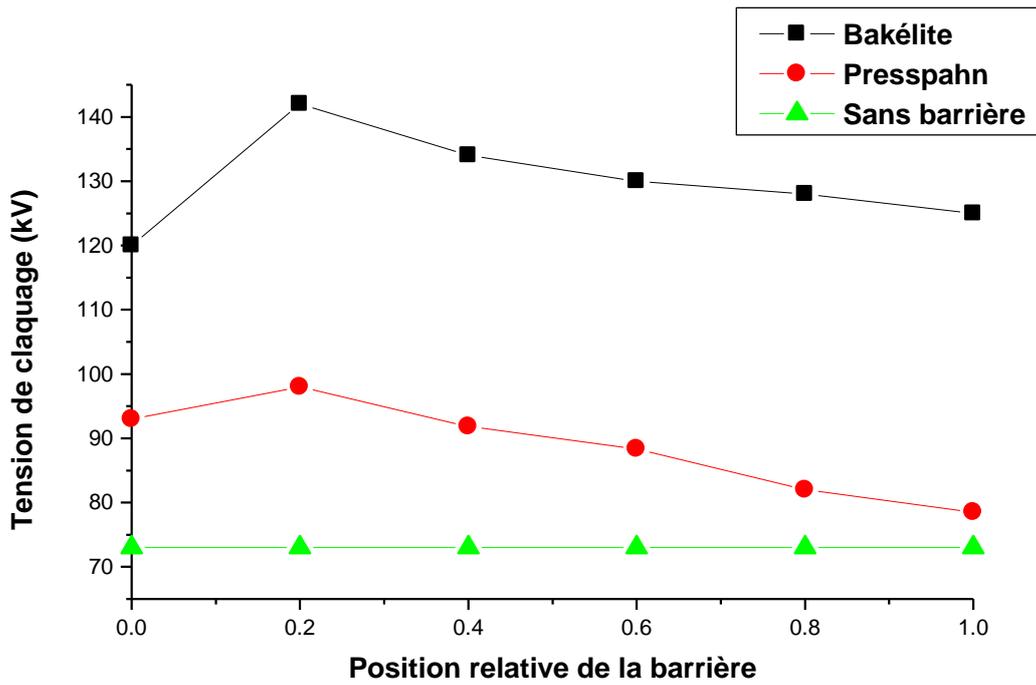
Figure(III.68): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=10\text{cm}$ )



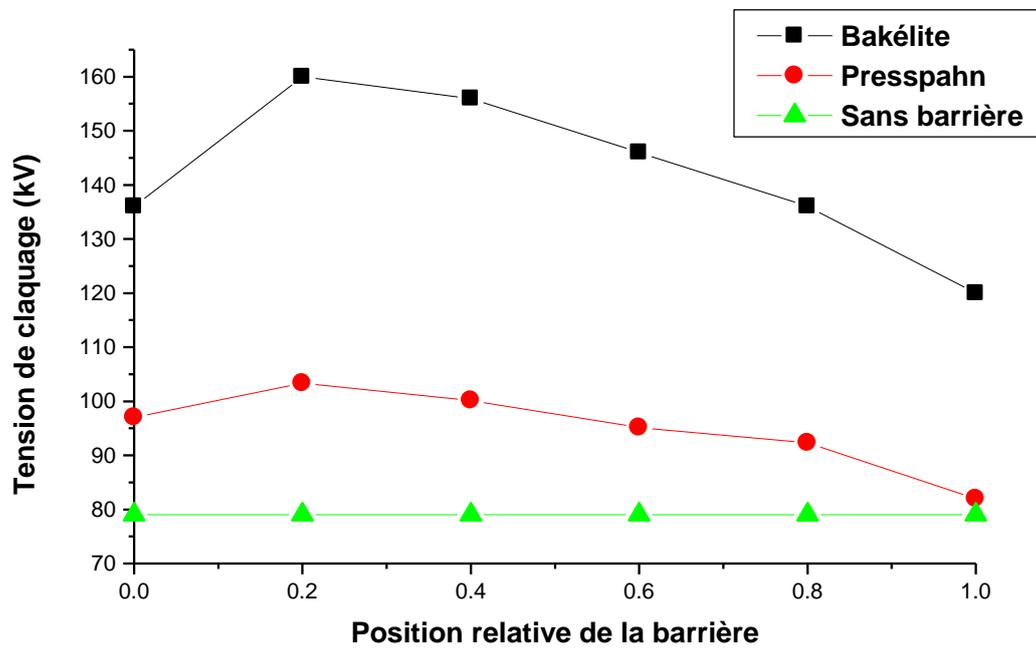
Figure(III.69): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=14cm, d=12cm)



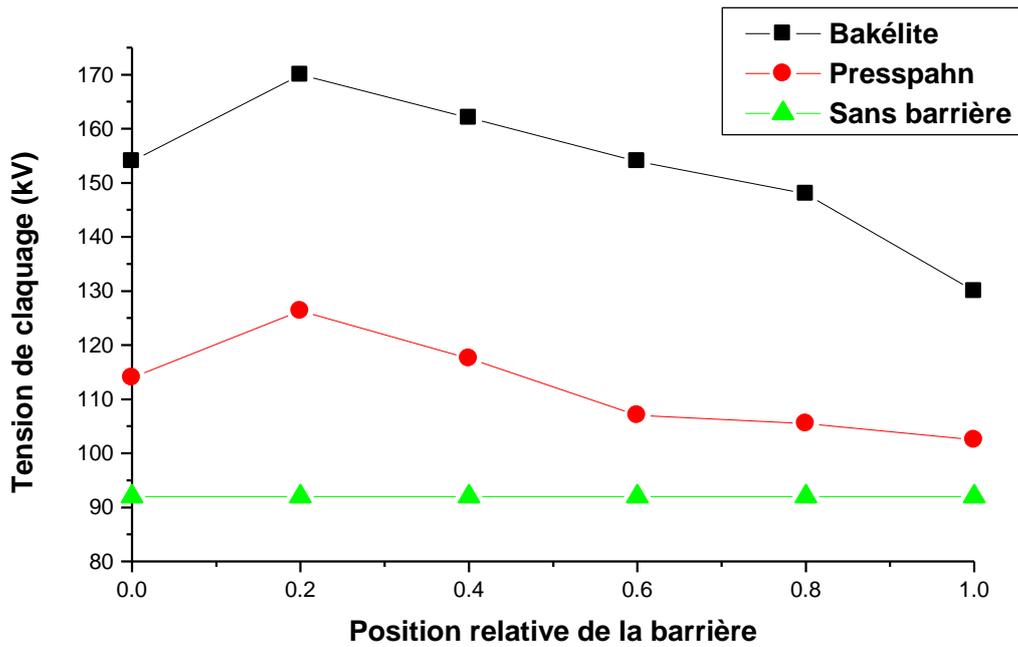
Figure(III.70): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=20cm, d=4cm)



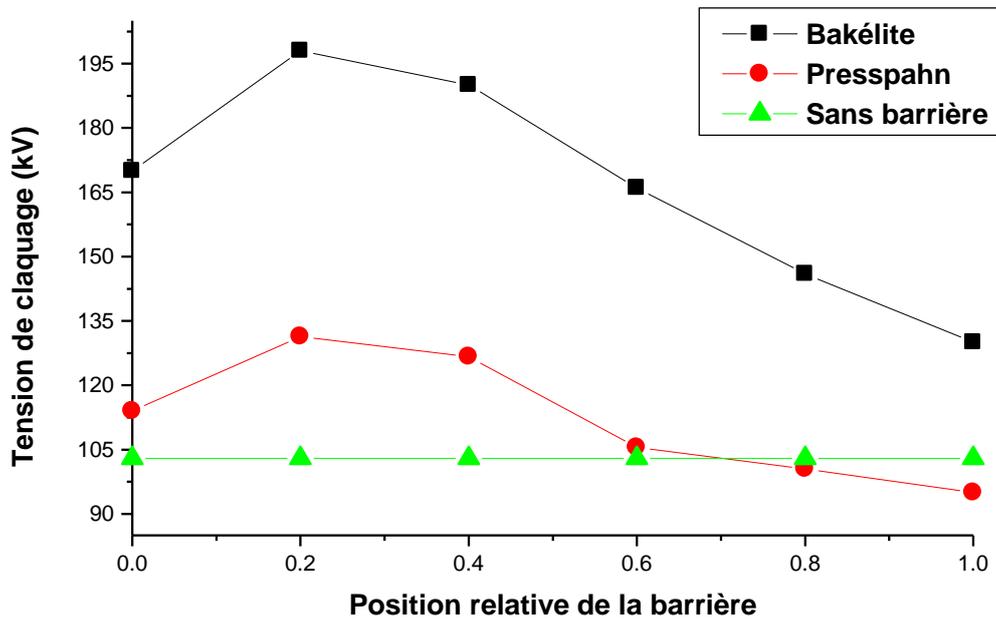
**Figure(III.71):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=20cm, d=6cm)



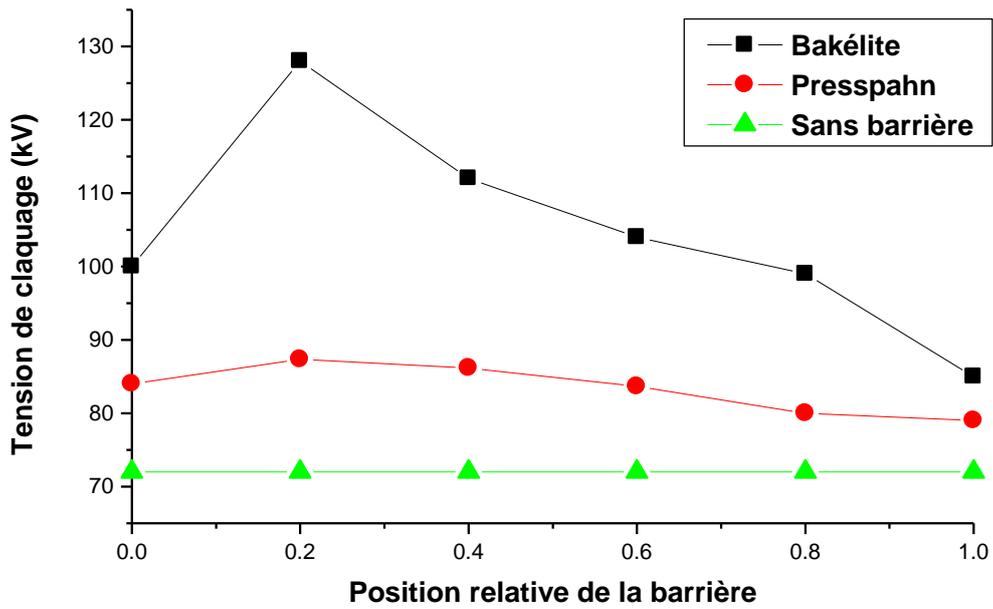
**Figure(III.72):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=20cm, d=8cm)



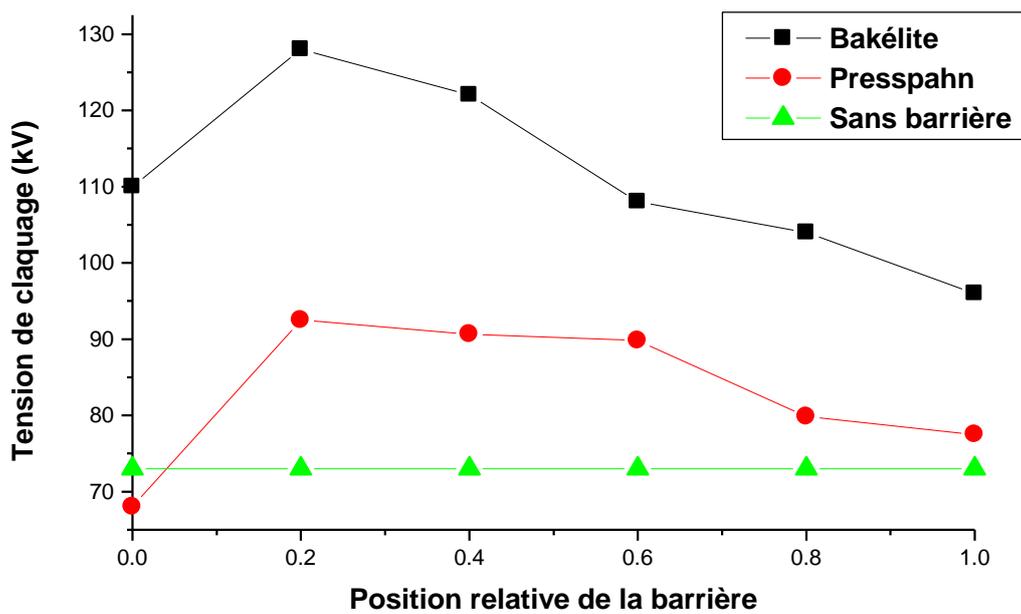
**Figure(III.73):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=20cm, d=10cm)



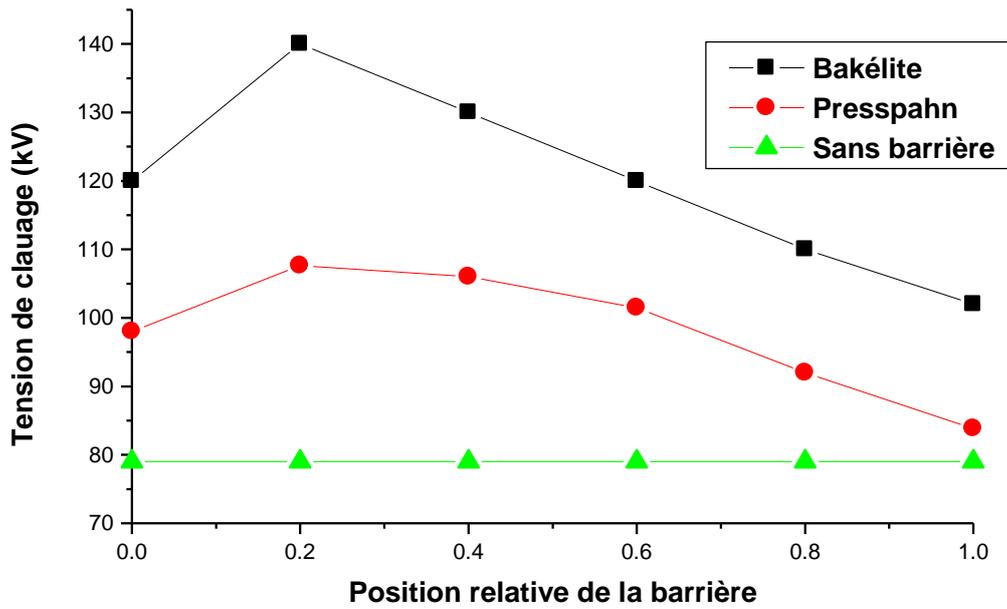
**Figure(III.74):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=4mm, D=20cm, d=12cm)



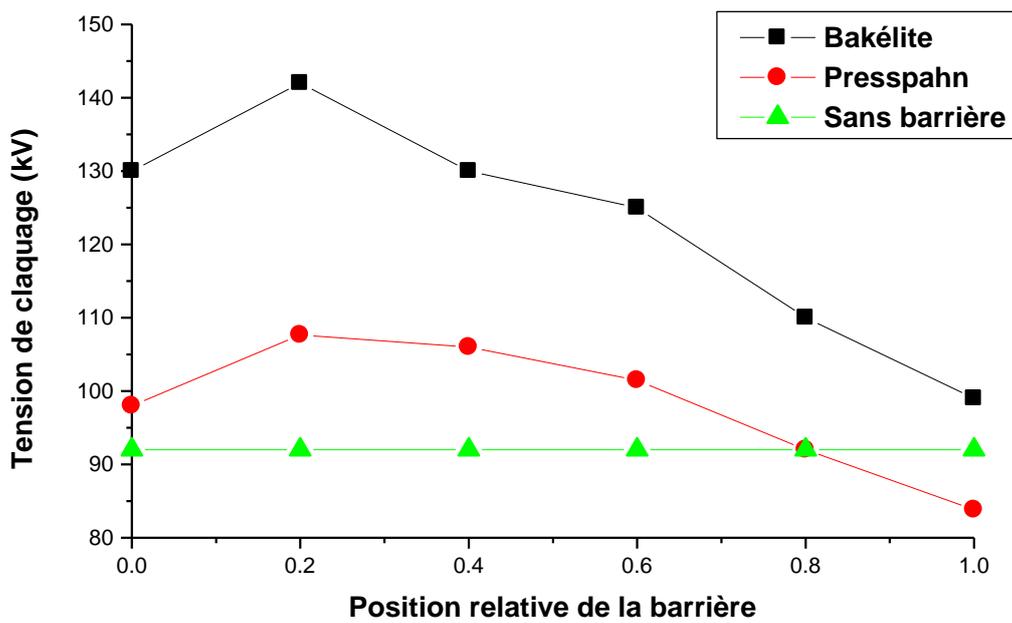
Figure(III.75): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=10cm, d=4cm)



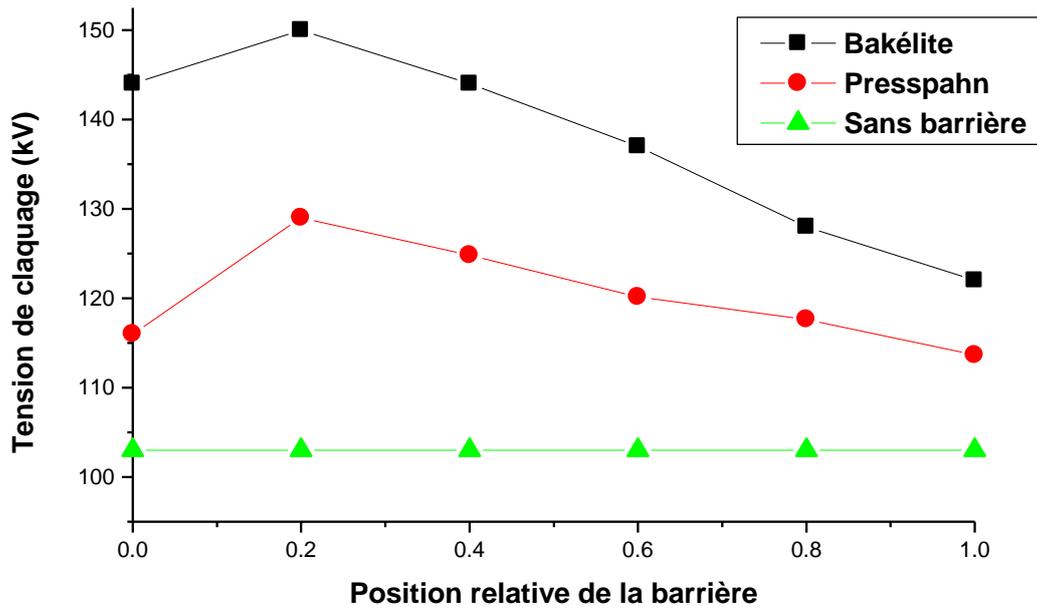
Figure(III.76): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=10cm, d=6cm)



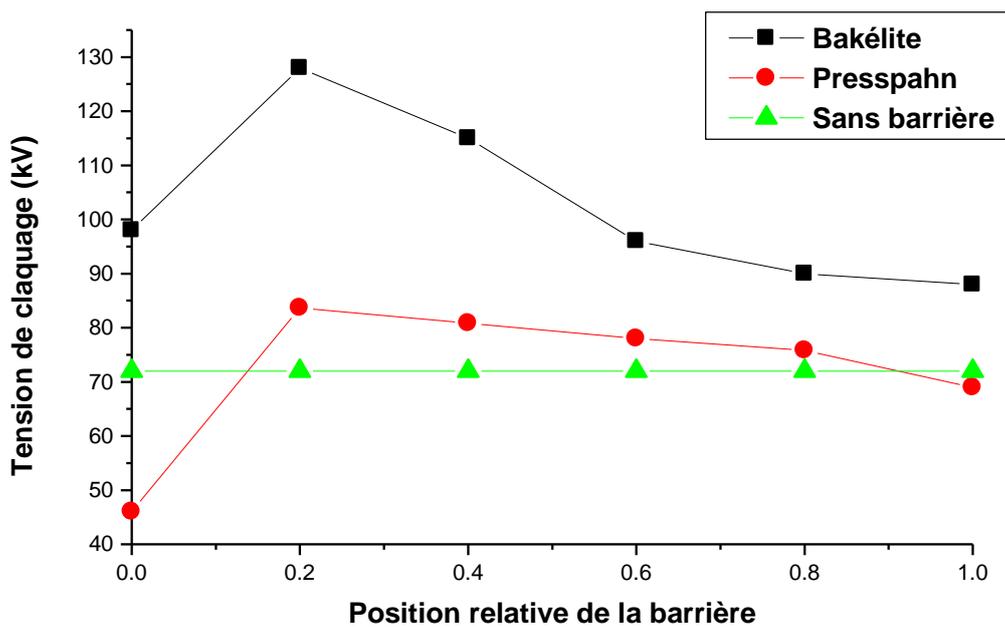
Figure(III.77): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=10cm, d=8cm)



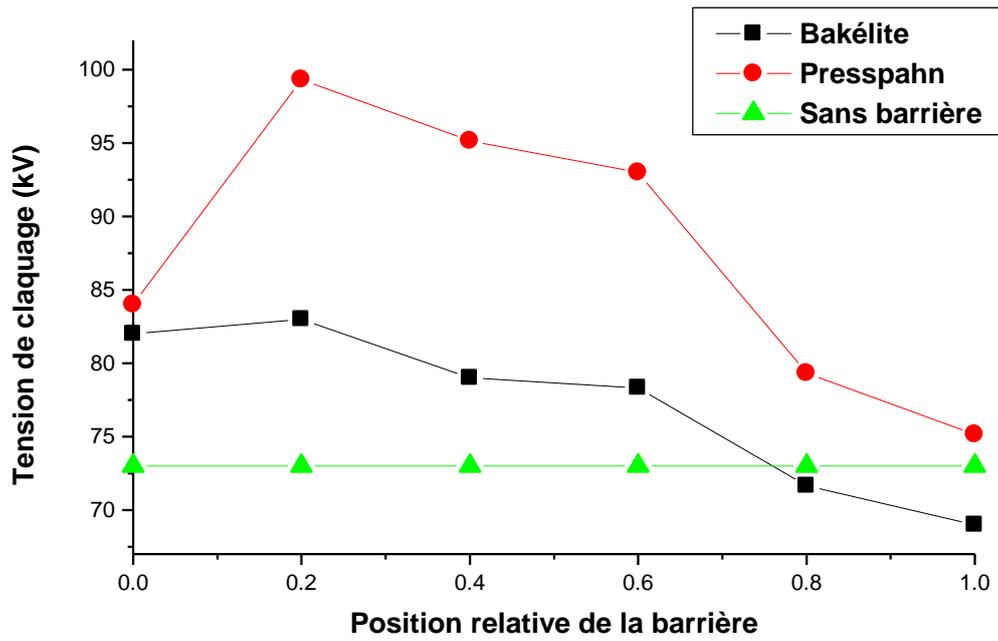
Figure(III.78): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=10cm, d=10cm)



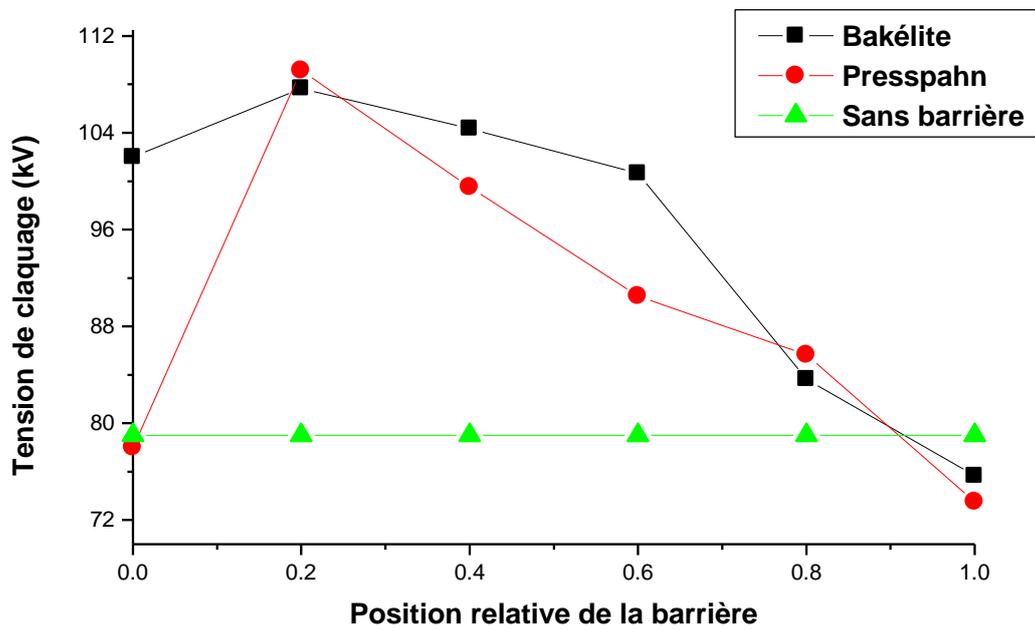
**Figure(III.79):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=10cm, d=12cm)



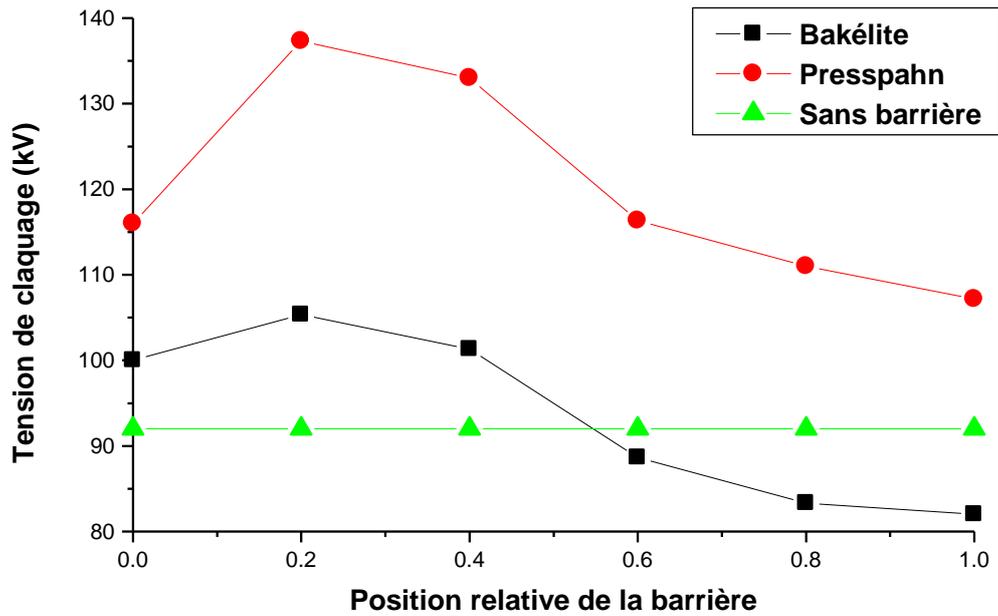
**Figure(III.80):** Variation de l'efficacité en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=14cm, d=4cm)



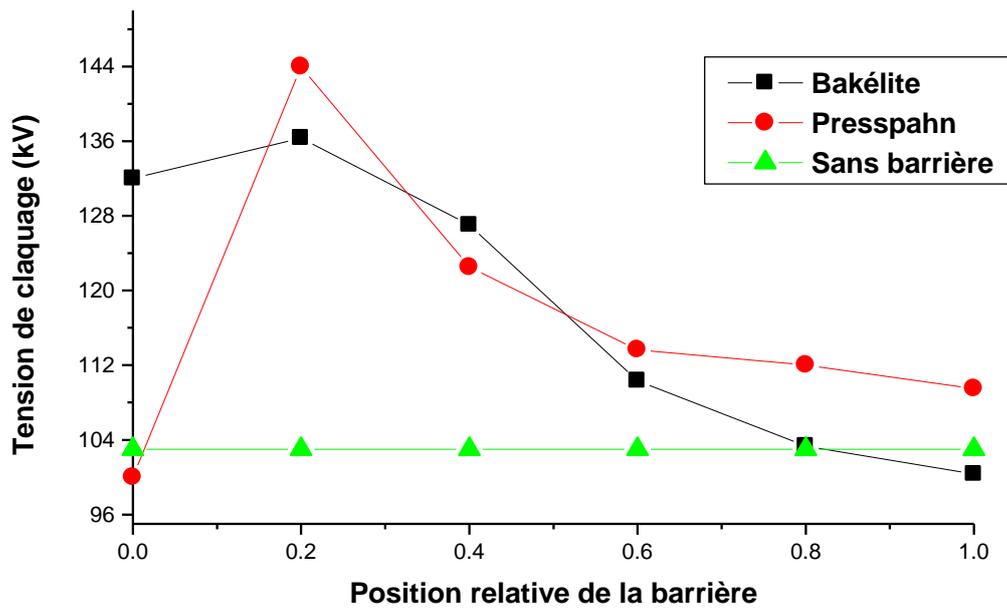
Figure(III.81): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ )



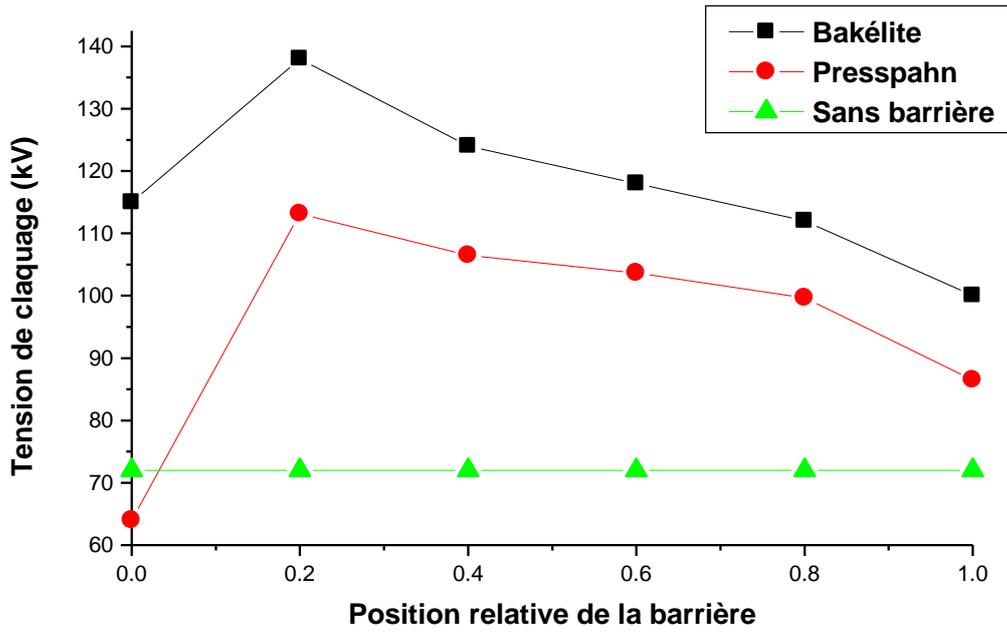
Figure(III.82): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures et épaisseurs ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ )



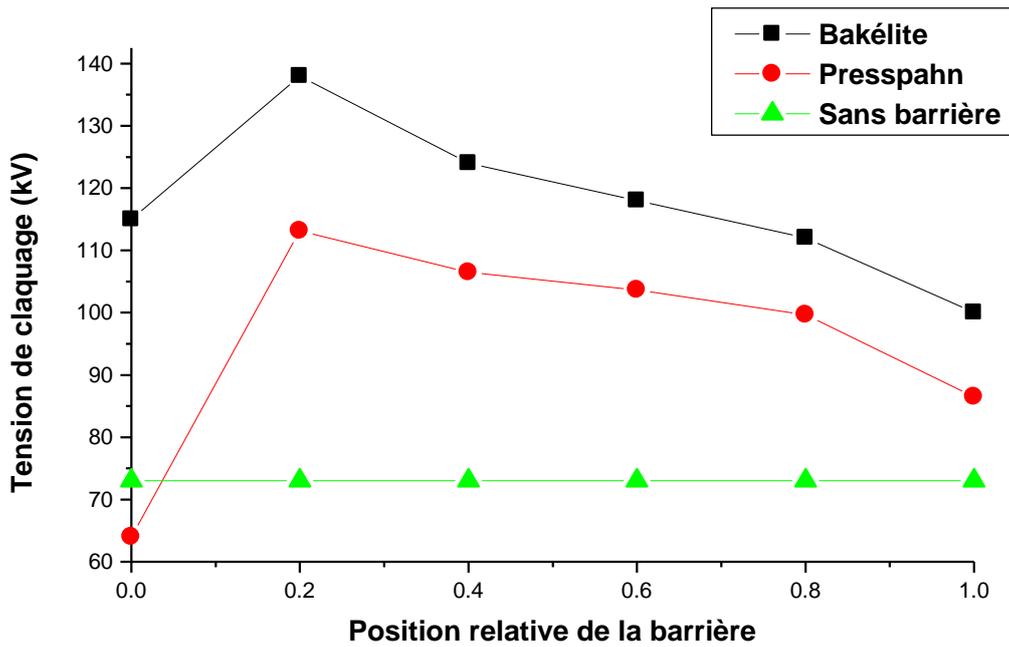
Figure(III.83): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=14cm, d=10cm)



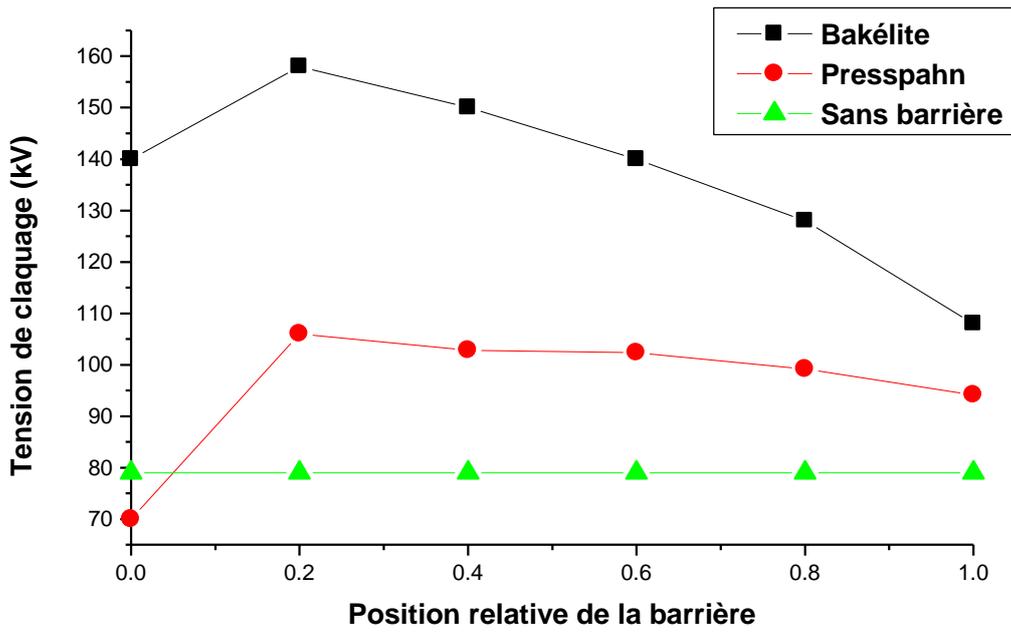
Figure(III.84): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=14cm, d=12cm)



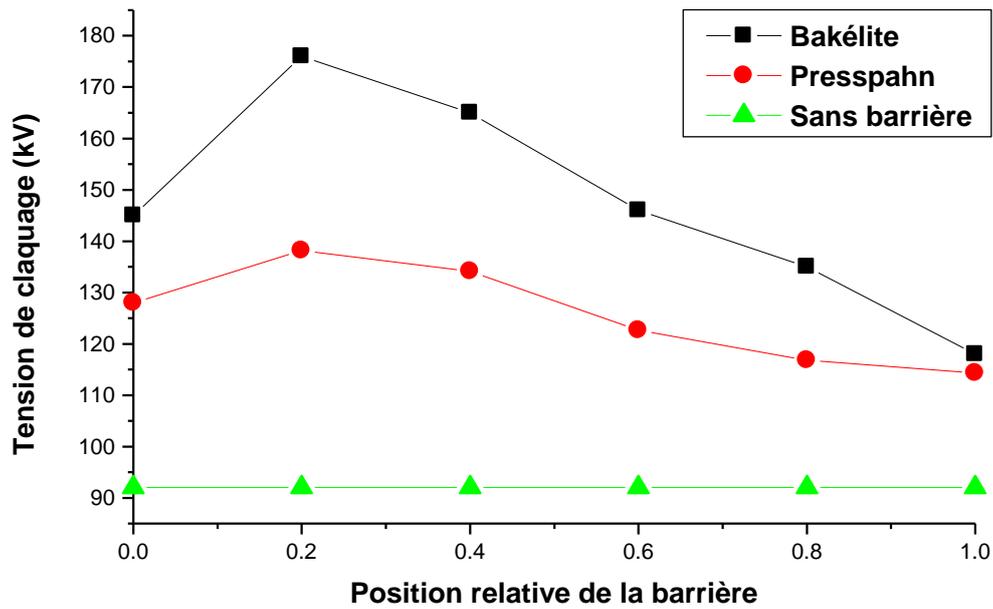
Figure(III.85): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ ,  $d=4\text{cm}$ )



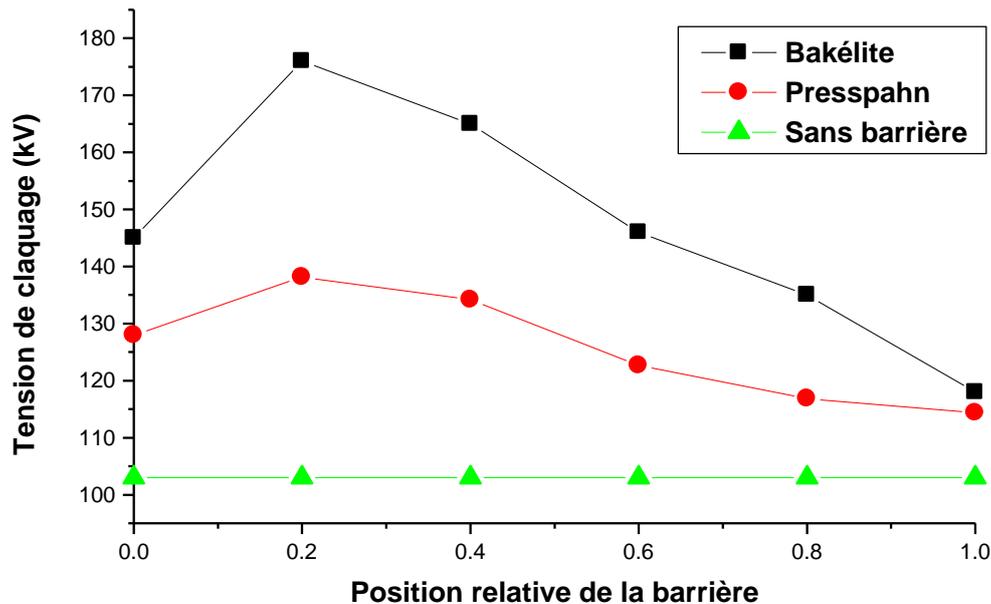
Figure(III.86): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ ,  $d=6\text{cm}$ )



Figure(III.87): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=20cm, d=8cm)



Figure(III.88): Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures (e=2mm, D=20cm, d=10cm)



**Figure(III.89):** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, en différentes natures ( $e=2\text{mm}$ ,  $D=20\text{cm}$ ,  $d=12\text{cm}$ )

### III.4 Mesure du Courant

#### III.4.1 Essais sans barrière

Dans cette partie d'essais, nous nous sommes intéressés à déterminer la tension  $U_{50\%}$  de décharge disruptive (claquage), nous avons opté pour ces niveaux de tension afin d'éviter les décharges disruptives au niveau de l'oscilloscope. Une série de mesures sans barrière est obtenue en faisant varier la tension avec un pas de  $5\text{kV}$ , les paliers de tension appliquée suivant les distances interélectrodes ne permettent pas l'établissement de décharge partielle. Pour chaque niveau de tension et pour chaque distance inter-électrodes, le signal est enregistré sur l'oscilloscope et les mesures du courant de préclaquage sont notées. La valeur efficace du courant prise est la moyenne arithmétique de six valeurs.

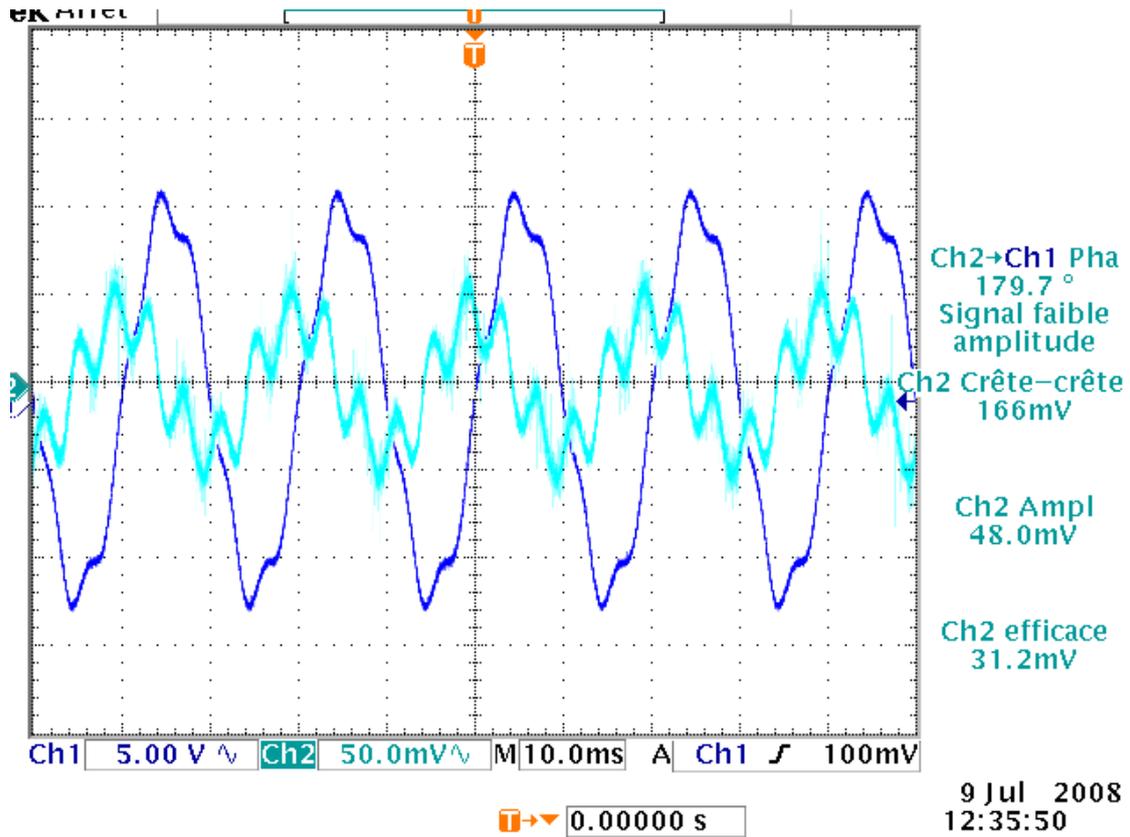
##### III.4.1.1 Forme du courant

Le courant obtenu est un signal périodique qui présente des "déformations". Ces dernières se présentent sous la forme de pics au niveau de la valeur crête dans les deux alternances (positive et négative).

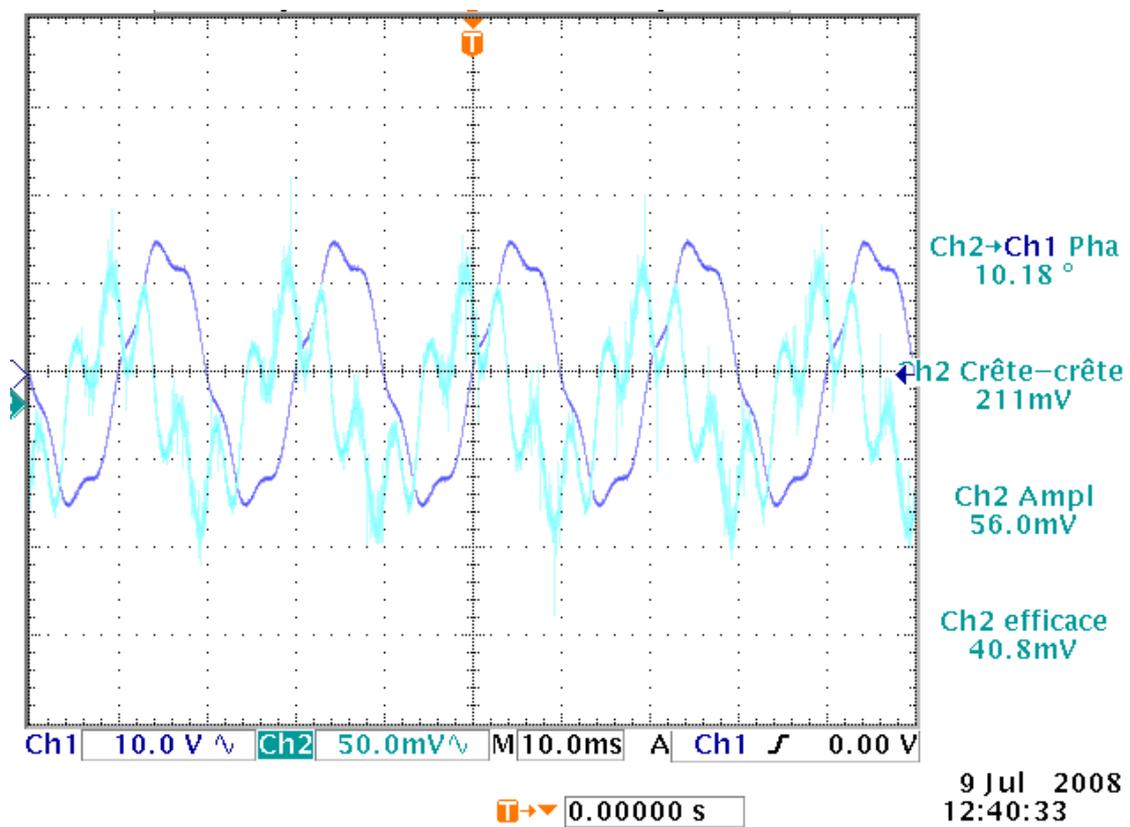
L'enregistrement des deux signaux, du courant et de la tension, permet de mesurer le déphasage entre leurs fondamentaux (la forme de la tension est souvent non sinusoïdale à cause de la saturation du circuit magnétique). Pour tous les niveaux des tensions appliquées et toutes les distances inter-électrodes, le courant est en avance de  $90^\circ$  sur la tension. Ce déphasage reflète le caractère purement capacitif du courant. Ce même résultat a été trouvé par d'autres chercheurs [3, 64].

A partir de cette caractéristique courant – tension, on peut penser à la tension de génération qui correspond à l'apparition d'une perturbation de l'état physique du liquide au voisinage de l'électrode pointe, mise à la borne haute tension. Lorsque la perturbation est générée, la capacité du milieu est altérée, ce qui provoque une variation de la proportionnalité entre le courant et la tension. Alors nous pouvons déterminer  $U_g$  lorsque le rapport  $(I/U)$  décroît [65].

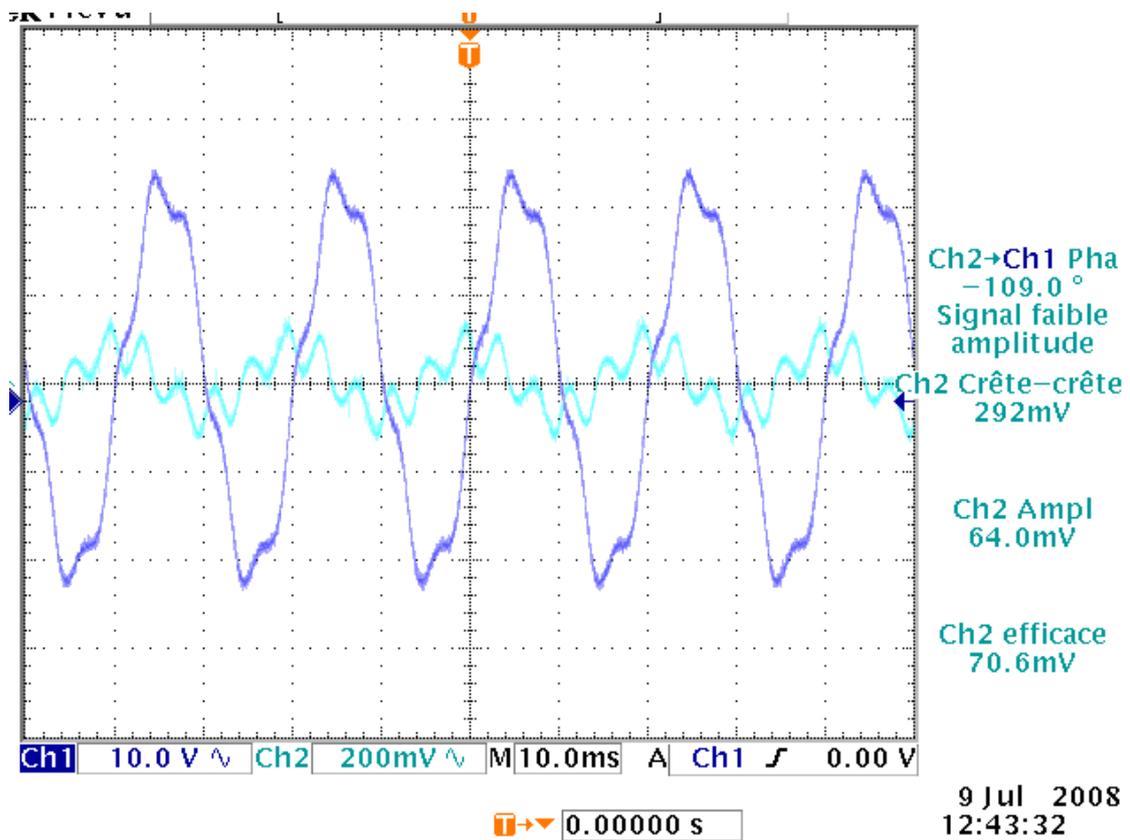
Les résultats obtenus sont en faveur de l'intervention d'une phase gazeuse, lors de la génération dans les diélectriques liquides sous tension alternative  $50\text{Hz}$  [3].



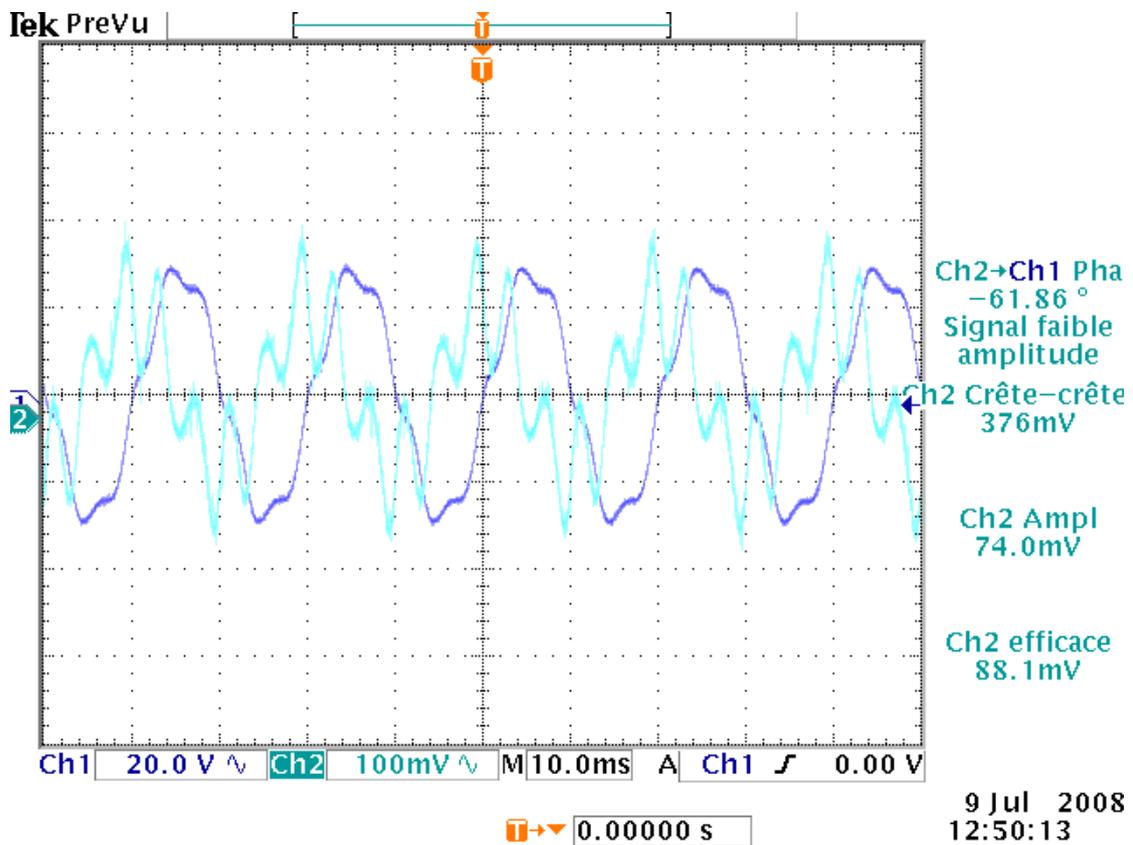
Figure(III.90): Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 5kV, d=4cm



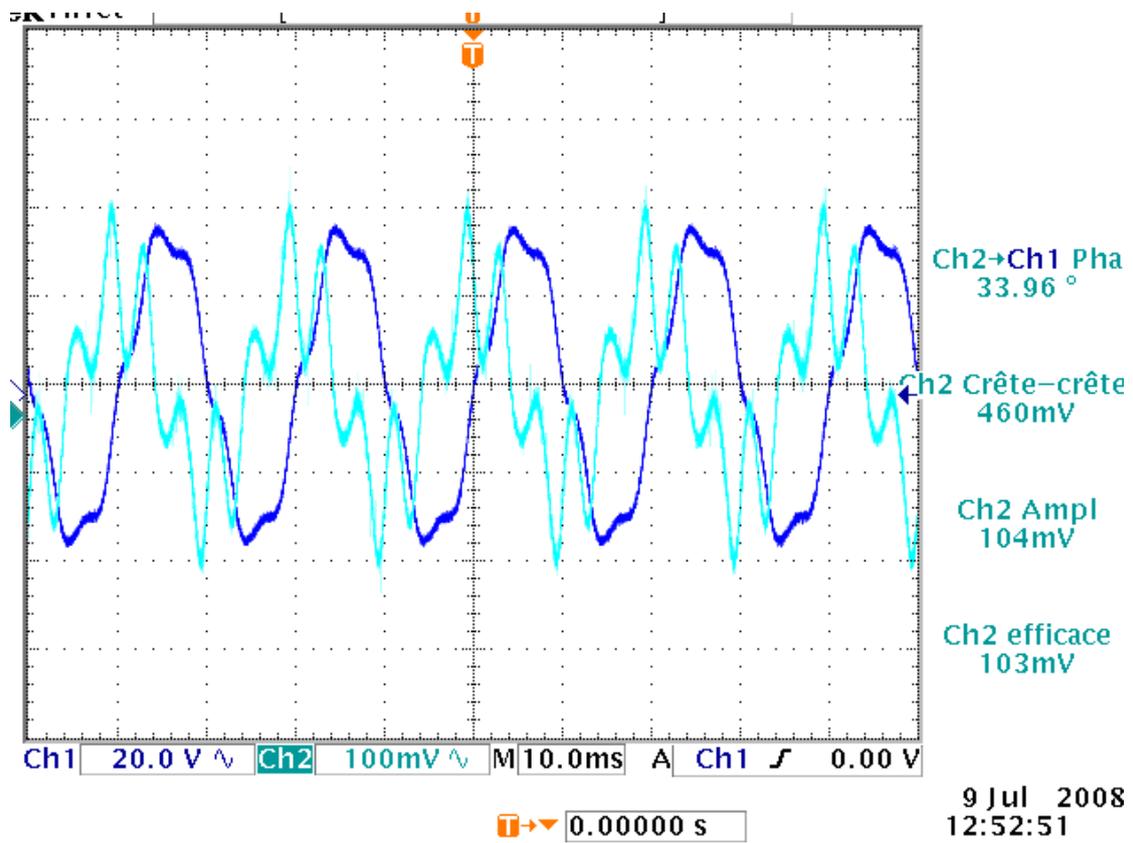
Figure(III.91): Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 10kV, d=4cm



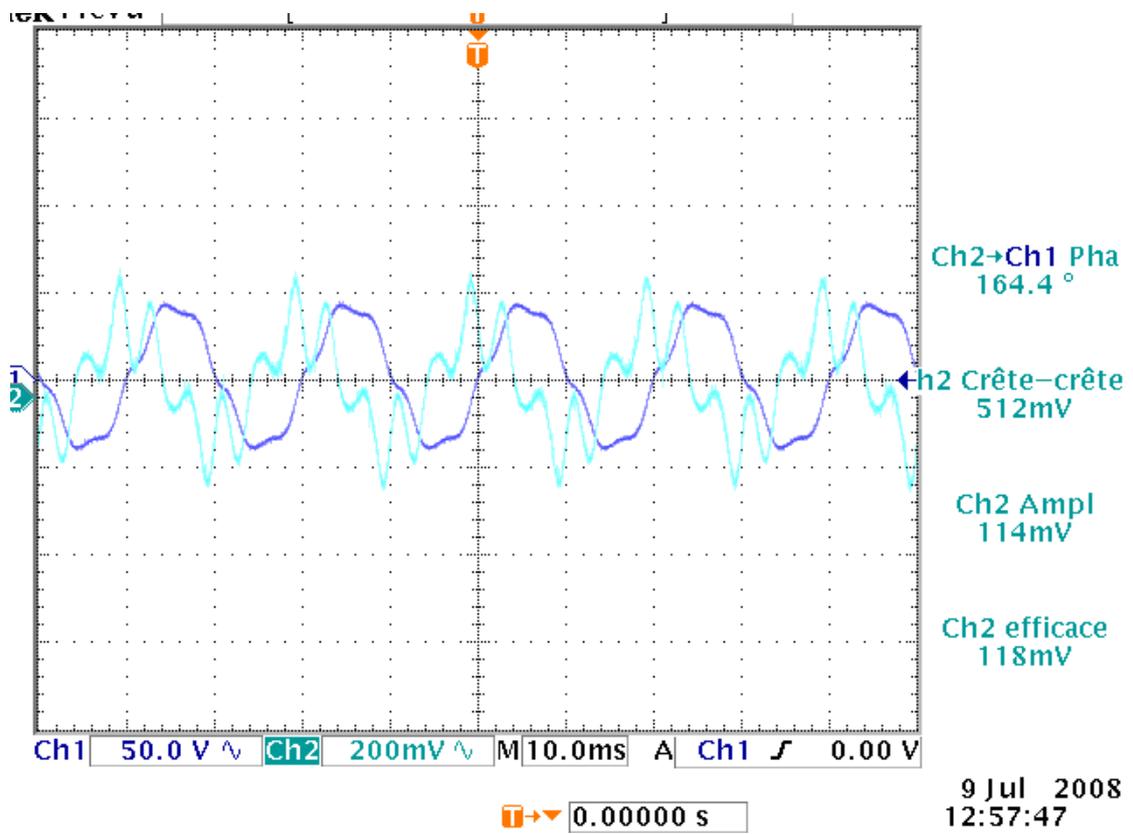
Figure(III.92): Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de15kV,d=4cm



Figure(III.93): Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de20kV, d=4cm



Figure(III.94): Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 25kV, d=4cm



Figure(III.95): Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 30kV, d=4cm

### III.4.2 Caractéristiques courant-tension

Dans la figure (III.96) qui représente la variation de la valeur efficace du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes, nous constatons que l'amplitude du courant de préclaquage augmente avec la tension appliquée (la variation est linéaire). En effet, les courants de préclaquages, pour les plus grandes distance, sont inférieurs à ceux pour les petites distances, de plus au delà de 5kV une diminution de la pente de la caractéristique courant – tension est observée. Ce qui est en accord avec les résultats observés par d'autres chercheurs [3, 26].

L'application d'une tension engendre un courant dont l'expression est la suivante [3, 26] :

$$i = \frac{d}{dt}(q) = C \frac{du}{dt} + u \frac{dC}{dt} \quad [\text{III.1}]$$

Etant donné que la caractéristique courant-tension est linéaire, ce qui confirme que la capacité C est constante, alors sa dérivée est nulle [64].

Par conséquent, nous obtenons :  $i = C \frac{du}{dt}$  [III.2]

En considérant :  $U = U_m \sin \omega t$  [III.3]

$$i = C \frac{du}{dt} = C U_m \cos \omega t \Rightarrow I_m = C \omega U_m \quad [\text{III.4}]$$

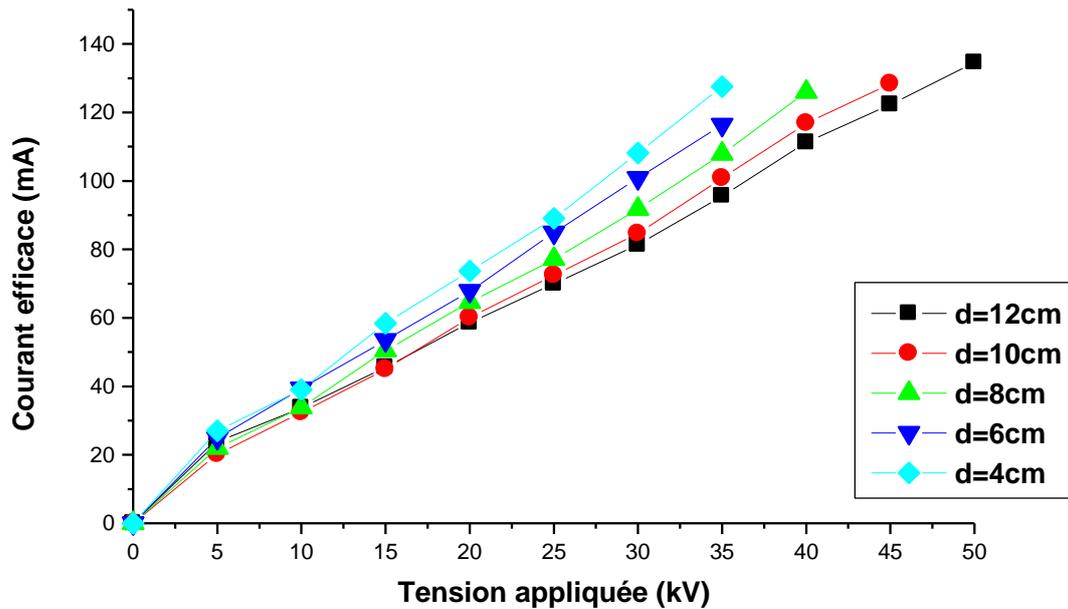
$$\Rightarrow C \omega = \frac{I_m}{U_m} \quad [\text{III.5}]$$

Le rapport  $(\frac{I_m}{U_m})$  est constant avant la génération.

La décroissance de la pente de la caractéristique courant-tension observée est le résultat de la perturbation des équilibres de dissociation ionique [25] et/ou du changement de la capacité, due à la génération de bulles gazeuses [31]. Ces dernières donnent naissance à des pics du courant selon certains chercheurs, dans un intervalle de temps assez faible [26, 64], pour que la tension puisse être considérée constante. Par conséquent, les pics du courant résultent de la variation de la capacité électrique.

Alors le courant correspondant peut s'écrire comme suit :

$$i = u \frac{dC}{dt} = i_p \quad [\text{III.6}]$$



Figure(III.96): Variation du courant efficace en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes (sans barrière)

### III.4.3 Effet de la distance inter-électrodes

La figure (III.97) montre les variations des courants efficaces en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées. Lorsque la distance inter-électrodes augmente, l'amplitude du courant efficace diminue légèrement, cette diminution révèle l'influence du champ électrique [3, 26, 66]. Elle est plus visible pour les tensions élevées (plus de 15kV). Notons, qu'aux niveaux de tension 5 et 10kV le courant efficace reste pratiquement constant. Ce résultat a été obtenu par d'autres chercheurs [3, 26].

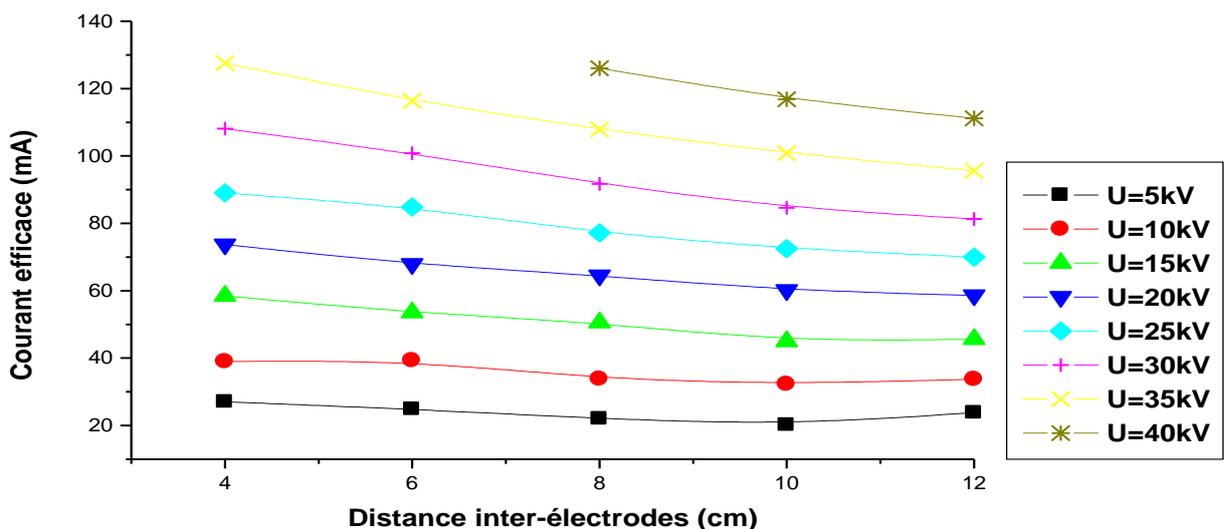


Figure (III.97):Variation du courant en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées

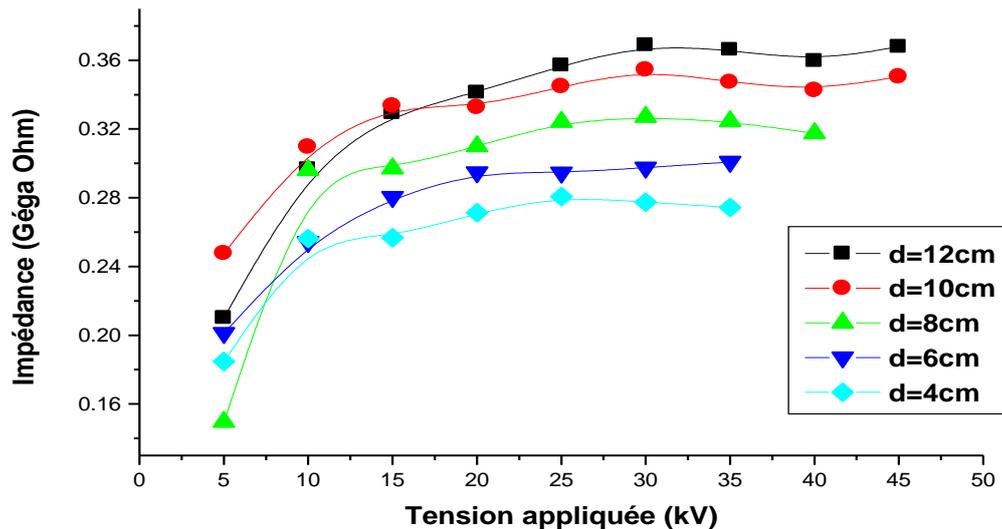
### III.5 Variation de l'impédance équivalente

Les caractéristiques courant-tension nous ont permis d'établir l'impédance apparente présentée par le rapport U/I.

### III.5.1 Caractéristiques impédance- tension

Nous remarquons que pour les valeurs de la tension inférieures à 10kV, l'impédance varie d'une manière très importante, l'évolution de cette dernière devient moins prononcée jusqu'à ce qu'elle se stabilise à partir d'une certaine tension (environ 15kV), cette variation est similaire pour toutes les distances et présente approximativement le même point à partir du quel l'impédance se stabilise. Par ailleurs, elle s'améliore avec l'augmentation de la distance inter-électrodes (Fig. III.98).

L'augmentation de l'impédance électrique pour les tensions inférieures à 10kV implique une diminution de la capacité du système à cause de la génération de la bulle gazeuse [3] et dépend des caractéristiques du milieu (la conductivité...), faisant varier l'impédance du système [66].



**Figure(III.98):** Variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes

### III.5.2 Influence de la distance inter-électrodes

Nous avons tracé les caractéristiques donnant l'impédance en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées (fig. III.99).

L'impédance augmente avec la distance inter-électrodes pour l'ensemble des niveaux des tensions. Les allures des impédances sont très proches pour les niveaux supérieurs à 10kV, ces mêmes allures sont retrouvées par d'autres chercheurs [3, 26].

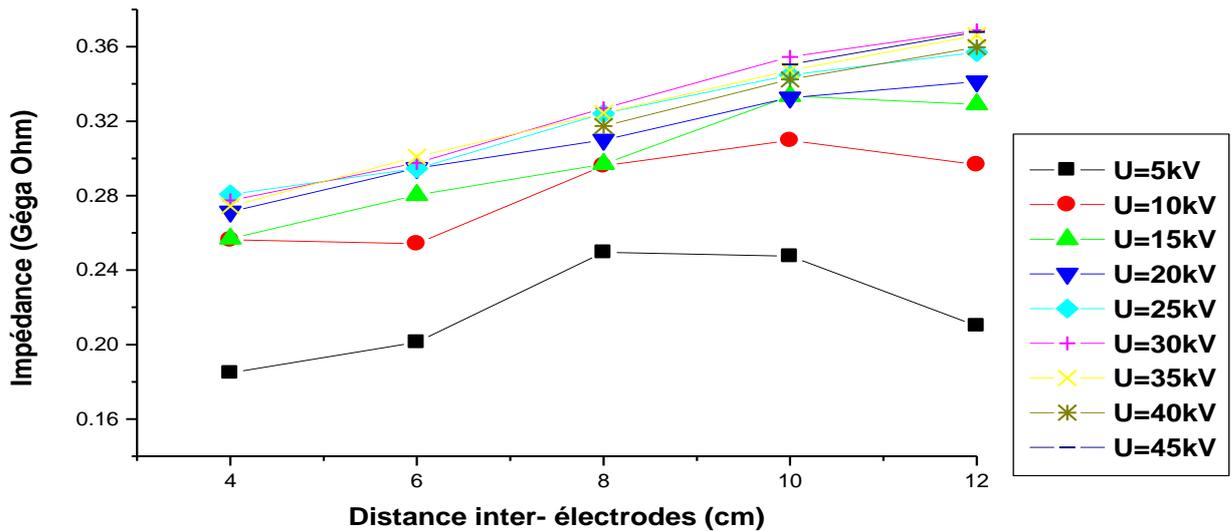


Figure (III.99): Variation de l'impédance en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées

### III.6 Energie du système

L'étude de l'énergie du système est d'un grand intérêt, pour pouvoir extraire des charges de l'électrode pointe, il est impératif de fournir une énergie suffisante.

On la déduit à partir de la relation:  $W=1/2Q.U$

#### III.6.1 Caractéristiques énergie- tension

La caractéristique de l'énergie en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes est présentée sur la figure (III.100).

Nous remarquons que pour les différentes distances inter-électrodes, l'énergie augmente avec la tension appliquée. Elle provoque l'extraction des charges générées dans l'huile au niveau de l'électrode pointe, pour vaincre la barrière de potentiel du métal (interface solide- liquide) [64].

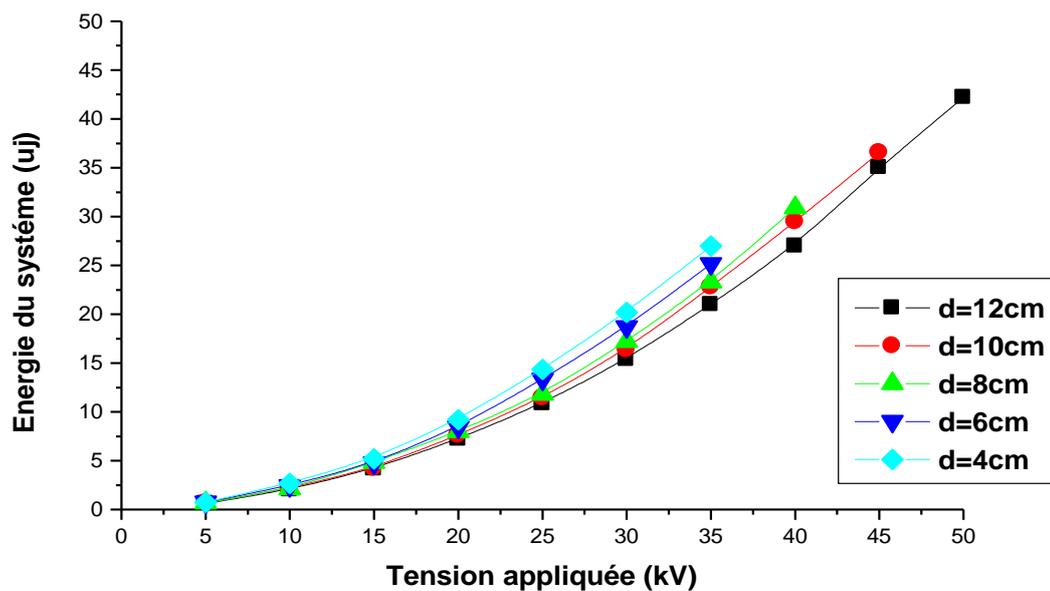
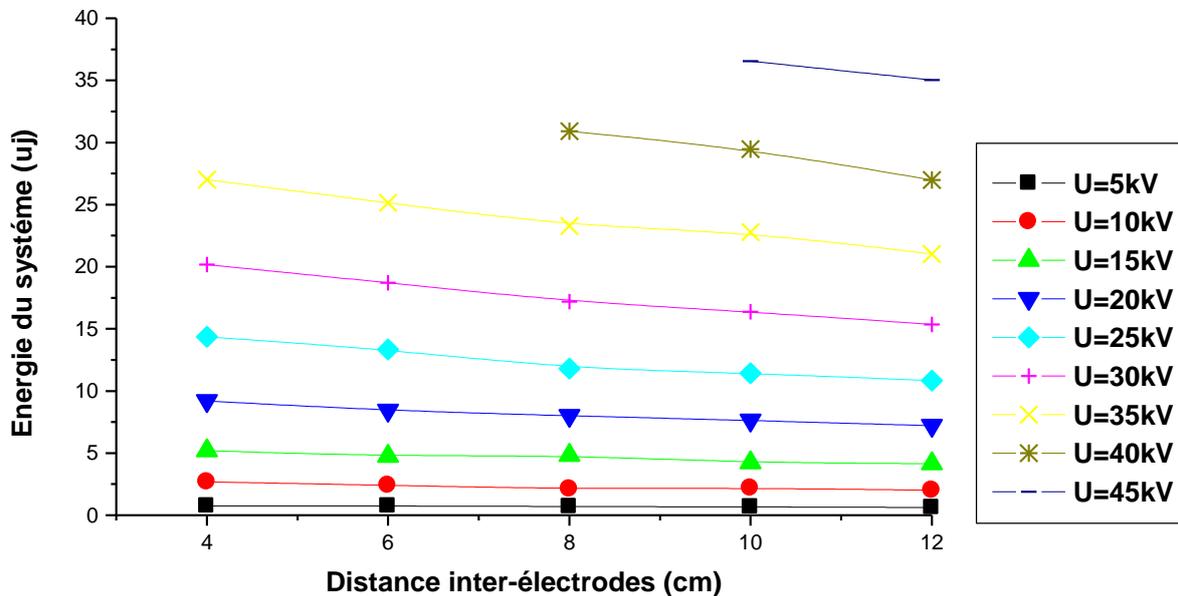


Figure (III.100): Variation de l'énergie du système en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes

### III.6.2 Effet de la distance inter- électrodes

D'après le graphe (Fig. III.101) qui représente la variation de l'énergie en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées, nous pouvons dire que les énergies diminuent légèrement au delà des tensions supérieures à 30kV, tandis qu'ils sont invariables pour des tensions inférieures [22, 31].



**Figure (III. 101):** Variation de l'énergie du système en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées

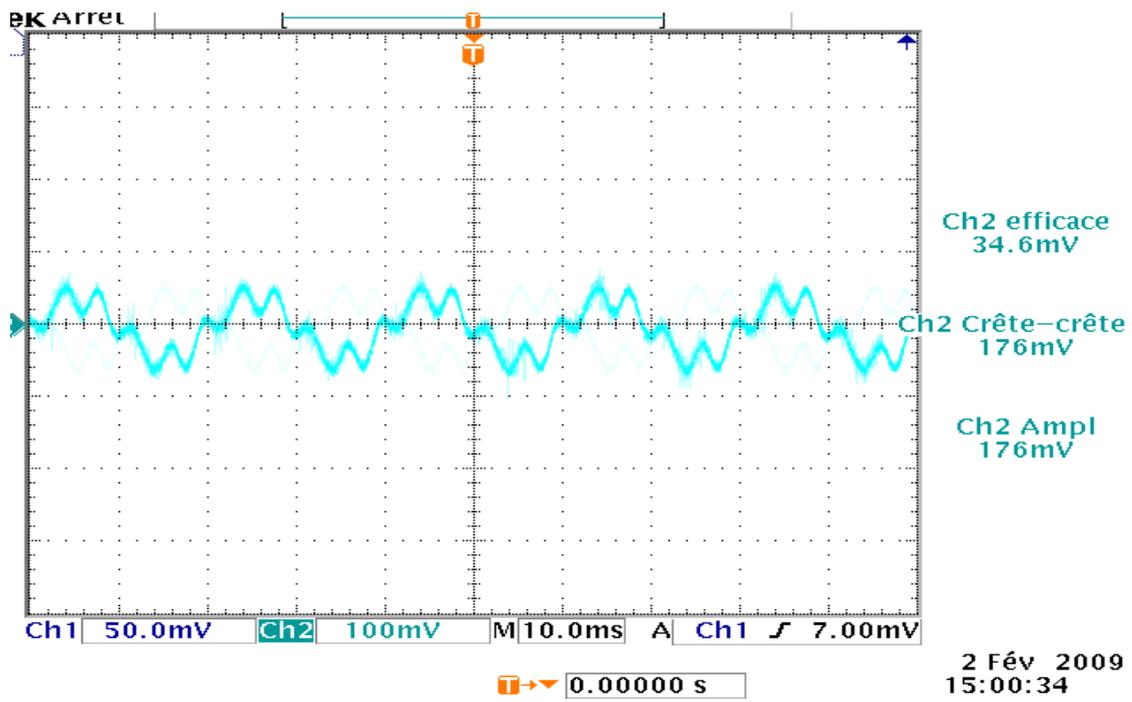
## III.7 Essais avec barrière

### III.7.1 Mesure du Courant

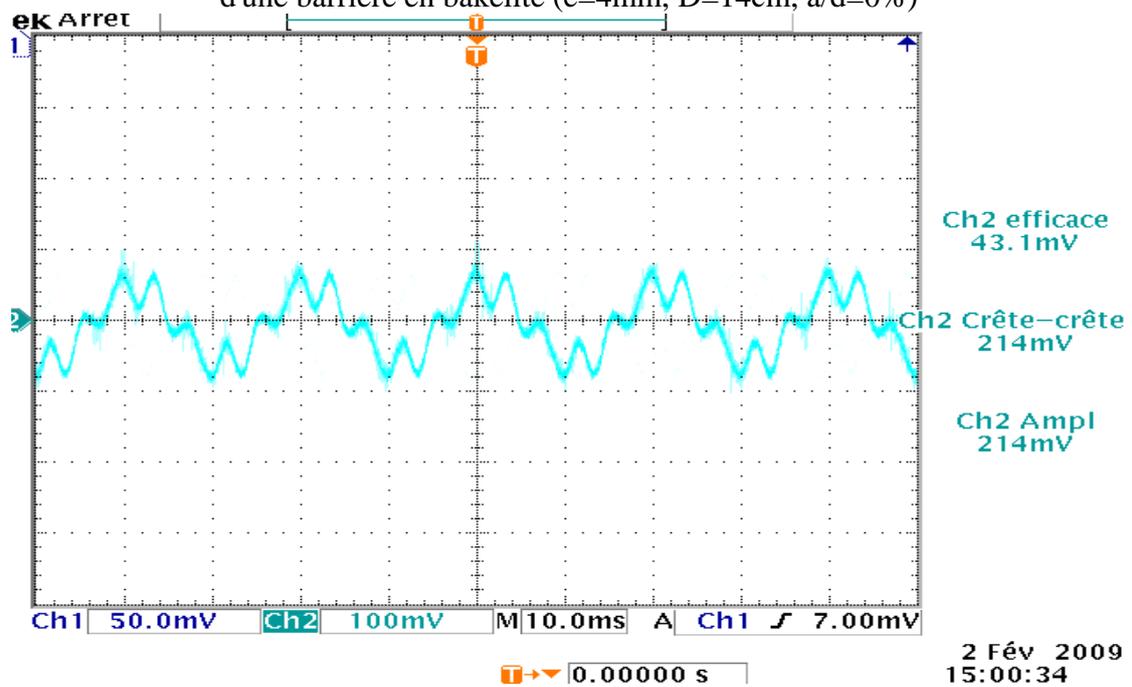
En seconde partie, nous nous intéressons à l'évolution du courant et l'impédance sous l'influence des paramètres suivants: la distance inter-électrodes et la tension appliquée en présence des barrières en bakélite et en press-pahn d'épaisseurs 2et 4mm pour différents diamètres.

#### III.7.1.1 Forme du courant

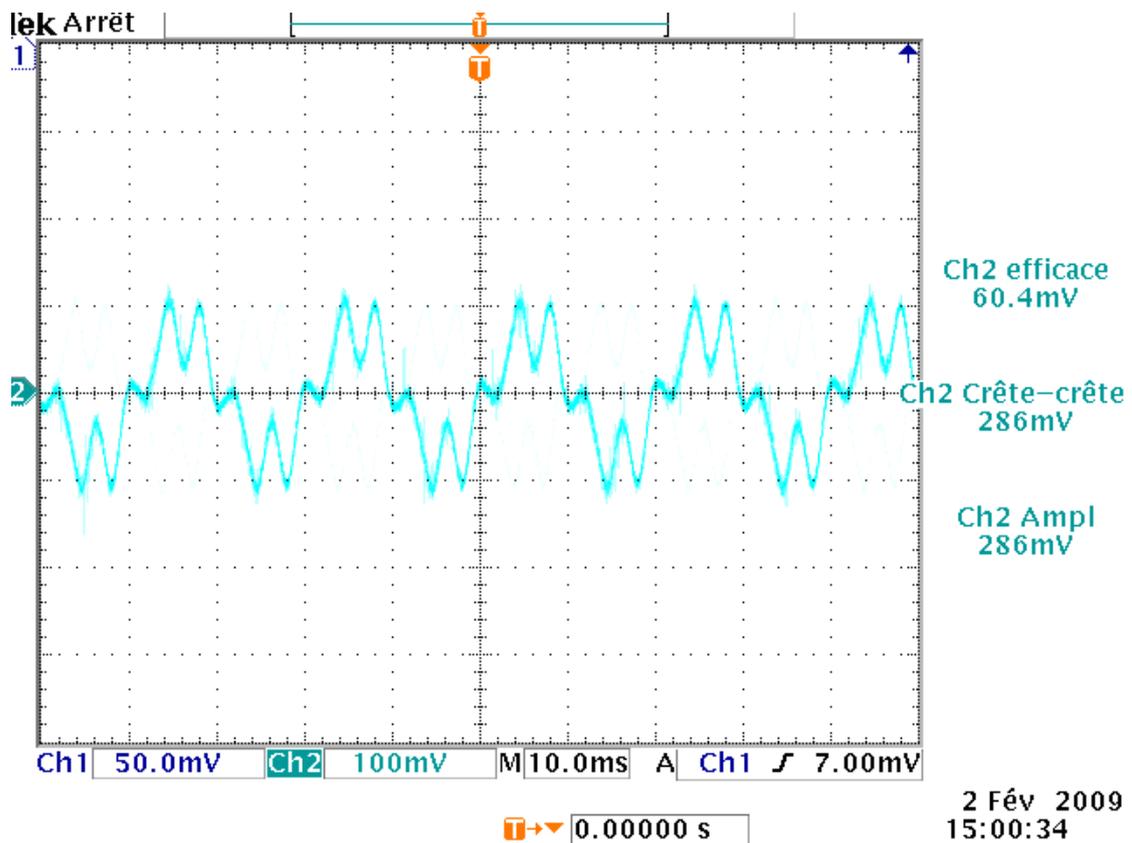
D'après les figures (III.102 à III.107), nous constatons que le signal obtenu est périodique. Pour une distance donnée, le courant efficace augmente avec la tension appliquée, et cela pour toutes les positions relatives de la barrière



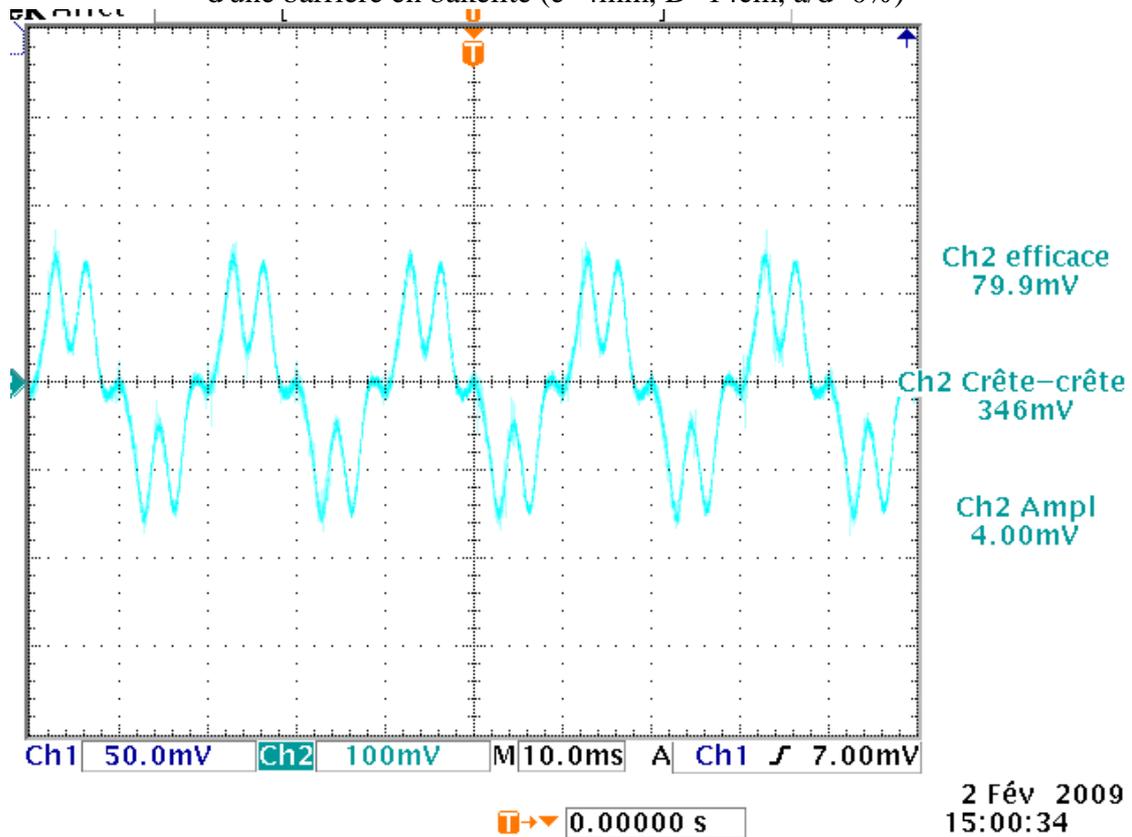
Figure(III.102): Forme du courant, pour une tension appliquée de 5kV,  $d=4\text{cm}$  à la présence d'une barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $a/d=0\%$ )



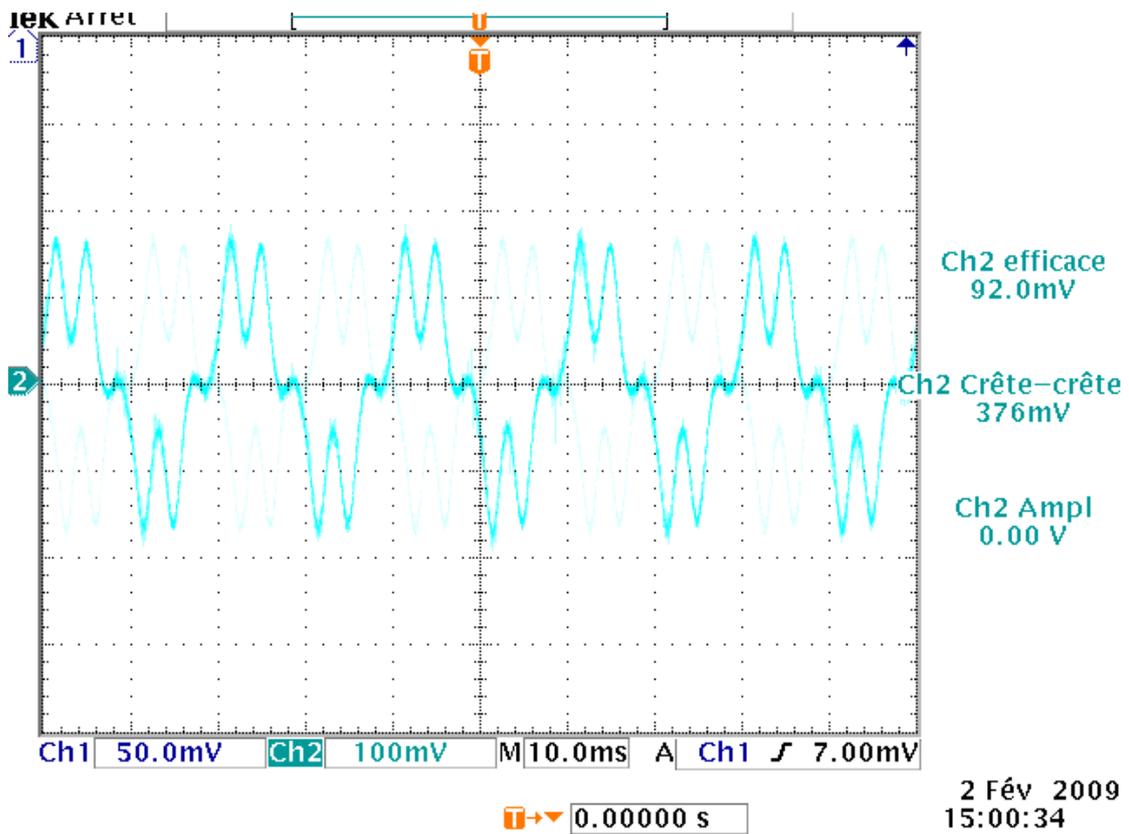
Figure(III.103): Forme du courant, pour une tension appliquée de 10kV,  $d=4\text{cm}$  à la présence d'une barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $a/d=0\%$ )



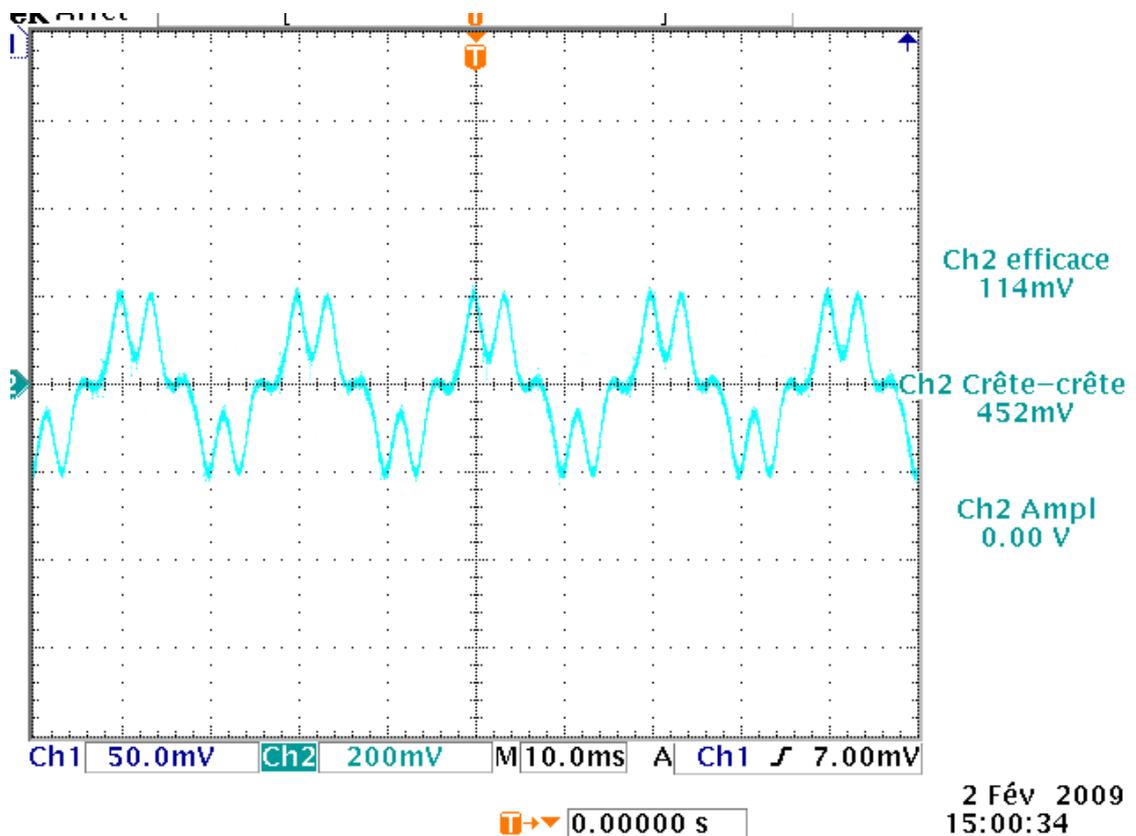
Figure(III.104): Forme du courant, pour une tension appliquée de 15kV,  $d=4\text{cm}$  à la présence d'une barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $a/d=0\%$ )



Figure(III.105): Forme du courant, pour une tension appliquée de 20kV,  $d=4\text{cm}$  à la présence d'une barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $a/d=0\%$ )



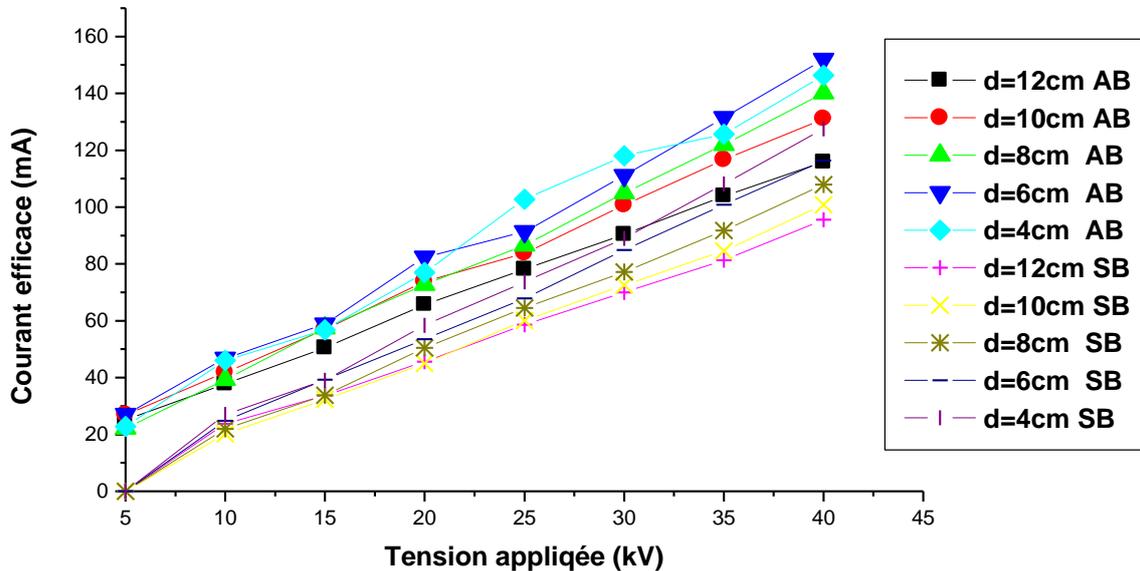
Figure(III.106): Forme du courant, pour une tension appliquée de 25kV, d=4cm à la présence d'une barrière en bakélite (e=4mm, D=14cm, a/d=0%)



Figure(III.107): Forme du courant, pour une tension appliquée de 30kV, d=4cm à la présence d'une barrière en bakélite (e=4mm, D=14cm, a/d=0%)

### III.7.1.2 Caractéristiques courant –tension

La figure (III.108) illustre la variation du courant efficace en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes et cela pour une position relative de la barrière isolante en bakélite à 20%. Nous remarquons que le courant augmente linéairement avec la tension appliquée. Notons que les courants de préclaquage sont supérieurs à ceux sans barrière.

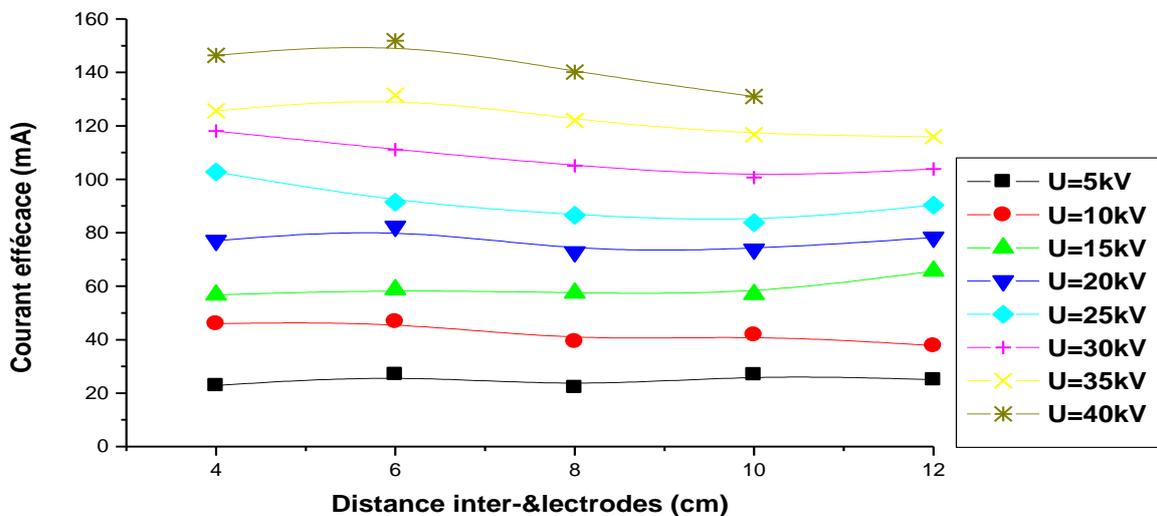


Figure(III.108): Variation du courant efficace en fonction de la tension appliquée, pour une barrière en bakélite (D=14cm, e=4mm, a/d=20%)

### III.7.1.3 Effet de la distance inter-électrodes

La figure (III.109) illustre la variation du courant efficace en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées en présence d'une barrière en bakélite de diamètre 14cm et d'épaisseur 4mm, pour la position relative de la barrière a/d=20%.

Nous remarquons également dans le cas sans barrière, que le courant diminue lorsque la distance inter-électrodes augmente, pour les tensions supérieures à 10kV. Cependant Le courant se stabilise pour des tensions allant de 5 à 15kV.



Figure(III.109): Variation du courant efficace en fonction de la tension appliquée, pour une barrière en bakélite (D=14cm, e=4mm, a/d=20%)

### III.8 Variation de l'impédance équivalente

#### III.8.1 Caractéristiques impédance-tension

La figure (III.110) montre la variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée en présence d'une barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ), pour une position relative  $a/d=20\%$ . Il ressort de cette figure que l'impédance croît quelle que soit la distance inter-électrodes. Cette croissance est moins importante au-delà de 15kV.

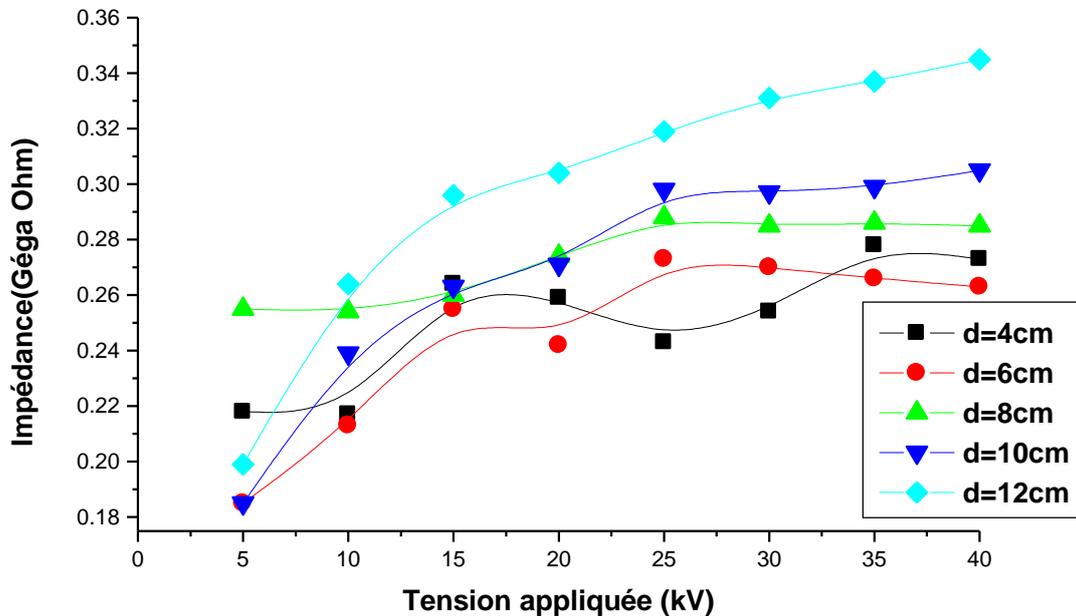
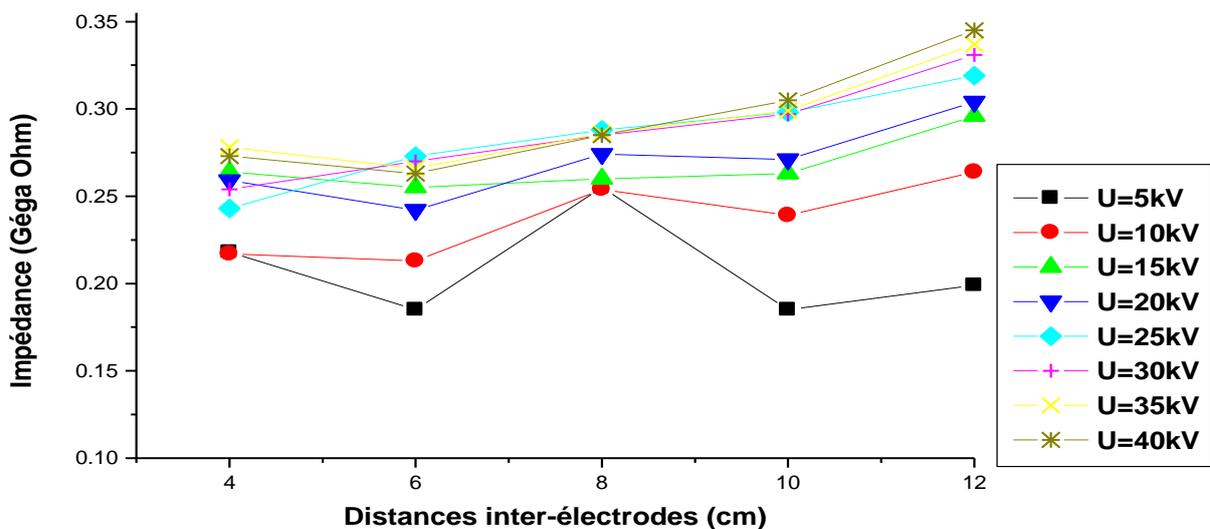


Figure (III.110): Variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes, barrière en bakélite ( $D=14\text{cm}$ ,  $e=4\text{mm}$ ,  $a/d=20\%$ )

#### III.8.2 Influence de la distance inter-électrodes

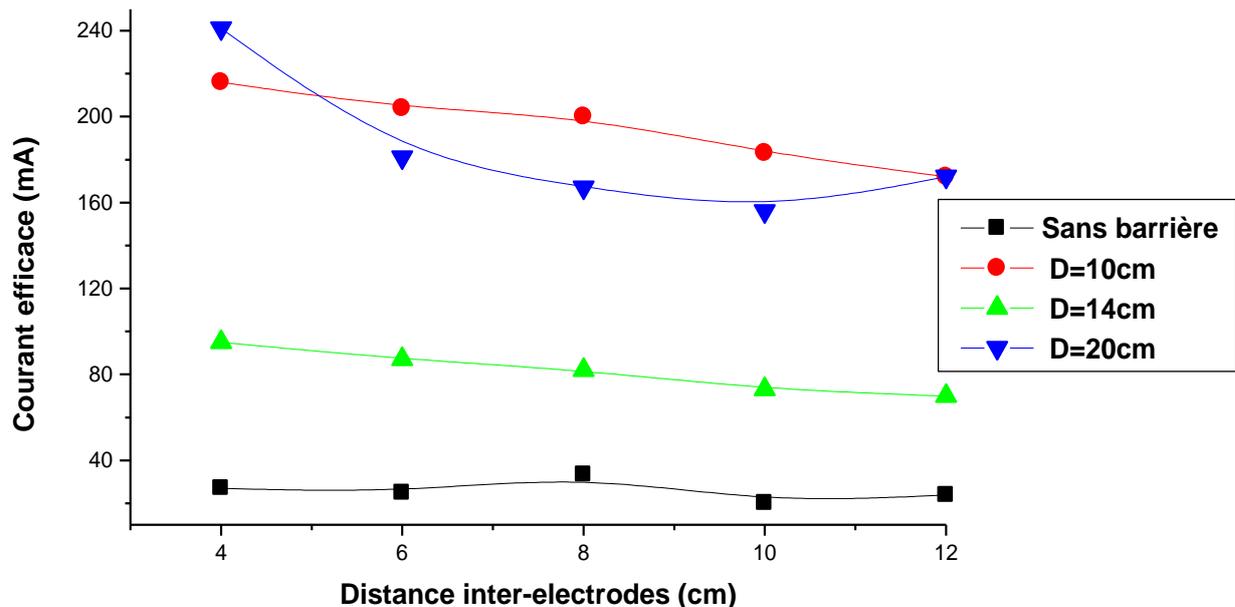
La figure (III.111) présente la variation de l'impédance en présence d'une barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ), pour la même position relative  $a/d=20\%$ . Nous remarquons toujours une légère augmentation de l'impédance pour les niveaux de tension appliquée supérieure à 5kV, tandis que l'impédance est peu sensible pour le niveau de 5kV.



Figure(III.111): Variation de l'impédance en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées (Bakélite  $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $a/d=20\%$ )

### III.8.3 Influence de l'insertion de la barrière

Dans la figure (III.112), nous comparons la variation du courant efficace, en fonction de la distance inter-électrodes, pour les deux systèmes (avec et sans barrière). L'insertion de la barrière modifie significativement le courant efficace [66]. Cette modification est interprétée par l'augmentation de l'amplitude du courant efficace. D'autre part, le courant efficace dépend de l'ensemble des paramètres que soient la nature, la position, les dimensions de la barrière et la tension appliquée. Ceci est du, d'une part à l'augmentation de la longueur de la décharge (obstacle géométrique) et d'autre part à la modification de la distribution du champ électrique dans le milieu, qui devient uniforme entre la barrière et le plan.



**Figure (III.112):** Variation du courant efficace en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en bakélite ( $e=4\text{mm}$ ,  $a/d=20\%$ )

### III.8.4 Influence de la position de la barrière

Les résultats expérimentaux dans les figures (III.113 à III.123), montrent l'influence de la position de la barrière sur le courant efficace, pour les deux natures, les différentes épaisseurs et diamètres, pour les distances inter-électrodes considérées. Nous remarquons que quelles que soient la nature et la distance inter-électrodes, le courant efficace est presque constant. Cela signifie que la position n'a aucune influence sur le courant de préclaquage.

Rappelons que les niveaux de tension appliqués sont relativement modérés (inférieur à 50% de la tension de claquage, il n'y a pas eu lieu de décharge entre les électrodes) [66].

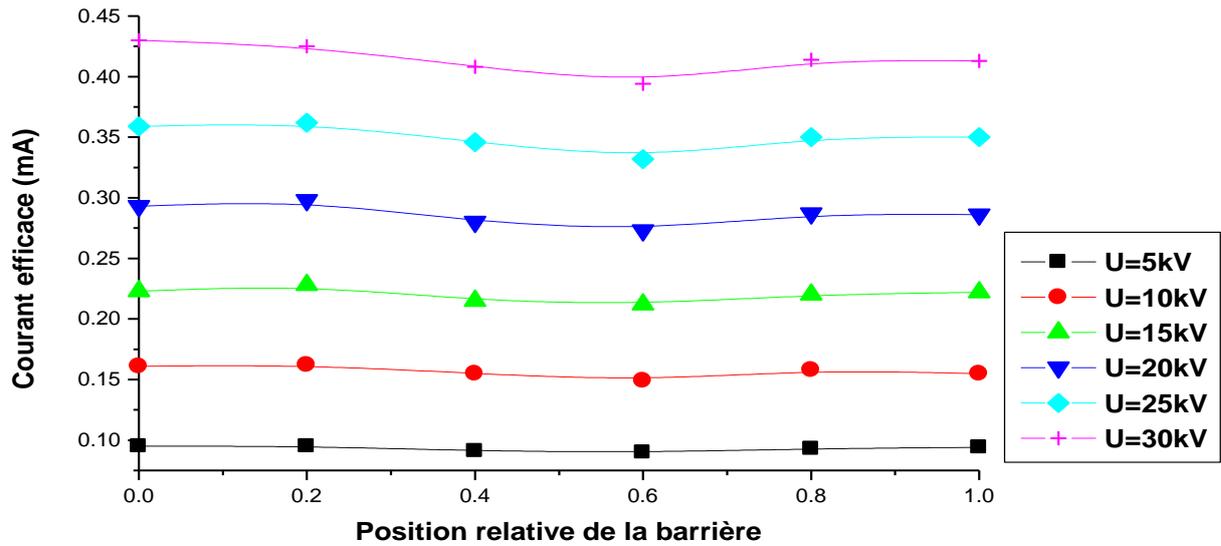


Figure (III.113): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Bakélite, e=4mm, D=14cm, d=4cm)

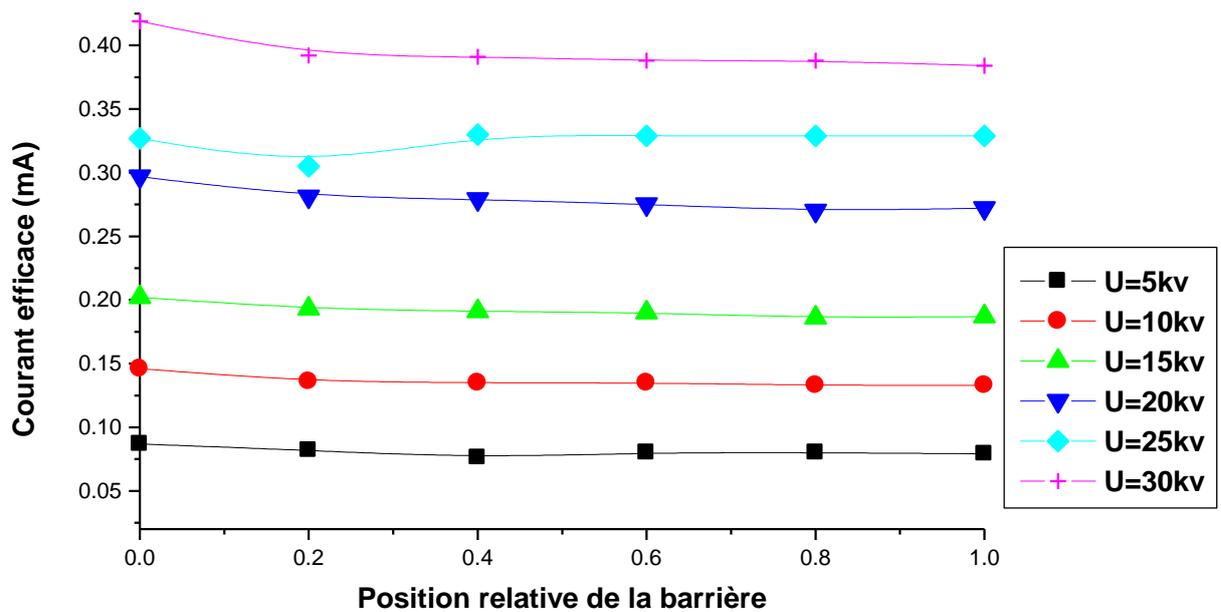


Figure (III.114): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Bakélite, e=4mm, D=14cm, d=8cm)

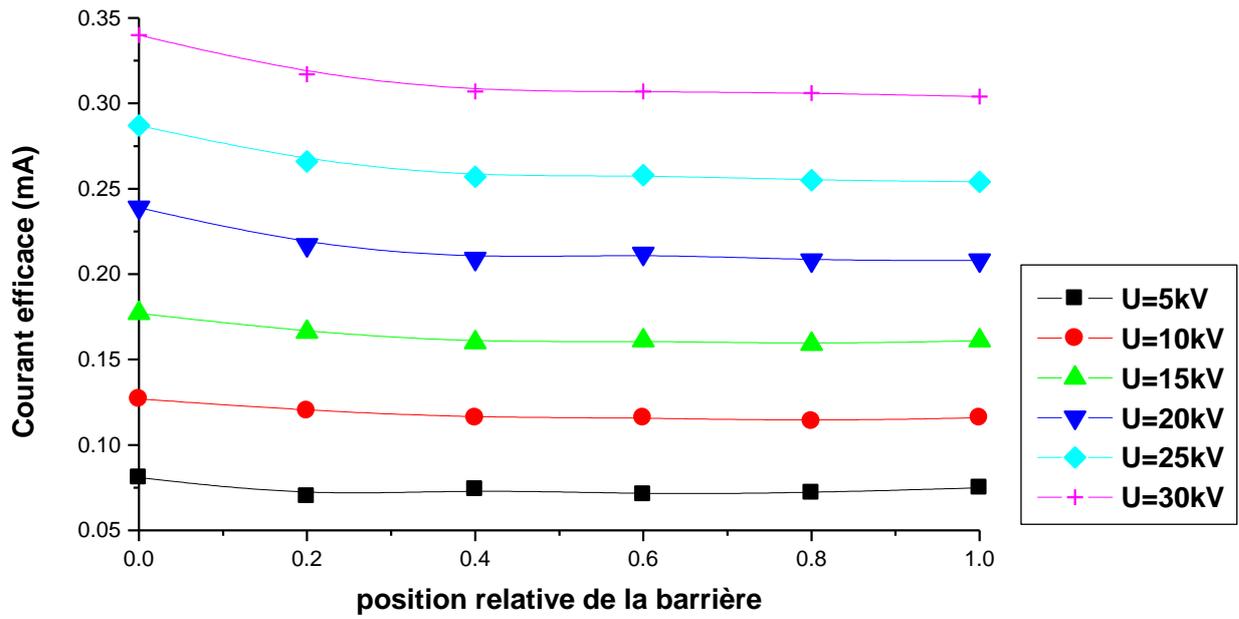


Figure (III.115): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Bakélite,  $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=12\text{cm}$ )

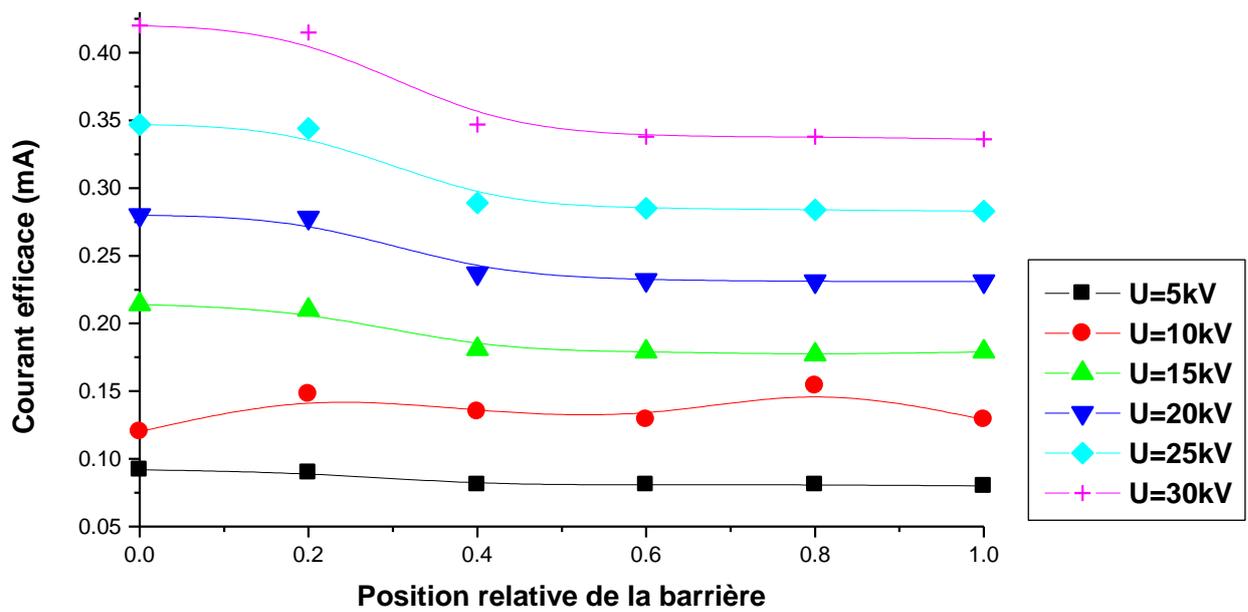


Figure (III.116): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn,  $e=4\text{mm}$ ,  $D=10\text{cm}$ ,  $d=8\text{cm}$ )

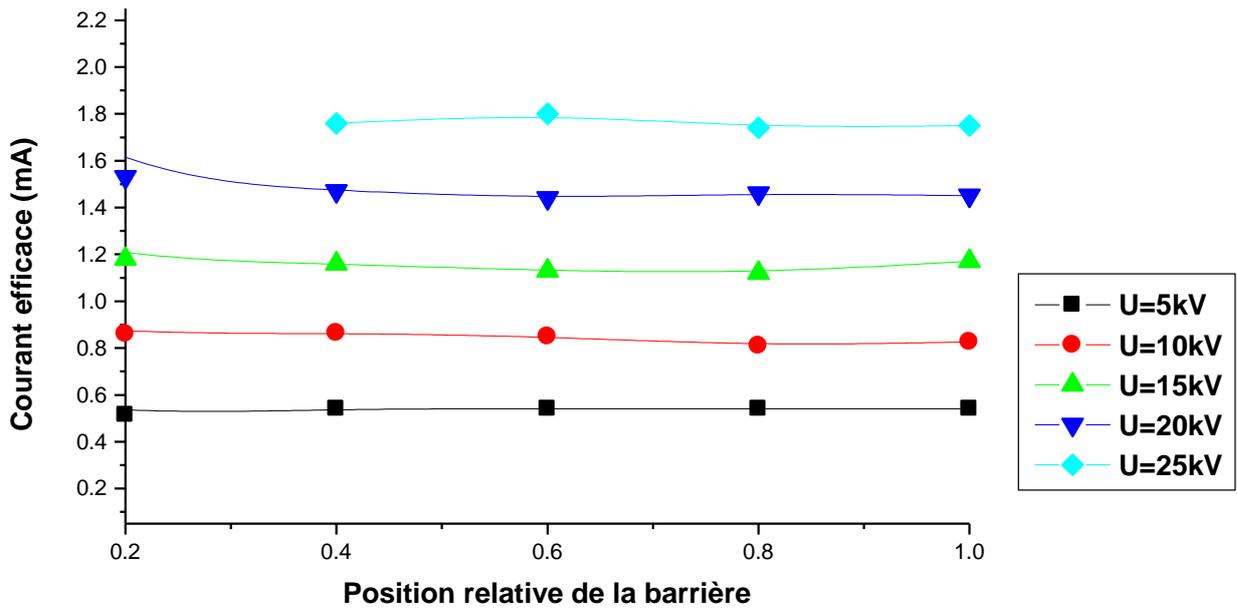


Figure (III.117): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn, e=2mm, D=14cm, d=4cm)

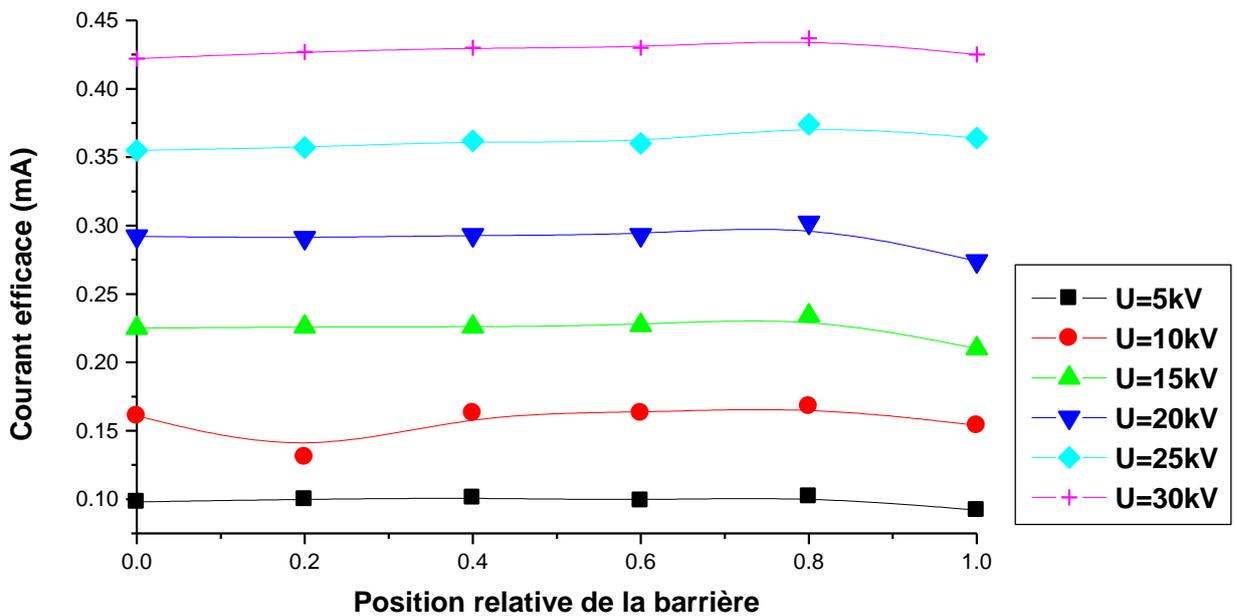


Figure (III.118): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn, e=2mm, D=10cm, d=4cm)

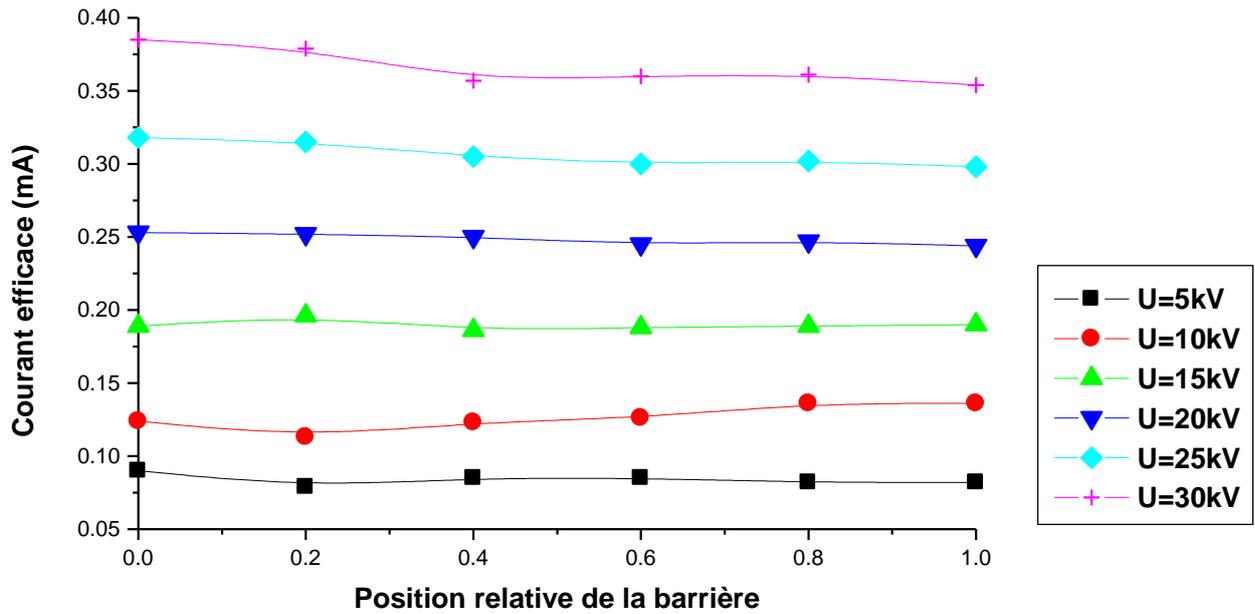


Figure (III.119): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn, e=2mm, D=10cm, d=8cm)

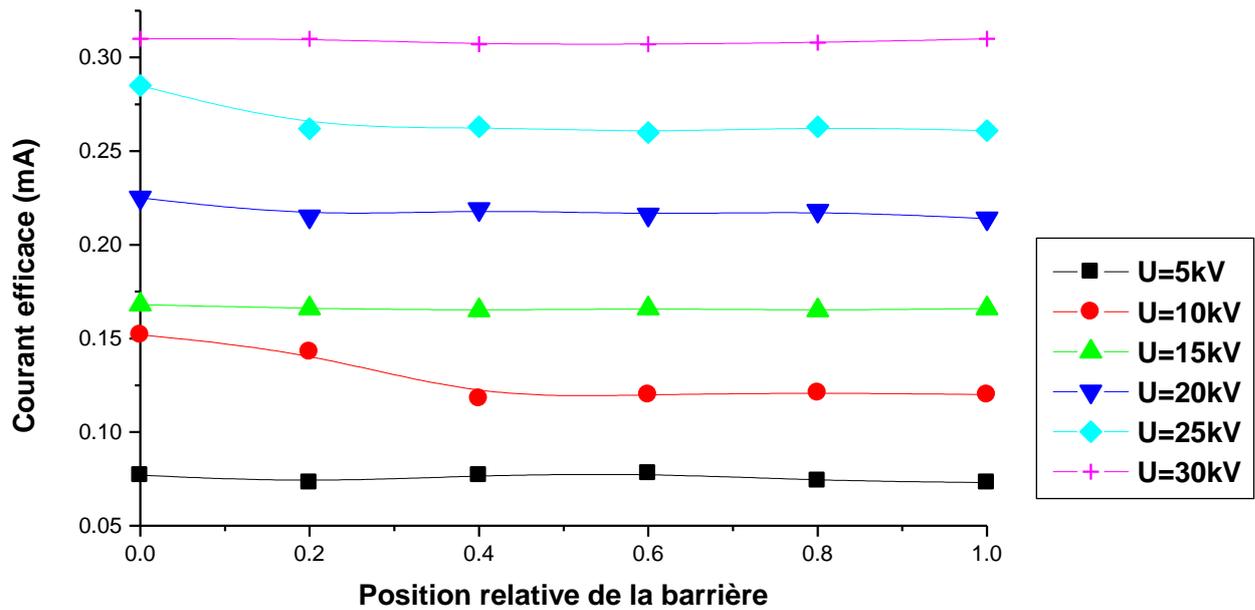


Figure (III.120): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn, e=2mm, D=10cm, d=12cm)

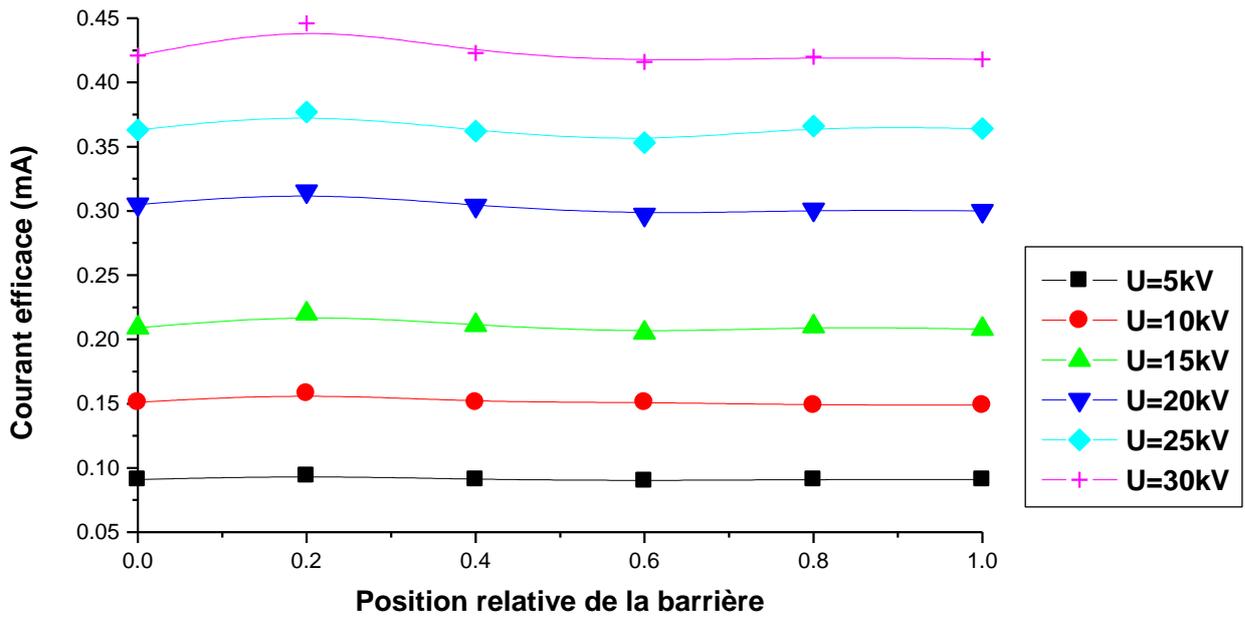


Figure (III.121): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn, e=4mm, D=20cm, d=4cm)

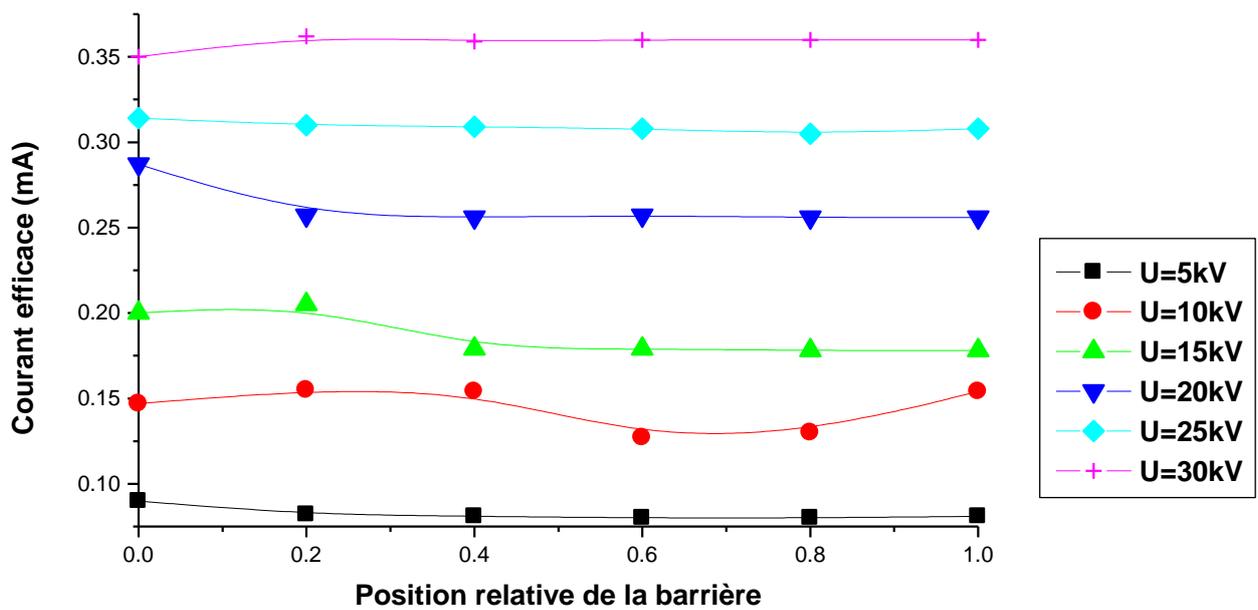


Figure (III.122): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn, e=4mm, D=20cm, d=8cm)

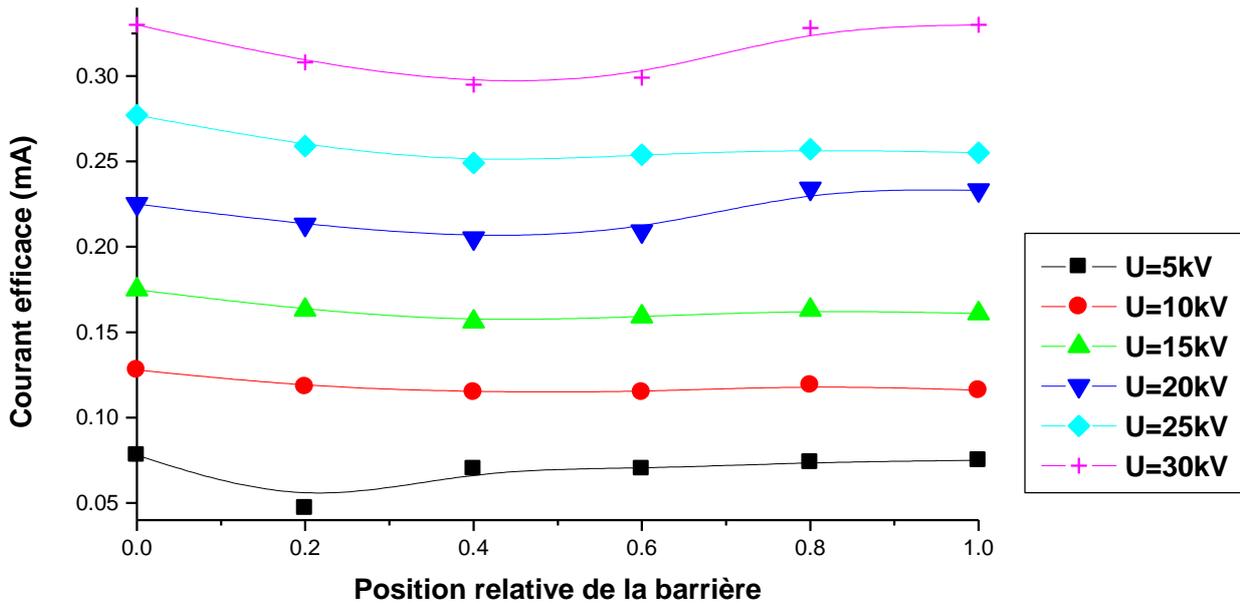


Figure (III.123): Variation du courant efficace en fonction de la position de la barrière, pour différentes tensions appliquées (Press-pahn, e=4mm, D=20cm, d=12cm)

Les figures (III.124,III.125) donnent la variation du courant efficace en fonction de la tension appliquée, pour différentes positions de la barrière. Ces figures confirment que la position relative de la barrière entre les électrodes n'a pas aucune influence sur le courant de préclaquage et la variation  $I=f(U)$  est linéaire.

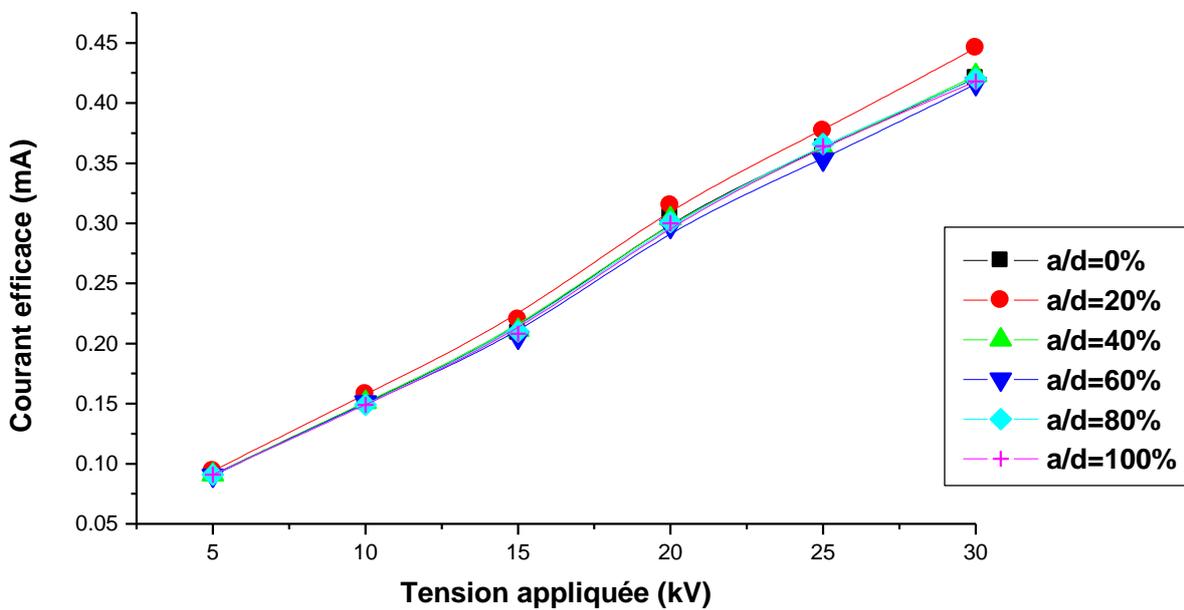


Figure (III.124): Variation du courant efficace en fonction de la tension appliquée, pour différentes positions (Press-pahn, e=4mm, D=20cm, d=4cm)

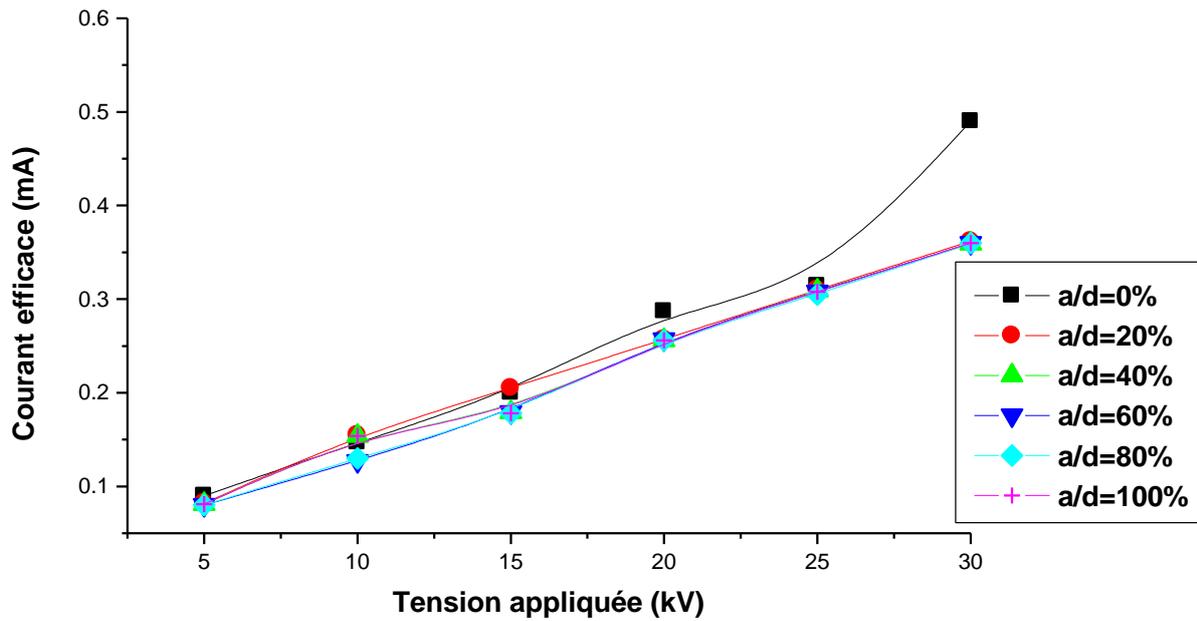


Figure (III.125): Variation du courant efficace en fonction de la tension appliquée, pour différentes position. (Press-pahn, e=4mm, D=20cm, d=8cm)

### III.8.5 Influence de la barrière sur l'impédance

Les figures (III.126 à 128) montrent la variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée, en présence d'une barrière en bakélite, d'épaisseurs (2 et 4mm) et pour différentes positions. Il ressort que l'insertion de la barrière provoque la diminution de l'impédance du système [66].

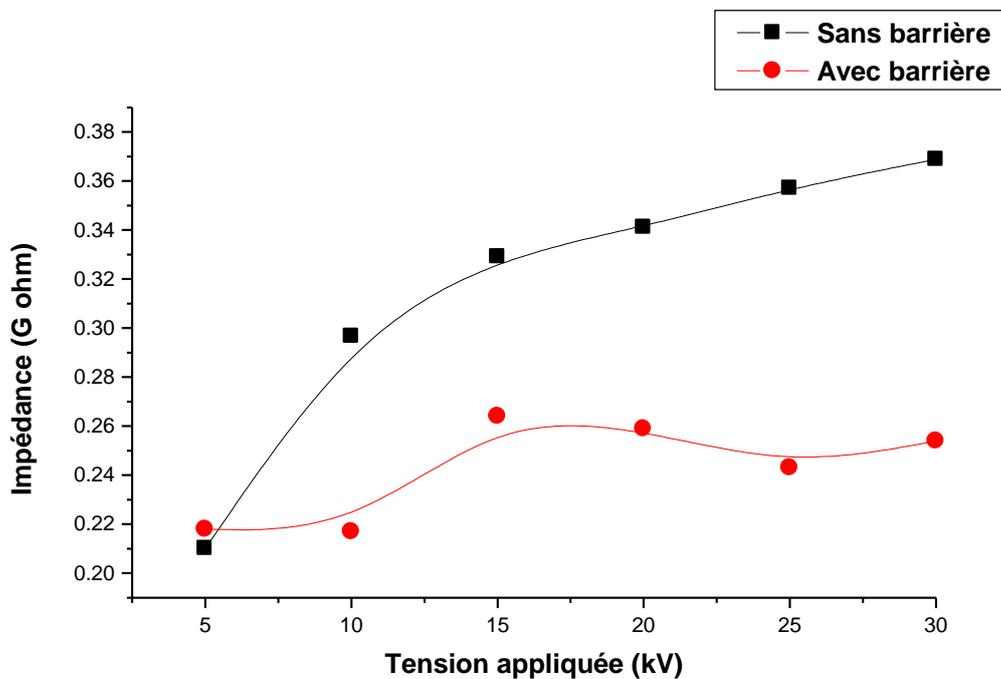


Figure (III.126): Variations de l'impédance en fonction de la tension appliquée (Bakélite e=4mm, a/d=20%, D=14cm, d=12cm)

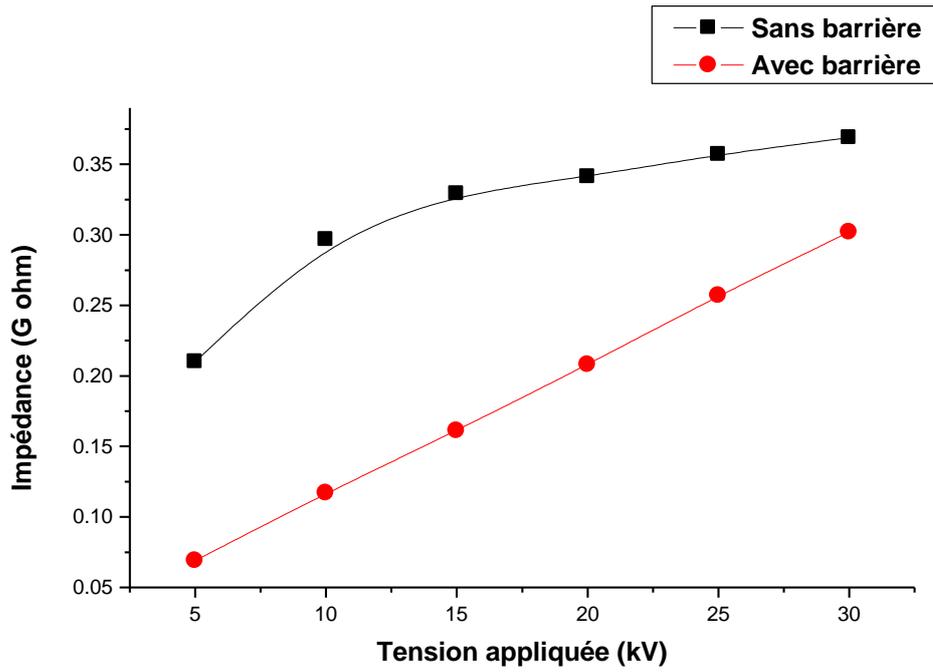


Figure (III.127): Variations de l'impédance en fonction de la tension appliquée (Bakélite  $e=2\text{mm}$ ,  $a/d=20\%$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=12\text{cm}$ )

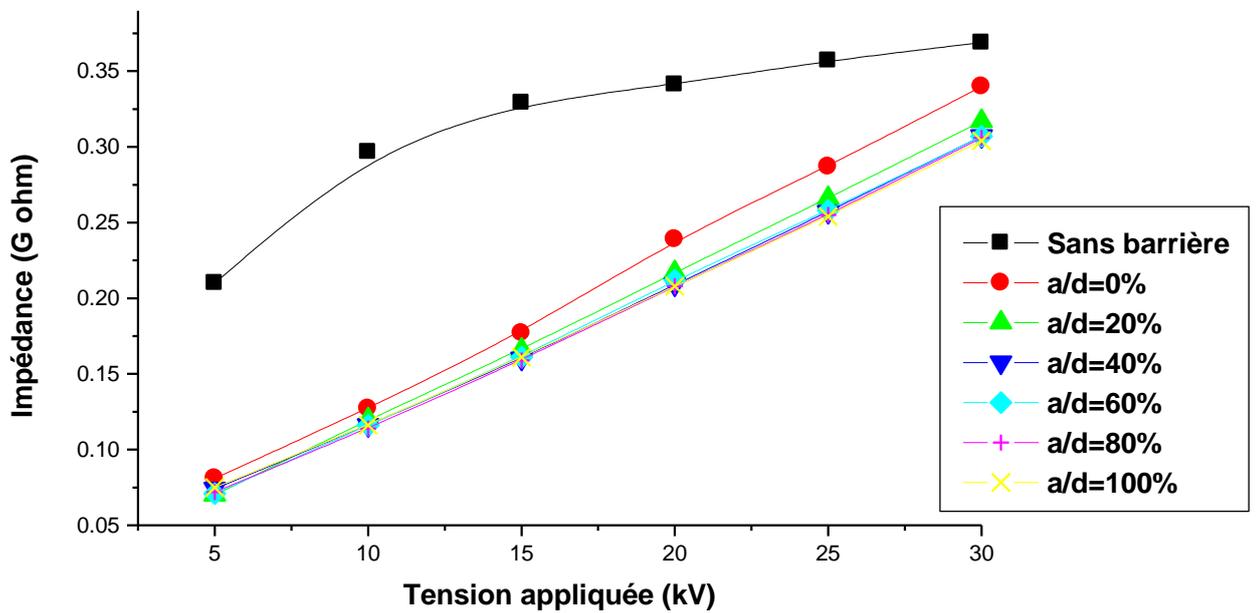


Figure (III.128): Variations de l'impédance en fonction de la tension appliquée (Bakélite  $e=4\text{mm}$ ,  $D=14\text{cm}$ ,  $d=12\text{cm}$ )

### III.9 Conclusion

A l'issue de cette étude, nous pouvons retenir les conclusions suivantes:

- L'insertion d'une barrière isolante dans un système d'électrodes divergent, améliore la tenue diélectrique du système, ne dépend pas uniquement des propriétés intrinsèques des deux milieux (liquide et solide), mais surtout des différents processus physico-chimiques apparaissant lors des deux phases (double couche, charges et conduction superficielles...).
- La position relative de la barrière, la nature, le diamètre, la distance inter-électrodes et l'épaisseur, jouent un rôle capital sur la tension de claquage.
- Dans des intervalles d'huile en champ divergent, la présence d'une barrière isolante à surface propre provoque l'allongement de la décharge électrique et puis l'augmentation du courant de préclaquage.
- La position relative n'a pas d'influence sur le courant efficace.
- La barrière isolante modifie l'impédance équivalente.

Ces essais ont permis de parvenir à la comparaison des deux systèmes étudiés (sans et avec barrière), sur l'impédance, le courant de préclaquage (efficace) et la tension de claquage.

A decorative rectangular frame with a double-line border and ornate, curved corners. The text "Conclusion Générale" is centered within this frame.

## **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale

Notre étude nous a permis, dans un premier temps, d'approfondir la compréhension des mécanismes de claquage électrique, dans les deux milieux, solide et liquide, et les conséquences d'une combinaison de deux isolants.

Nous avons rappelé, dans notre étude bibliographique répartie sur les deux chapitres, les principaux travaux examinant l'effet de l'insertion des barrières de différentes natures et différentes géométries (forme, dimension, épaisseur), leur position par rapport aux électrodes, d'intervalles d'air et dans l'huile.

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

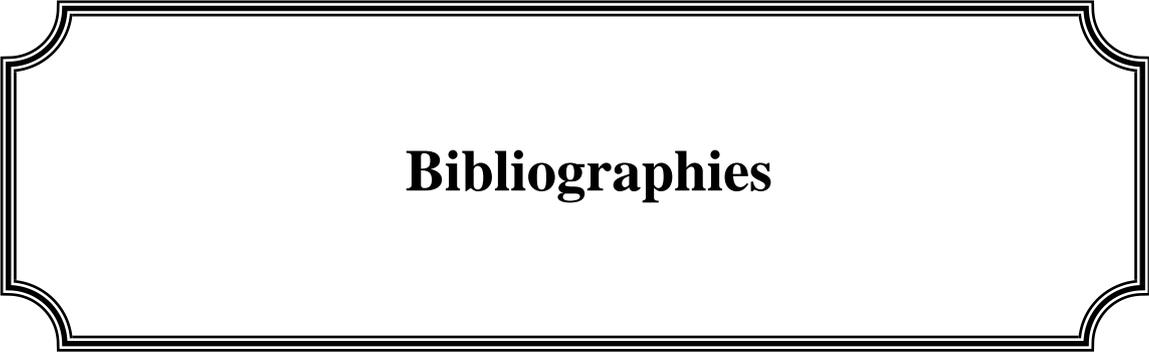
- L'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne un accroissement de la tension de claquage sans barrière.
- Le rayon de courbure de la pointe, n'a pas d'influence sur la tension de claquage, pour les grandes distances supérieures à 8cm. Pour les moyennes distances ( $d=6$  et  $8$ cm), nous remarquons une diminution de la tension de claquage avec l'augmentation des rayons de courbures ( $r_p=1,2$ , et  $3$ mm), puis elle augmente avec les rayons importants supérieurs à  $4$ mm. Pour les petites distances, la tension de claquage augmente avec le rayon de courbure.
- L'insertion d'une barrière isolante dans un système d'électrodes divergent améliore de façon significative la tension disruptive du système sans barrière, quels que soient la nature, l'épaisseur et le diamètre de la barrière.
- Notons que la tension de claquage est maximale à 20% à partir de l'électrode acérée. Au-delà de cet optimum, elle décroît avec la position de la barrière et tend vers une valeur proche à celle sans barrière, la tension de claquage prend des valeurs élevées pour les grandes distances par rapport aux petites, quels que soient la nature, le diamètre et l'épaisseur de la barrière isolante.
- L'efficacité de la barrière (le rapport de tensions de claquage du système avec barrière à celle sans barrière), dépend du diamètre et de l'épaisseur de cette dernière. Plus le diamètre est grand, plus le système d'isolation est rigide, surtout à la position 20% de l'intervalle inter-électrodes, cette amélioration est due à des conditions intrinsèques du milieu (charge d'espace, impuretés...). Cependant l'augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation de la tension de claquage lorsque la barrière en press-pahn est entre 0% et 20%, par contre la barrière en bakélite améliore la tension quelle que soit la position, pour dire que l'amélioration de la tension de claquage dépend de la nature de cette dernière.
- Il apparaît qu'une barrière en bakélite est plus efficace que celle en press-pahn de diamètre 14cm, même lorsqu'on augmente la distance inter-électrodes, cette amélioration serait due au fait que la décharge se développe facilement sur l'isolant de plus grande permittivité.
- Le courant obtenu dans l'essai sans barrière est un signal périodique, à partir de 5 kV, des distorsions apparaissent puisque chaque alternance de l'onde du courant de fuite prend la forme de "M" déformé, sont des chutes du courant deviennent plus importantes avec la tension appliquée. Le déphasage entre les fondamentaux du courant et de tension reflète le caractère purement capacitif.
- A partir de 5kV, nous observons une décroissance de la pente de la caractéristique courant- tension. Au voisinage de la tension 10kV, la caractéristique retrouve sa linéarité, nous pensons que le mécanisme physique est celui de transition des bulles en streamer. l'amplitude du courant efficace diminue lorsque la distance inter-électrodes augmente, cette diminution est plus visible aux tensions supérieures à 10kV et le courant efficace reste pratiquement constant aux niveaux 5 et 10kV.

## ***CONCLUSION GENERALE***

---

- Nous constatons que l'augmentation de la tension appliquée engendre un accroissement de l'impédance entre les électrodes, uniquement pour les faibles niveaux. Au-delà de 10kV, les allures de l'impédance sont proches et améliorées avec l'augmentation de la distance inter-électrodes.
- L'énergie augmente en fonction de la tension appliquée, elle diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes.
- En présence d'une barrière en bakélite d'épaisseur 4mm, et de diamètre 14cm, le signal du courant est également périodique, il présente des déformations dans la valeur crête dans les deux alternances et il augmente linéairement avec la tension appliquée.
- Nous remarquons également pour la barrière en bakélite, que le courant diminue lorsque la distance inter électrodes augmente et se stabilise aux niveaux de tensions inférieures à 20kV.
- La caractéristique impédance- tension donne une croissance quelque soit la distance inter-électrodes, entre 5 et 15kV, au-delà de 15kV, l'impédance est presque stable, pour la barrière en bakélite.

Enfin, nous souhaitons que ce travail apporte une contribution sur le plan industriel, pour le but d'assurer une meilleure qualité d'isolation. Comme perspectives à ce travail, nous proposons de faire des mesures de la charge électrique injecté dans les intervalles d'huile avec et sans barrière. Nous souhaitons qu'une attention soit accordée au rayon de courbure de la pointe (varier le rayon), étudier les barrières perforées.



## **Bibliographies**

- [1] **W.G. Chadband and G.T. Wright**, « A Prebreakdown Phenomena in the Liquid dielectric Hexane », Brit. J. Appl. Phys., Vol. 16, pp. 305-313, 1965.
- [2] **R. Kattan, A. Denat and O. Lesaint**, « Generation Growth and Collapse of Vapor Bubbles in Hydrocarbon Liquids under High Divergent Electric Field », J. Appl. Phys. Vol. 66, pp.4062-4066, 1989.
- [3] **B. Moula** « Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22 » sous tension alternative 50Hz », Mémoire de Magister, ENP Alger, 2007.
- [4] **A. Zouaghi**, « Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [5] **N. Berger**, « liquides isolants en électrotechnique: Caractéristiques des produits », Technique de l'ingénieur, D2471, 2002.
- [6] **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, E.D. électronique, ECL. Lyon, Juin 2000.
- [7] **N. Berger**, « Liquides isolants en électrotechnique : présentation générale », Technique de l'ingénieur, D2470, 2002.
- [8] **A. Bouhageb**, « Produit de graissage et de protection », Edition 2000.
- [9] **L. Peyraque**, « Étude des Phénomènes d'Électrisation Statique dans les Transformateurs de Puissance à Débit d'Huile Forcé », Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, France, Nov 1995.
- [10] **B. Fallou, R. Fournié et Co** « Analyse des gaz dissous dans l'huile en tant que moyen de surveillance des transformateurs et détection des défauts naissants », CIGRE 1970, Volume, Gr12-02.
- [11] **R. Tobazéon**, « Préclaquage et claquage des diélectriques liquides », Technique de l'Ingénieur, D2450, 1997.
- [12] **S. Abdi** « Influence du vieillissement thermique sur des propriétés de l'huile de transformateur », Mémoire de Magister, ENP Alger, 2002.
- [13] **T.J. Gallagher**, « Simple Dielectric Liquids: Mobility, Conduction, and Breakdown », Oxford University Press, 1975.
- [14] **J. A. Kok**, « Rigidité Diélectrique des Liquides Isolants », Philips, DUNOD, 1964.
- [15] **I. Adamczewski**, « Les Phénomènes d'ionisation et de conduction dans les diélectriques liquides », Masson et Cie, Paris 1968.
- [16] **O. Lesaint and R. Tobazéon**, « Streamer Generation and Propagation in Transformer Oil under ac Divergent Field Conditions », IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.23, N°.6, pp. 941-954, December 1988.
- [17] **F.M.J. McCluskey, A. Denat and O. Lesaint**, « Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids under positive impulse voltage », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N°. 3, pp. 377-382, June 1994.
- [18] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechnique: Essai, Mécanismes de dégradation, Applications industrielles », Edition Eyrolle, Paris, 1990.
- [19] **R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci**, « Formation of vapor bubbles in non-polar liquids initiated by current pulses », IEEE Transaction on Electrical Insulations Vol. 26, N°. 4, pp. 656-662, August 1991.
- [20] **S. Bouazabia**, « Claquage dans les diélectriques liquides : Génération et propagation des décharges dans les diélectriques liquides », Cours post graduation, Département de l'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Alger, 2006.
- [21] **A. Boubakeur**, « Claquage des diélectriques liquides », cours quatrième année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.
- [22] **P. Atten**, « Mouvement d'un fluide en présence d'un champ électrique », Technique de l'ingénieur, D 2850, 1999.
- [23] **J.P. Gosse, B. Gosse, A. Denat**, « La conduction électrique des liquides diélectriques », Revue RGE, Vol N° 10, 1985, PP733-744.
- [24] **R. Coelho** « Conduction électrique dans les liquides », Interprétation des phénomènes, techniques de l'ingénieur, D227, 1986.

- [25] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechniques: concepts et théories », Edition Eyrolles, paris, 1986.
- [26] **A. Hamimi**, « Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans une huile de transformateur sous champ alternatif divergent », Thèse de Magister, ENP Alger, 1997.
- [27] **Z. Djemai**, « Détermination de la dimension fractale des décharges électrique radiale sur les surfaces isolantes », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2001.
- [28] **S. Abdi, S. Zelmat**, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », P.F.E Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1998.
- [29] **A. Beroual, al**, « Propagation and Structure of Streamers in Liquid Dielectrics », IEEE Electr. Ins. Magazine, Vol14, N° 2, pp 6-17, 1998.
- [30] **A. Bérroual**, « Electronic and Gaseous Processes in Prebreakdown Phenomena of Dielectric Liquids », J. Appl. Phys. 73(9), pp. 4528-4533, 1993.
- [31] **P. Gournay, O. Lesaint**, « A Study of the Inception of Positive Streamers in Cyclohexane and Pentane », J. Phys. D: Appl. Phys. 26, pp. 1966-1974, 1993.
- [32] **O. Lesaint, P. Gournay** « On the Gaseous nature of Positive Filamentary Streamers in Hydrocarbon Liquids. Influence of the Hydrostatic Pressure on the Propagation », J. Phys. D: Appl. Phys. 27, pp. 21 11-21 16, 1994.
- [33] **R. Kattan**, « Etude de la Formation et de la Dynamique de Bulles dans les Hydrocarbures Liquides Générées par les Impulsions de Courant en Champ Electrique intense », Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier.Grenoble1, France, Novembre 1990.
- [34] **P. K. Watson, W. G. Chadband and M. Sadeghzadeh-araghi**, « The Role of Electrostatic and Hydrodynamic Forces in the Negative-point Breakdown of Liquid Dielectrics », IEEE Trans. Electr. Ins., Vol. 26, No. 4, pp. 543-559, August 1991.
- [35] **Z. Krasucki**, « Breakdown of Liquid Dielectrics », Proc. Royal Soc., Vol. 294, pp 393-404, 1966.
- [36] **A. Badent, K. Kist and A. J. Schward**, « Voltage Dependence of Prebreakdown Phenomena in Insulating Oil », Conf. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburg, PA, USA, June 5-8, pp. 414-417, 1994.
- [37] **H. Yamashita, K. Yamazawa, W. Machidori et Y.S. Wong**, « The Effect of Tip Curvature on the Prebreakdown Density Change Streamer in Cyclohexane », IEEE 12-th ICDL, Rome, Italy, pp. 226-229, 1996.
- [38] **A. Tilmatine**, « Claquage des diélectriques solides », cours poste graduation Département de Génie Electrique, U S. BELABAS.
- [39] **A. Boubakeur**, « Claquage des diélectriques solides », cours quatrième année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.
- [40] **R. Coelho, B. Aladenize**, « Les Diélectriques », Editions HERMES, 1994.
- [41] **C. Oudet**, « Polymères, structure et propriétés », Editions MASSON, 1994.
- [42] **M. Nemamcha**, « Claquage des Isolants », O.P.U. 2001, pp. 41-46.
- [43] **E. Kuffel, W.S. Zeangl**, « High Voltage Engineering », ed. Pergamon Press. 1984, pp.367-385.
- [44] **M. Nemamcha**, « Décharges électriques dans différentes structures d'isolation imprégnée », Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences, ENP, 1993.
- [45] **D. Djemai**, « Etude de la propagation des streamers à l'interface liquide/solide sous tension alternative 50 Hz », Ecole Nationale Polytechnique D'Alger, 1991.
- [46] **T. J. Lewis**, « Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids, " IEEE Transaction on Electrical Insulation, vol. 1, pp. 630-644, 1994.
- [47] **W. Rotenberg**, « Etude des phénomènes de préclaquage dans les huiles isolantes dans des systèmes d'électrodes couvertes de couches minces », Ecole Centrale de Lyon, 2000.
- [48] **J. A. Cross**, « Electrostatics: Principles, Problems and application » ed, Adam, Hilger. 1987.
- [49] **O. Stern**, « The theory of the electrolytic double-layer », Z. Elektrochemie vol. 30, pp.508-16 1924.

- [50] **B. Boubekki**, « Mesure du champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre », Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2006.
- [51] **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.
- [52] **H.E.Remde, H.Boeker**, «Voltage-current characteristics during propagation of a surge breakdown of a point –to-plane gap with insulating barrier »,IEEE. Trans, Vol. 91, N° 1.pp.271-276, 1972.
- [53] **E. Marx**, « Dielectric strength in non uniform fields », E.T.Z, H33, pp. 1161, 1930.
- [54] **H. Roser**, « Dielectric strength screen in air », E.T.Z.H17, Bd 53, pp.411, 1932.
- [55] **M.p Verma**, « Electric field line of rod- barrier- plane in positive impulse voltage », Wiss. Zeit. Der TU Dresden H1, pp. 111, 1962.
- [56] **J pilng**, « Dielectric barrier in uniform field », Elektrie 23, H 11, pp.463, 1969.
- [57] **M. Awad**, « Disruption d'un intervalle d'air pointe- plan avec barrière polluée », Electricie 29, H10, pp.559, 1975.
- [58] **A. Boubakeur**, «Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe –plan ». Rozprawy Electrotechniczne (Académie Polonaise des Sciences), Vol.27, N°3, Varsovie, Pologne, 1981, pp 729-744.
- [59] **A. Boubakeur**, « Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan », Thèse de Doctorat, ENP. Varsovie, Pologne 1979.
- [60] **L. Ming, M. Leijon et T.Bengtsson**, « Factors influencing barrier effects in air-gaps», International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 2168, pp. 1-4, Graz 1995.
- [61] **M.V. Socolova, A.N. Zhukov**, « Influence of barrier surface properties on the discharge in a narrow gas gap », International Symposium on High Voltage Engineering (9<sup>th</sup> ISH), session 2899, pp. 1-4, Graz 1995.
- [62] **Norme Internationale CEI 60156**. Isolants liquides - Détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle- Méthode d'essais »,Deuxième édition, Novembre 1995.
- [63] **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, ENP, Alger, 2008
- [64] **S. Bouazabia**, « Etude des phénomènes de génération des streamers dans les diélectrique liquides », Thèse de Doctorat d'Etat, ENP Alger, 2006.
- [65] **H.Bessai et M.Zouaghi**, « Contribution à l'étude des phénomènes de génération dans les diélectriques liquides sous tension alternative. 50Hz, en géométrie pointe-plan », Projet de fin d'études, ENP 1995.
- [66] **S. A. Benghezal et H. B. Hammadi**, « Courant de pré claquage dans l'huile de transformateur "Borak22" dans le système pointe-plan avec barrières isolantes », Mémoire de projet de fin d'études, ENSP 2009.
- [67] **F.Guerbas, A.Boubakeur, M.Zitouni et A.Beroual** «Effet d'une barrière isolante sur la tension de claquage de l'huile de transformateur dans un système pointe- plan sous tension alternative»,7eme CNHT.2009. p.p. 1-4 U S. BELABAS.
- [68] **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, Lyon 2006.
- [69] **F. Kadri, H. Rahali** « Influence des barrières isolantes sur la tension de décharge disruptive des intervalles d'huile sous tension alternative », PFE, ENP 2007 EL-Harrach, Alger.

## ملخص

العمل المطروح في هذه المذكرة يدرس تأثير الحواجز العازلة داخل زيوت المحولات (بوراك 22) على التوتر الانفصامي والتيار ما قبل الانفصامي تحت توتر متناوب ذي تردد صناعي 50 هرتز، في نظام نتوء-مستوي. قمنا بدراسة تأثير عوامل مختلفة كالمسافة الفاصلة بين الأقطاب، نصف قطر قطب التوتر العالي، الوضعية النسبية للحاجز طبيعته وابعاده في النظامين بدون ومع الحاجز. راعينا كذلك تغيرات الممانعة المكافئة و الطاقة الكهربائية و قارنا التوتر الانفصامي و التيار ما قبل الانفصامي في النظامين.

**الكلمات المفتاحية :** الحواجز العازلة، نظام نتوء-مستوي، التوتر الانفصامي، التيار ما قبل الانفصامي، الممانعة المكافئة، الصلابة الكهربائية،

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire, consiste en l'influence des barrières isolantes sur la tension disruptive et sur le courant de préclaquage des intervalles d'huiles de transformateur (Borak 22) sous tension alternative à fréquence industrielle 50Hz dans un système d'électrodes pointe-plan. Nous avons étudié l'influence de différents paramètres tels que la distance inter-électrodes, rayon de courbure de l'électrode haute tension, la position relative de la barrière, sa nature et ses dimensions dans le système avec et sans barrière.

Nous avons présenté aussi l'évolution de l'impédance et de l'énergie du système et comparer la tension de claquage et le courant de préclaquage dans les deux systèmes.

**Mots clés :** barrières isolantes, intervalles point-plan, tension de claquage, courant de préclaquage, impédance équivalente, rigidité diélectrique.

## Summary

The work of the present thesis deals with the influence of the insulating barriers in the transformer oils (Borak 22) on the disruptive discharge voltage and on the predisruptive current under applied AC voltage and industrial frequency 50 Hz in a point-plane electrode system.

The influence of different parameters was studied, such as the inter-electrode distance, HV electrode curvature radius, the relative position of the barrier, its nature and dimensions in the systems without and with barrier.

On the other side the evolution of the equivalent impedance and the system energy were presented. Whereas the breakdown voltage and the predisruptive current in two systems were compared.

**Key words :** insulating barriers, point-plane gaps, breakdown voltage, predisruptive current, impedance, dielectric strength.