



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



**Mémoire de Master Académique
en Génie Electrique
Spécialité: Electrotechnique
Option: Technique de haute tension**

Thème

Effet de barrière sur la rigidité
diélectrique dans un système tige-
plan sous tension continue
positive

Proposé et dirigé par :

Dr.ALI .KHECHEKHOUCHE

Présenté par :

M^{me} OUBOUZID Nacima

Promotion: 2018

Remerciements

Louange à Dieu le tout puissant

*Au terme de ce modeste travail, je tiens à présenter mes
remerciements les plus sincères à:*

✚ *Dr A.KECHEKHOUCHE, mon promoteur, pour
ses orientations, conseils, et notamment sa patience;*

✚ *Aux membres du jury qui ont bien voulu juger mon
travail ainsi que tous ceux qui ont contribué de près
ou de loin à ma formation;*

✚ *A ceux qui ont participé à ma réussite: parents,
enseignants et ami(e) s sans exception*





Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- ★ *A mes très chers parents qui espèrent tant voir ce jour*
- ★ *A mon marié que je tiens à le remercier pour son soutien
qu'il m'apporte chaque jour, celui qui croit en moi afin
que je puisse réussir ;*
- ★ *A mes sœurs Fatima, Khadidja, Hamida, Aïacha;*
- ★ *A mes frères Youcef, Hamid, Idriss;*
- ★ *A mes très cher neveux et nièces Bassma,
Alissa, Momoh, Wassim, Badia, Sid Ali, Hana
, Amal, Marwa, Rimoché;*
- ★ *A mes amies Djihade, Noussaïba, Hakima, Karima,
Hafidha, Djamila, Khadidja, Safia et Fatma ;*
- ★ *A toute la promotion d'électrotechnique 2018;*
- ★ *A toutes les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce
mémoire;*



CHAPITRE I

Fig. I.1: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension.....	8
Fig. I.2: Circuit électrique équivalent série	10
Fig. I.3: Circuit électrique équivalent parallèle.....	10
Fig. I.4. Schéma des processus d'ionisations.....	12
Fig. I.5: Caractéristique courant-tension en régime prédcharge.....	13
Fig. I.6: Avalanche électronique de Townsend.....	14
Fig. I.7: Configuration plan-plan.....	15
Fig. I.8: $\log (i/i_0)=f(d)$	16
Fig. I.9: Avalanche électronique dans un champ homogène ($\varphi \neq 0$).....	18
Fig. I.10: Développement d'un streamer.....	19
Fig. I.11: Développement d'un leader.....	20
Fig. I.12: Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire.....	21
Fig. I.13: Disruption d'un intervalle d'air par streamers.....	22
Fig. I.14: Amorçage d'un espace d'air par leader.....	22
Fig. I.15 : Effet de la géométrie de l'électrode à la terre sur la décharge d'interception.....	23
Fig. I.16: tension d'amorçage $U_d = f(d)$	24

CHAPITRE II

Fig. II.1: Distribution des charges au niveau de la barrière isolante.....	32
Fig. II.2: Décharge directe du système pointe-barrière-plan ($d = 150\text{cm}$, $a = 40\text{ cm}$, $170/2500\mu\text{s}$)	33
Fig. II.3 : Système pointe-barrière-plan.....	34
Fig. II.4: Décharges glissantes dans le cas d'une pointe positive en contact avec la barrière ($d = 100\text{ cm}$ $U = 730\text{ kV}$ $1.2/50\mu\text{s}$)	34
Fig. II.5: Décharge disruptive dans un intervalle d'air pointe-barrière-plan de $1,5\text{m}$ (U prés de 1100kV)	35
Fig. II.6: Equivalence entre le système pointe-barrière-plan et l'association série pointe-plan ($d = 5\text{ cm}$)	37
Fig. II.7: Effet de la forme de la barrière ($d= 50\text{mm}$)	38

Liste des figures

Fig. II.8: Influence des prédécharges	38
Fig. II.9: Influence des barrières trouées	39
Fig. II.10 : Influence du nombre de barrières sur la tension disruptive en système pointe-pointe et pointe-plan (tension impulsionnelle)	41
Fig. II.11: Effet d'une barrière isolante sur le champ électrique en Système pointe plan ($V= 89 \text{ kV}$)	42
Fig .II.12: Diagramme schématique d'un système pointe-plan avec une barrière isolante [35].....	43
Fig. II.13: Distribution du champ électrique sous la barrière obtenue avec une sonde à effet pockels ($d =10 \text{ cm}$, $a = 3 \text{ cm}$)	43
Fig. II.14: Influence de largeur L de la barrière sur le champ électrique a sa surface supérieure [25].....	44
Fig. II.15: Champ électrique sur l'axe de la pointe HT pour deux ouvertures différentes de l'angle de la pointe	45
Fig. II.16: Champ électrique sur la surface supérieure d'une barrière isolante pour différentes ouvertures de l'angle de la pointe HT différentes de l'angle de la pointe	45
Fig. II.17: Champ électrique sur l'axe de la pointe HT pour une barrière avec des permittivités différentes	46
Fig. II.18: Champ électrique sur la face supérieure de la barrière pour des permittivités différentes	46

CHAPITRE III

Fig.III.1: Circuit de mesure et de visualisation.....	47
Fig.III .2: Photo de circuit d'alimentation.....	48
Fig.III.3: Photo et caractéristiques du modèle expérimental pointe-barrière-plan.....	49
Fig.III.4: Photo et caractéristiques du modèle expérimental pointe-barrière-pointe.....	49
Fig.III.5 : Abaque de K_h en fonction de l'humidité absolue	51
Fig. III.6 : Abaque de l'humidité absolue en fonction de la température	51
Fig. III.7 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d (e variable, $d=8\text{cm}$, pointe-plan).....	58
Fig. III.8 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d (e variable, pointe-pointe).....	58
Fig.III.9 : Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique (e variable, pointe-plan).....	59
Fig. III.10 : Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique (e variable, pointe-pointe).....	59
Fig. III.11 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($2L=15\text{cm}$, $e=3\text{mm}$).....	60
Fig. III.12 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($2L=15\text{cm}$, $e=5\text{mm}$).....	61
Fig. III.13 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($2L=15\text{cm}$, $e=8\text{mm}$).....	61

Liste des figures

Fig. III.14 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($2L=15\text{cm}$, pointe-plan).....	62
Fig.III.15: Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique ($2L=15\text{cm}$, pointe-plan).....	62
Fig.III.16: Chemin des décharges de rupture de l'espace d'air du système pointe-écrans- pointe pour une barrières d'épaisseur 3mm	63
Fig.III.17: Chemin des décharges de rupture de l'espace d'air du système pointe-écrans- plan pour une barrière d'épaisseur 3mm	63
Fig. III.18 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($D=15\text{cm}$, $e=5\text{mm}$).....	64
Fig. III.19 : Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique ($D=15\text{cm}$, pointe-plan).....	65
Fig. III.20: Étapes de propagation de la décharge sur une barrière métallique de 15cm de diamètre en contact avec la pointe.....	66

Listes des abréviations et des symboles

ϵ_r : Permittivité relative

E: Rigidité diélectrique

$\text{tg}\delta$: Facteur de dissipation diélectrique

ρ : Résistivité électrique

E_e : champ électrique extérieur

E_p : champ électrique propre

ϵ_a : La permittivité absolue

ϵ_r^* : la permittivité complexe

ϵ_r'' : indice de pertes

J : densité de courant

J_s : densité de courant de saturation

α : premier coefficient d'ionisation de Townsend

γ : deuxième coefficient de Townsend

ϵ_{ri} : est la permittivité relative de l'isolant.

ϵ_{rg} : est la permittivité relative du gaz.

U_c : Tension de claquage corrigée.

U_m : tension de claquage mesurée

U_{sb} : tension de claquage sans barrière

U_{sbm} : tension de claquage sans barrière mesurée

U_{sbc} : tension de claquage sans barrière corrigée

e : épaisseur

a : distance entre la pointe et la barrière

a' : est la distance barrière –plan

$2L$: la largeur de la barrière

D : le diamètre de la barrière

b :barrière

bm : barrière métallique

d : distance inter-électrode (8cm)

kd : Le facteur de correction de la densité de l'air

K_h : Le facteur de correction de l'humidité

$(U-U_{sbc})/U$: le taux d'augmentation de la rigidité diélectrique

CHAPITRE I

Tab. I.1: Propriétés des matériaux isolants.....	5
---	---

CHAPITRE II

Tab .II.1 : Paramètres de la décharge dans l'air pour différents matériaux	39
Tab .II.2: Courant maximum de décharges dans le cas d'un état de surface différent de la barrière	40

CHAPITRE III

Tab. III.1: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=3\text{mm}$ pointe-plan.....	52
Tab. III 2 : $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=5\text{mm}$ pointe-plan.....	53
Tab .III.3: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=8\text{mm}$ pointe-plan.....	53
Tab. III.4: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=8\text{mm}$, $D=15\text{cm}$ pointe-plan.....	54
Tab. III.5 : Rigidité diélectrique sans barrière pointe-plan.....	54
Tab. III.6: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=3\text{mm}$ pointe-pointe	55
Tab. III.7 : $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=5\text{mm}$ pointe-pointe.	55
Tab. III.8 : $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=8\text{mm}$ pointe-pointe	56
Tab. III.9 : Rigidité diélectrique sans barrière pointe-pointe	56
Tab. III.10: Diamètre de la barrière métallique $D=15\text{cm}$	64

SOMMAIRE

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Liste de figure.....	III
Liste de symbole.....	VI
Liste de tableau.....	VII
Table de matière.....	VIII

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les isolants et les décharges électriques

I.1 Introduction	3
I.2 Isolants	3
I.2.1 Définitions	3
I.2.1.1 Isolement	3
I.2.1.2 Isolant	3
I.2.1.3 Isolation	4
I.2.1.4 Diélectrique	4
I.2.2 Différents types d'isolants	4
I.2.2.1 Isolants gazeux	4
I.2.2.2 Isolants liquides.....	4
I.2.2.3 Isolants solides	4
I.2.3 Nature de l'isolation	6
I.2.3.1 Porcelaine	6
I.2.3.2 Verre	6
I.2.3.2.1 Verres trempés	6
I.2.3.2.2 Verres recuits	7
I.2.3.3 Silicone.....	7
I.2.4 Propriétés diélectriques des isolants	7
I.2.4.1 Rigidité diélectrique	8
I.2.4.2 Permittivité	8
I.2.4.3 Angle de pertes et facteur de dissipation	9
I.2.4.4 Résistivité et résistance d'isolement	10
I.2.4.4.1 Définition et signification	10
I.2.4.4.2 Résistance et résistivité superficielle	10

SOMMAIRE

I. 3 Mécanisme de rupture diélectrique des isolants solides	11
I. 3.1 Décharge intrinsèque	11
I.3.2 Décharge électromécanique	11
I.3.3 Décharge thermique	11
I.4 Mécanisme des décharges électriques dans les gaz.....	12
I.5 Décharge deTownsend dans l'air	12
I. 6 Décharge dans les gaz électronégatifs.....	17
I.7 Décharge de type streamer.....	18
I.8 Décharges de type leader.....	20
I.9 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses.....	21
I.9.1 Amorçage de l'air par avalanche primaire.....	21
I.9.2 Claquage de l'air par streamers.....	21
I.9.3 Disruption de l'air par leader.....	22
I.10 Influence de la géométrie de l'électrode à la terre	23
I.11 Influence de la nature de la tension.....	24
I.11.1 Tension alternative.....	24
I.11.2 Tension continue.....	25
I.12 Application des isolants dans l'industrie électrique.....	25
I.13 Conclusion	26
 <i>Chapitre II : Effet des écrans isolants dans les intervalles d'air pointe-plan</i>	
II.1 Introduction.....	27
II.2 Paramètres définissant la nature de la barrière.....	27
II.3 Décharges partielles	28
II.4 Influence des barrières sur la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan.....	30
II.4.1 Influence selon E. Marx.....	30
II.4.2 Influence selon H. Roser.....	30
II.4.3 Influence selon Tikhodeev.....	31
II.4.4 Influence selon M.P. Verma.....	32
II.4.5 Influence selon J.Pilling.....	32
II.4.6 Influence selon M.Awad.....	32
II.4.7 Influence selon A.Boubakeur.....	33
II.4.8 Influence selon Li Ming.....	36
II.4.9 Influence selon Z.You Bin.....	36

SOMMAIRE

II.4.10 Influence selon M.V.Sokolova.....	39
II.4.11 Influence selon M. C. Siddagangapa.....	40
II.4.12 Influence selon F.V. Topalis et I.A.Stathopulos.....	40
II.5 Influence des barrières isolantes sur le champ électrique des intervalles d'air pointe-plan	41
II.6 Conclusion.....	47

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1 Introduction	47
III.2 Mode opératoire.....	47
III.2.1 Dispositif expérimental et techniques de mesure.....	47
III.2.2 Circuit d'alimentation.....	48
III.2.3 Circuit de mesure de la tension appliquée.....	48
III.2.4 Modèle expérimentale	48
III.2.5 Visualisation de la décharge.....	50
III.2.6 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques	50
III.2.6.1 Facteur de correction K_d	50
III.2.6.2 Facteur de correction K_h	50
III.3 Résultats et discussions.....	52
III.3.1 Effet de position et d'épaisseur d'une barrière isolante	52
III.3.2 Influence de type de configuration.....	60
III.3.3 Effet de forme.....	62
III.3.4 Influence de la barrière métallique.....	64
III.4 Conclusion	66
Conclusion générale.....	68
Bibliographie.....	69

Introduction Générale

Introduction générale

Le développement des systèmes de haute tension a donné une grande impulsion à la recherche sur les barrières électriques dans les intervalles d'air. De nombreux travaux ont été orientés pour l'analyse des différents paramètres caractérisant les barrières telles que la géométrie, la position, la nature, le nombre, le degré de sévérité de la barrière et les dimensions de la barrière.

L'air, en tant que diélectrique, est largement utilisé comme isolation entre électrodes dans la technique de haute tension. En électrotechnique les principales applications des barrières concernent l'utilisation d'écrans isolants entre les contacts des disjoncteurs à gaz, les interrupteurs HT, les bornes de traversées, les isolateurs, les transformateurs et les actionneurs. Ces écrans isolants peuvent être des parties métalliques sous tension de différents appareillages, des conducteurs de lignes aériennes ou des bornes à haute tension dans les laboratoires d'essais. La géométrie et la nature des électrodes à champ électrique non uniforme sont telles que : pointe-pointe, pointe-plan, fil-plan, etc.

En conséquence, l'insertion d'une barrière isolante propre améliore la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-pointe et pointe-plan. Par contre les barrières sont installées dans des sites où règne une pollution atmosphérique ; à proximité des usines ou bien à un endroit exposé à des tempêtes de sable désertique, il se forme des dépôts de mélange de poussières et de sels minéraux. L'humidité de l'air environnante transforme les revêtements naturels, en couches conductrices. Ceci provoque une modification de répartition de la tension dans les intervalles pointe-barrière-pointe et pointe-barrière-plan ce qui peut engendrer le développement des décharges qui peuvent, progresser jusqu'au contournement total des intervalles d'air suscités.

Par conséquent, la tension d'amorçage de ces espaces d'air est influencée par plusieurs paramètres: longueur de l'intervalle, la distance interélectrode et les dimensions des électrodes mises respectivement sous tension et la terre ainsi que la nature et la polarité de la contrainte de tension appliquée à l'intervalle d'air.

Notre travail consiste à étudier l'effet de l'épaisseur d'un écran sur la rigidité diélectrique d'un système d'électrodes à champ non uniforme.

Pour bien cerner le sujet, nous avons structuré le mémoire en trois chapitres:

Introduction générale

- Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les isolants et les décharges électriques;
- Le second chapitre sera réservé à l'étude théorique de l'effet des écrans isolants dans les intervalles d'air pointe-plan;
- Le dernier chapitre sera consacré à l'expérimentation, interprétation et résultats obtenus.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les isolants et les décharges électriques

I.1 Introduction

Ainsi, les propriétés des isolants jouent un rôle très important dans la construction des appareils électriques. Conception et le fonctionnement de l'équipement électrique dépendent des matériaux disponibles.

Le passage du courant se fait difficilement dans les diélectriques car leurs atomes retiennent énergiquement les électrons. La résistivité des diélectriques est très grande car l'opposition au passage d'un courant est très forte. Un diélectrique placé entre deux conducteurs s'oppose donc au passage du courant entre ceux-ci.

La fonction principale d'un isolant est d'empêcher le passage du courant lorsqu'on le soumet à une tension électrique. Cependant, celui-ci ne peut supporter des tensions croissantes indéfiniment; à une certaine tension, il se produit un phénomène de claquage où la substance perd ses propriétés isolantes. Lorsqu'il atteint la tension de claquage, des électrons sont arrachés de leur orbite extérieure et deviennent libres. La tension de claquage requise pour provoquer cette avalanche électronique dépend de la nature de l'isolant et de son épaisseur.

La chaleur est la principale cause de dégradation des isolants solides. C'est pourquoi ces isolants sont répartis en différentes classes selon leur aptitude à supporter les températures plus ou moins élevées tout en garantissant une vie. L'étude des décharges électriques dans les intervalles d'air présente de l'intérêt d'un point de vue industriel pour les problèmes liés à l'isolement et à la protection des réseaux de distribution d'énergie (lignes à haute tension, transformateur générateur, ... etc).

Une décharge électrique (ou étincelle) est instantanée pour l'œil humain et s'accompagne d'un claquement sec et violent. Mais en réalité, cette étincelle, qui correspond au passage à l'état conducteur de l'air, ne se produit pas de façon instantanée mais avec un retard qui dépend essentiellement de la valeur de la distribution et de l'évolution temporelle de la charge.

I.2 Isolants

I.2.1 Définitions [1]

I.2.1.1 Isolement

On appelle isolement d'un ouvrage ou appareil électrique son aptitude à supporter les contraintes électriques qui lui sont appliquées (tension).

I.2.1.2 Isolant

Un isolant est une substance dont la conductivité est nulle, ou en pratique très faible. L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction électrique entre conducteurs soumis à

des champs électriques. On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$.

I.2.1.3 Isolation

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées.

I.2.1.4 Diélectrique

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. On le définit aussi comme un milieu dans lequel tout volume de la substance possède un moment dipolaire (polarisation permanente) ou susceptible d'en acquérir sous l'action d'un champ électrique (polarisation induite).

I.2.2 Différents types d'isolants

I.2.2.1 Isolant gazeux [1]

L'air et les gaz secs, considérés comme de bons isolants, sont dotés des propriétés suivantes :

- rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz;
- permittivité faible, les gaz sont auto-générateurs;
- phénomène d'ionisation des gaz;
- légers et non inflammables

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rare de l'air, l'hydrogène.

I.2.2.2 Isolants liquides [1]

Les liquides diélectriques sont généralement utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs câbles). Leur rôle est de se substituer aux vacuoles qui sont siège des décharges partielles. L'utilisation des liquides a pour but:

-d'améliorer le pouvoir de coupure de certains appareils électriques par l'amélioration des conditions d'extinction de l'arc électrique.

- d'assurer une bonne isolation électrique et permettre un bon refroidissement.

I.2.2.3 Isolants solides [1]

L'origine des isolants solides est minérale, organique et résineuse (**Tab. I.1**):

- les isolants d'origine minérale sont des substances siliceuses et calcaire, solides à la température ordinaire, incombustibles et supportant des températures élevées, à l'exception des hydrocarbures (verre, produits céramiques,...);

- les isolants d'origine organique sont généralement des substances fibreuses à base de cellulose. Ces matériaux ont une bonne résistance mécanique, ils sont combustibles et ne supportent pas des températures supérieures à 100°C sans perdre leurs propriétés mécaniques et diélectriques (cellulose, silicone);

- les isolants d'origine résineuse sont généralement des matières organiques naturelles ou synthétiques qui peuvent se présenter à l'état solide, thermoplastique ou plastique (caoutchouc,...).

Propriétés des matériaux isolants						
Isolants	propriétés électriques		propriétés thermiques		Propriétés mécaniques	notes
	rigidité	Constante diélectrique	Température d'opération	Conductivité thermique	Masse volumique	
	MV/m	ϵ_r	°C	W/ (m. °C)	kg/m ³	
air sec	3	1	2000	0,024	1,29	Gaz à 0°C 101 kPa
azote (N ₂)	3,5	1	—	0,024	1,25	
hexafluorure de soufre (SF ₆)	30 à 400	1	—	0,014	6,6	
hydrogène	2,7	1	—	0,17	0,09	
oxygène	3	1	—	0,025	1,43	
Caoutchouc	12 à 20	4	65	0,14	950	liquide synthétique
Epoxy	20	3,3	130	0,3	1600 à 2000	
huile minérale	10	2,2	110	0,16	860	
nylon	3	4	1400	2,4	1140	
papier imprégné	14	4 à 7	120	0,17	1100	
polyéthylène	40	2,3	90	0,4	930	
PVC	50	3,7	70	0,18	1390	
polyamide	200	3,8	180 à 400	0,3	1100	
porcelaine	4	6	1300	1,0	2400	
silicone	10	-	250	0,3	1800 à 2800	
verre	100	5 à 7	600	1,0	2500	

Tab. I.1: Propriétés des matériaux isolants

I.2.3 Nature de l'isolation**I.2.3.1 Porcelaine**

La porcelaine est constituée par du kaolin et du quartz de première qualité. Ils sont cuits à 1400°C, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau.

Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes:

- Rigidité diélectrique élevée, 25 à 35 kV/mm;
- Permittivité relative $\epsilon_r = 6$ à 7;
- Grande résistivité, environ $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ à 20 °C;
- Faibles pertes électriques en haute tension;
- Résistance mécanique 400 à 2500 N/mm.

En plus de ces bonnes caractéristiques, elle est d'une grande résistance aux agents atmosphériques et chimiques, elle n'absorbe pas l'humidité. Elle présente aussi une grande résistance aux températures élevées sauf qu'au-delà de 300°C; ces propriétés diélectriques diminuent rapidement.

I.2.3.2 Verre [1]

Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900°C; un mélange de sable, de chaux et de carbonate de Sodium. Le liquide, peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de Silicate alcalin et de Calcium ou de Plomb.

Les isolateurs en verre, un peu moins chers, mais plus fragiles que ceux en porcelaine, sont employés jusqu'à environ 30 kV.

- Sa rigidité est excellente à froid, de l'ordre de 50 à 100 kV/mm, tandis qu'elle se trouve divisée par 100 à 400°C.
- Sa permittivité relative environ 5 à 8.
- Sa résistivité à 20°C: 10^{10} à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$.

Les principales variétés de verres utilisées dans l'industrie électrique sont les suivantes:

I.2.3.2.1 Verres trempés [2]

Ils consistent à porter la pièce à une température voisine de son point de ramollissement 700°C et à la refroidir brusquement au moyen de jets d'air froid sous pression, ce traitement améliore les qualités mécaniques du verre ainsi que sa tenue aux chocs thermiques en traction

environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter une variation brusques de température pouvant atteindre 100°C.

L'avantage du verre trempé est de rendre visible tout isolateur perforé, ce qui n'est pas le cas des isolateurs à capot et tige en céramique, sous les efforts d'une contrainte électrique trop forte ou même lors d'une défectuosité de l'isolateur.

I.2.3.2.2 Verres recuits [2]

Ont surtout été utilisés pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension. On cite aussi les verres sodiques, borosilicate et les polyamides.

I.2.3.3 Silicone [2]

On donne ce nom à toute une catégorie de corps récemment inventés qui sont analogues aux résines synthétiques. Ils en diffèrent parce qu'ils ne contiennent que peu ou pas de carbone dans la constitution de leurs molécules. Ils ne sont pas combustibles. On en a fabriqué de nombreuses variétés aux propriétés très diverses et fait des huiles, des vernis, des graisses, du caoutchouc. Les silicones résistent jusqu'à 200°C sans durcissement ni décharge, et conservent leurs propriétés dans une large gamme de température (- 40 à 200°C):

- ✚ Rigidité diélectrique 15 kV/mm;
- ✚ Permittivité relative à 25 °C et 1 kV est de 5,4;
- ✚ Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg}\delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$;
- ✚ Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m.K ;
- ✚ Température d'auto-inflammation est supérieure à 300°C;
- ✚ Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m³.

I.2.4 Propriétés diélectriques des isolants [3]

On peut subdiviser les caractéristiques électriques des matériaux isolants en deux grandes familles:

- La première comprend les propriétés essentielles qui sont:

- * Rigidité diélectrique E ;
- * Permittivité relative ϵ_r ;
- * Facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$;
- * Résistivité électrique ρ ;
- * Décharge disruptive ou claquage U_C .

- La seconde famille réunit des caractéristiques plus directement liées à l'emploi de l'isolant dans une catégorie de matériels déterminée, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau au cours de son service (Température, fréquence, ...). Dans certains cas ces dernières caractéristiques peuvent être les éléments déterminants du choix d'un isolant destiné à une certaine fonction.

I.2.4.1 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à la quelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux on distingue:

- la rigidité diélectrique transversale, pour la quelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau ;
- la rigidité diélectrique longitudinale, obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant.

I.2.4.2 Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre E_p à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique (E_e) extérieur appliqué (**Fig. I.1**). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

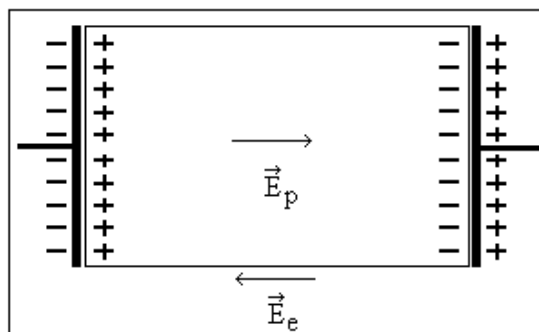


Fig. I.1: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

La permittivité relative d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité C_x entre deux électrodes supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité C_0 de la configuration d'électrodes dans le vide:

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (I.1)$$

La permittivité absolue ϵ_a est le produit de la permittivité relative par la constante électrique du vide.

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (I.2)$$

$$\epsilon_0 = 10^{-9} / 36 \pi = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Dans le cas des diélectriques non parfaits, on définit de façon analogue une permittivité complexe relative qui tient compte de la dissipation d'énergie dans le diélectrique. Elle s'écrit :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (I.3)$$

Où ϵ_r' est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que ϵ_r dans le cas des diélectriques parfaits.

$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \quad (I.4)$$

I.2.4.3 Angle de pertes et facteur de dissipation

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (**Fig. I.2 et 3**).

Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\varphi < \pi/2$. Son complément δ est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) et s'obtient de la façon suivante:

$$\text{tg } \delta = I_a / I_r = U_a / U_r = P_a / P_r \quad (I.5)$$

D'après la formule (I.3) on peut écrire:

$$\text{tg } \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r' \quad (I.6)$$

Le produit $\epsilon_r'' = \epsilon_r' \text{tg } \delta$ est dénommé indice de pertes, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

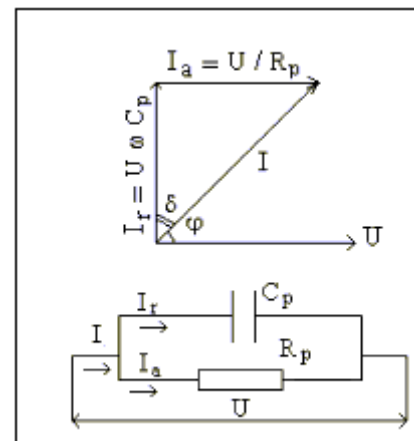
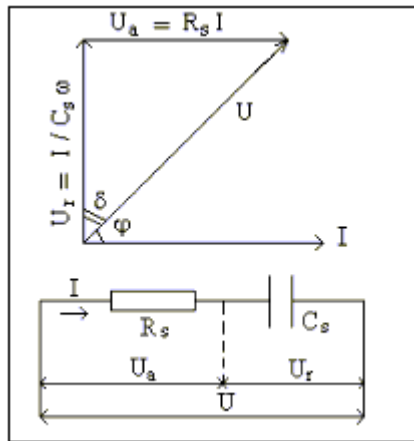


Fig. I.2: Circuit électrique équivalent série **Fig. I.3:** Circuit électrique équivalent parallèle

I.2.4.4 Résistivité et résistance d'isolement [3]

I.2.4.4.1 Définition et signification

La résistance transversale ou volumique est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

La résistance superficielle est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

La résistance d'isolement fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

I.2.4.4.2 Résistance et résistivité superficielle

Dans les matériels électroniques (cartes imprimées) l'isolement principal entre deux conducteurs est assuré par la surface de l'isolant, d'où l'importance pratique de la détermination de la résistance longitudinale. Cette résistance comporte d'une part la résistance purement superficielle, mais aussi une certaine fraction de la résistance interne du matériau.

Les valeurs relatives de ces deux composantes de la résistance sont fonction de divers paramètres et notamment de la largeur et de l'écartement entre conducteurs ainsi que de l'état d'humidification respectif des couches superficielles et internes du matériau. Par définition, la résistance superficielle est le quotient de la tension continue appliquée entre les deux électrodes disposées à la surface de l'isolant par le courant qui en résulte. La résistivité superficielle est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

I.3 Mécanisme de rupture diélectrique des isolants solides [4]**I.3.1 Décharge intrinsèque**

Quand la contrainte diélectrique appliquée à l'isolant solide atteint, en un temps très court, une limite supérieure appelée contrainte diélectrique intrinsèque, on a alors une rupture diélectrique intrinsèque. Celle-ci a lieu pour des temps d'application de la tension de l'ordre de 10^{-8} s, c'est pourquoi elle est considérée comme étant de nature électronique.

Les contraintes entraînant la rupture diélectrique intrinsèque sont supérieures à 106 V/cm. La contrainte intrinsèque est considérée atteinte lorsque les électrons du solide acquièrent suffisamment d'énergie de la part du champ électrique appliqué pour traverser la barrière d'énergie et passer ainsi de la bande de valence à la bande de conduction.

I.3.2 Décharge électromécanique

Des substances pouvant supporter des déformations appréciables sans rupture peuvent se rompre quand les forces de compression électrostatique appliquées sur le matériau dépassent sa rigidité mécanique. Ces forces de compression apparaissent par attraction entre charges électriques qui apparaissent quand la tension est appliquée.

La pression exercée dans beaucoup de matériaux quand le champ appliqué est de l'ordre de 106 V/cm est de plusieurs kg/cm².

I.3.3 Décharge thermique

Le courant de conduction, en générale très faible, et les pertes diélectriques par relaxation en tension alternative produisent une énergie calorifique dans le solide. Quand le temps d'application de la tension est grand, la quantité de chaleur générée dans le solide devient importante. Si cette énergie calorifique est supérieure aux possibilités d'évacuation par conduction ou convection thermique du diélectrique dans les conditions de refroidissement données, la température du diélectrique va augmenter, provoquant une instabilité thermique du diélectrique et une augmentation de courant de conduction.

Le diélectrique subit alors un claquage thermique. Les pertes diélectriques sont plus importantes en tension alternative qu'en tension continue parce que les pertes par relaxation dépendent de la fréquence. Par conséquent, la contrainte de claquage thermique est plus petite en tension alternative qu'en tension continue et elle décroît avec la fréquence de la source de tension. En générale, la conductivité du solide croît avec la température et les conditions d'instabilité thermique sont atteintes quand le taux d'écoulement dépasse le taux de refroidissement.

I.4. Mécanisme des décharges électriques dans les gaz [5]

Sous l'effet des rayonnements (naturels) ionisants, un gaz contient toujours une certaine quantité de particules chargées. Soumises à un champ électrique et donc à la force de Coulomb, les particules chargées vont entrer en collision avec les espèces environnantes. On distingue alors deux types de chocs: élastiques et inélastiques. Dans les chocs élastiques, les particules conservent leur énergie, seule leur vitesse est modifiée. L'énergie cinétique globale du système reste inchangée. Par contre, dans les chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change.

L'énergie de la particule incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau d'énergie supérieure ou soit ionisée. La production des charges (ex : électrons, ions positifs, ions négatifs) est le mécanisme le plus important dans la conduction des gaz. Il y a plusieurs processus pour générer ces charges, les processus importants responsables de l'ionisation d'un gaz sont résumés dans la figure suivante:

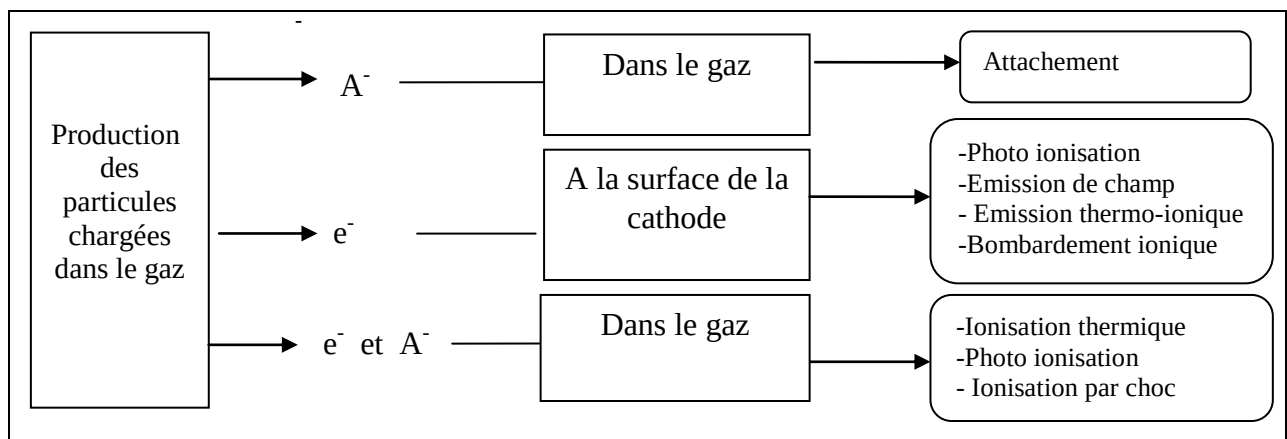


Fig. I.4. Schéma des processus d'ionisations

I.5 Décharge de Townsend dans l'air [5]

Soit un diélectrique gazeux contenu entre deux électrodes planes distantes de d . En absence de tout champ électrique, il peut exister dans ce gaz un certain nombre de particules chargées produites soit par des mécanismes naturels tel que le rayonnement ultraviolet ou radioactivité, soit par des mécanismes artificiels, par bombardement de la surface cathodique à l'aide d'une source de rayonnement ultraviolet.

En appliquant à l'intervalle interélectrode une tension V (dans un champ E), l'existence de telles charges entraînera la circulation dans le circuit extérieur d'un courant de faible intensité.

Dans le vide ou un gaz sous faible pression, la densité de courant est :

$$J = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left(\frac{2e}{m} \right)^{0,5} \frac{(V)^{1,5}}{(d)^2} \quad (\text{I.7})$$

e : la charge de l'électron (eV) ; m : la masse de l'électron (kg);

d : distance interélectrode (m); $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (F/m), constante diélectrique.

Cette formule n'est valable que pour $J < J_s$, avec J_s densité de courant de saturation.

Dans un gaz sous pression moyenne ou élevée, le mouvement des électrons est freiné par la présence des molécules. En admettant qu'il n'y a pas de création de nouvelles charges, la densité de courant devient :

$$J = \frac{9}{8} q \mu \frac{V^2}{d^3} \quad (\text{I.8})$$

Où :

μ est la mobilité des électrons, avec $\mu = v/E$, où v est la vitesse de dérive et ε est la permittivité absolue. Dans ces deux cas, les électrons émis à la cathode n'ont pas acquis assez d'énergie pour arracher des électrons aux molécules du gaz.

L'allure du courant traversant l'isolation gazeuse est donnée par la figure (**Fig. I.5**)

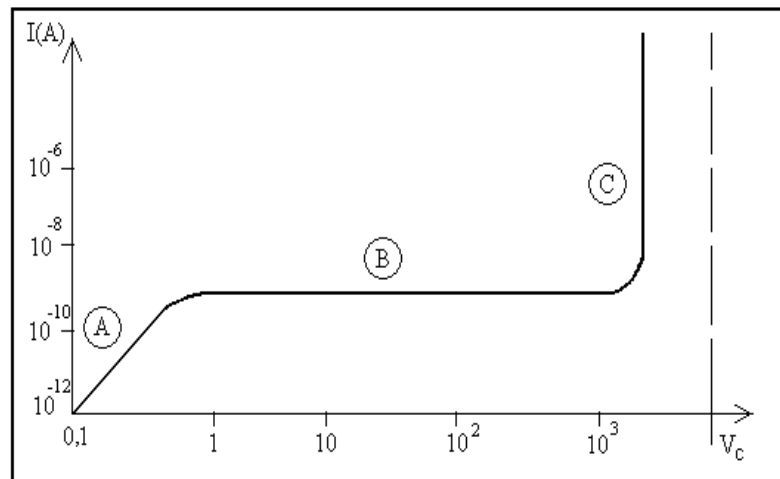


Fig. I.5: Caractéristique courant-tension en régime prédécharge

Après une croissance du courant proportionnelle à la tension (zone A), on constate en B une saturation correspondant à la collection aux électrodes de toutes les charges produites dans l'intervalle interélectrodes.

Une augmentation de nouveau de la tension entraîne une croissance rapide du courant au voisinage d'une tension V_c , dite tension de claquage (zone C).

La stabilité de la décharge dans cette région est déterminée en insérant une forte résistance en série dans le circuit extérieur pour des courants de l'ordre de microampère. Dans le cas contraire, la décharge évolue vers d'autres régimes, caractérisés par des courants de l'ordre de quelques ampères, décrit par Townsend comme phénomènes de multiplication (ou avalanche) électronique par collision.

Un électron germe soumis à un champ électrique d'intensité supérieure à une certaine valeur, acquiert une énergie cinétique suffisante pour ioniser par collision une particule neutre du gaz. Les nouveaux électrons créés participent à leur tour au mécanisme d'ionisation d'autres molécules neutres, produisant ainsi une multiplication ou avalanche électronique de Townsend (**Fig. I.6**).

Supposant qu'un électron dans un champ électrique suffisamment grand peut ioniser α molécules par unité de temps de longueur dx . α est appelé 1^{er} coefficient de Townsend (**Fig. I.7**). Ce coefficient dépend :

- De l'énergie nécessaire à l'ionisation des molécules de gaz considéré (**Fig. I.6**);
- De la loi de distribution en énergie des électrons: l'énergie acquise par les électrons entre deux chocs successifs, obéit à une loi de statistique, de telle sorte que seule une fraction des électrons atteint l'énergie nécessaire à l'ionisation;- Le coefficient α résulte en fait de deux mécanismes contradictoires: la multiplication par collisions (α') et l'attachement (η) tel que : $\alpha = \alpha' - \eta$.

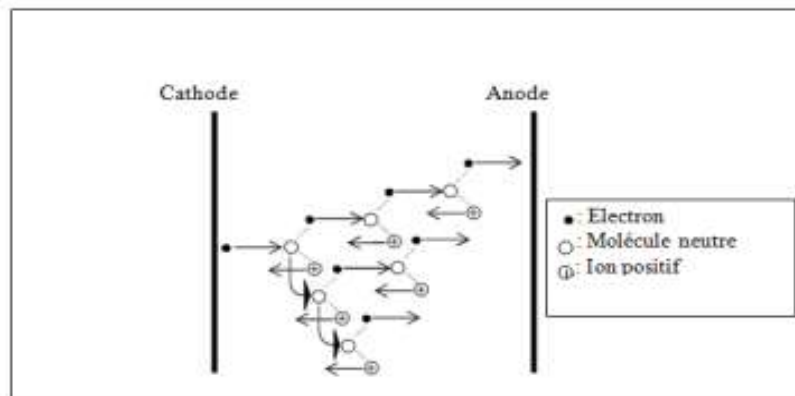


Fig. I.6: Avalanche électronique de Townsend

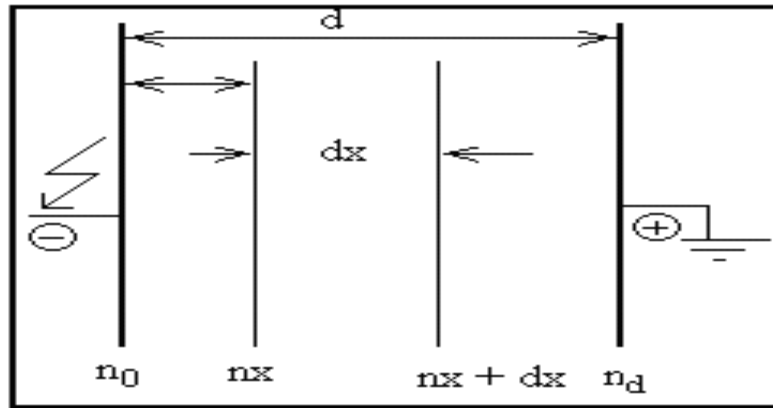


Fig. I.7: Configuration plan-plan

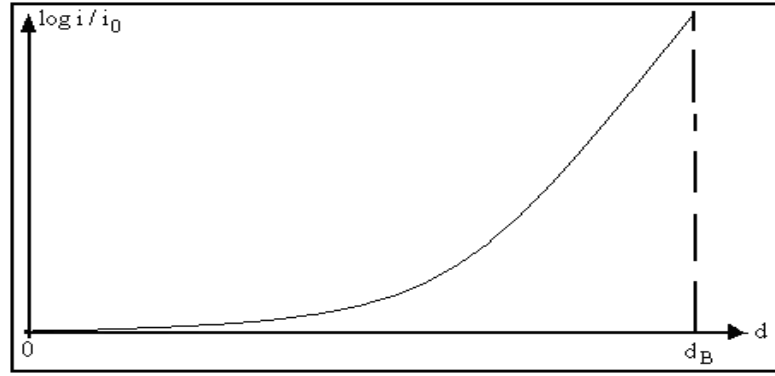
Lorsque le champ électrique est insuffisant, la recombinaison l'emporte sur la multiplication et la formation d'une avalanche est impossible. Dans l'air atmosphérique aucune avalanche ne peut se former en dessous de 27kV/cm atm. Selon Townsend la relation liant α au champ électrique et à la pression est de la forme :

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(\frac{-Bp}{E}\right) \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$A=14.6$; $B=635 \text{ V/cm Torr}$; $150 < E/p < 600 \text{ V/cm Torr}$ pour l'air

Si l'on représente la courbe $\log(i/i_0)$ dans l'expérience réalisée avec une irradiation de la cathode, il apparaît une augmentation rapide de la pente α de la droite à partir d'une valeur de $d(d_B)$. Ce comportement s'explique par l'action, sur la surface cathodique, des ions positifs laissés par l'avalanche primaire. Ces ions dérivent vers la cathode sous l'effet du champ électrique et peuvent alors acquérir de l'énergie suffisante pour arracher des électrons de la surface cathodique. L'efficacité de ce phénomène dépend à la fois du champ réduit (E/p) et du travail de sortie de la surface cathodique, donc du métal qui constitue la cathode. Quantitativement on définit un coefficient γ , dit deuxième coefficient de Townsend, qui exprime la probabilité qu'à un ion de créer un électron.

Fig.I.8: $\log (i/i_0)=f(d)$

L'émission d'électrons secondaires sous le choc des ions positifs est un phénomène de première importance, qui est invoqué dans l'explication du mécanisme d'entretien de la décharge. Un ion positif, animé d'une cinétique W_c , neutralise un électron de la cathode en libérant de l'énergie d'ionisation W_i , cet électron est extrait du métal en absorbant une énergie W_e , l'énergie disponible est donc : $W_c + W_i \geq 2W_e$

Supposons que n_x électrons à la distance x de la cathode produisent non seulement $\alpha n_x dx$ mais également $\omega n_x dx$ nouveaux électrons à la cathode. Le nombre total d'électrons n_0 émis à la cathode est alors :

$$n'_0 = n_0 + \int_0^d \omega n_x dx, \text{ avec } n_x = n'_0 e^{\alpha x},$$

$$n'_0 = n_0 + \int_0^d \omega n'_0 e^{\alpha x} dx = n_0 + \frac{\omega}{\alpha} n'_0 e^{\alpha d} = n_0 + n'_0 \frac{\omega}{\alpha} (e^{\alpha d} - 1)$$

$$n_0 = n'_0 \left[1 - \frac{\omega}{\alpha} (e^{\alpha d} - 1) \right], \text{ avec } \frac{\omega}{\alpha} = \gamma, \gamma \text{ est le deuxième coefficient de Townsend,}$$

$$n_0 = n'_0 [1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)] \Rightarrow n'_0 = \frac{n_0}{[1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)]}$$

Le nombre total d'électrons arrivent à l'anode est de :

$$n_d = n'_0 e^{\alpha d} = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.10})$$

$$\text{Avant le claquage, le courant s'écrit : } i = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.11})$$

Le critère de claquage est défini selon Townsend comme la tension pour laquelle i devient infini soit $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ et comme

$$e^{\alpha d} \gg 1 \Rightarrow \gamma e^{\alpha d} = 1 \Rightarrow \gamma = \frac{1}{e^{\alpha d}},$$

Pour chaque valeur de E/P , on trouve une valeur d_c et une tension de rupture diélectrique

$$V_c = E \cdot d_c.$$

Le critère de Townsend ainsi donné peut s'interpréter tout simplement en considérant que e^{ad} représente le nombre d'ions positifs créés par une avalanche primaire à partir d'un seul électron.

Ces ions arrivant à la cathode vont produire en moyenne γe^{ad} électrons secondaires.

a) Si $\gamma e^{ad} < 1$, la décharge est dite non autonome, car elle ne peut se maintenir d'elle-même par le fait des mécanismes secondaires si l'apport d'électrons créés par une source extérieure est interrompu ;

b) Si $\gamma e^{ad} = 1$, le nombre d'ions créés par l'avalanche primaire est en moyenne juste suffisant à maintenir par bombardement de la cathode, l'avalanche électronique. La décharge est autonome, c'est-à-dire qu'elle peut se maintenir en l'absence d'une source extérieure de production de charges. Ce critère définit le critère d'amorçage V_c .

c) Si $\gamma e^{ad} > 1$, le processus des avalanches successives est cumulatif, le courant devient très intense, un canal conducteur se forme, donnant naissance à un claquage de l'intervalle d'air interélectrode.

I. 6 Décharge dans les gaz électronégatifs [5]

Si l'on tient du coefficient d'attachement η qui est le nombre d'électrons captés par unité de longueur et si l'on néglige temporairement le coefficient γ , le nombre d'électrons générés par collision à une distance x de la cathode dans l'intervalle dx : $dn_1 = n_x \alpha dx$ et le nombre d'électrons captés est :

$$dn_2 = \eta n_x dx$$

Le nombre d'électrons libres s'écrit : $dn_x = dn_1 - dn_2 = n_x (\alpha - \eta) dx \rightarrow n_x = n_0 e^{(\alpha - \eta)x}$

Le courant dû aux charges négatives est formé de deux composantes :

$$i = i_{al} + i_{ca} = e^- (n_{al} + n_{ca}) = e^- (n_x + n_2)$$

$$n_2 = \int_0^x dn_2 = \int_0^x \eta n_x dx = \int_0^x \eta n_0 e^{(\alpha - \eta)x} dx = \frac{\eta n_0}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha - \eta)x} - 1],$$

$$i = e^{-(n_x + n_2)} = e [n_0 e^{(\alpha - \eta)x} + \frac{\eta n_0}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha - \eta)x} - 1]],$$

$$i = e \left[\frac{n_0 (\alpha e^{(\alpha - \eta)x} - \eta)}{\alpha - \eta} \right] = \frac{\eta n_0}{\alpha - \eta} [\alpha e^{(\alpha - \eta)x} - \eta],$$

$$i = \frac{i_0}{\alpha - \eta} [\alpha e^{(\alpha - \eta)x} - \eta] \quad (I.12)$$

Si l'on tient compte de γ , on trouve :

$$i = \frac{i_0 [a e^{(a-\eta)x} - \eta]}{a - \eta - a\gamma [e^{(a-\eta)x} - 1]} \quad (I.13)$$

La rupture diélectrique se produira pour :

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha - \eta} (e^{(\alpha-\eta)d_c} - 1 = 1)$$

- Lorsque $\alpha \gg \eta$, la rupture diélectrique se produit toujours pour une valeur de d suffisamment grande ;
- Si $\alpha < \eta$, le critère s'écrit $\alpha = \frac{\eta}{1+\gamma}$ et si $\gamma \ll 1$, alors $\alpha = \eta$,

Cette condition dépend de E/P et établit une limite $(E/P)_{\lim}$ en dessous de laquelle la rupture diélectrique n'est pas possible.

I.7 Décharge de type streamer [5]

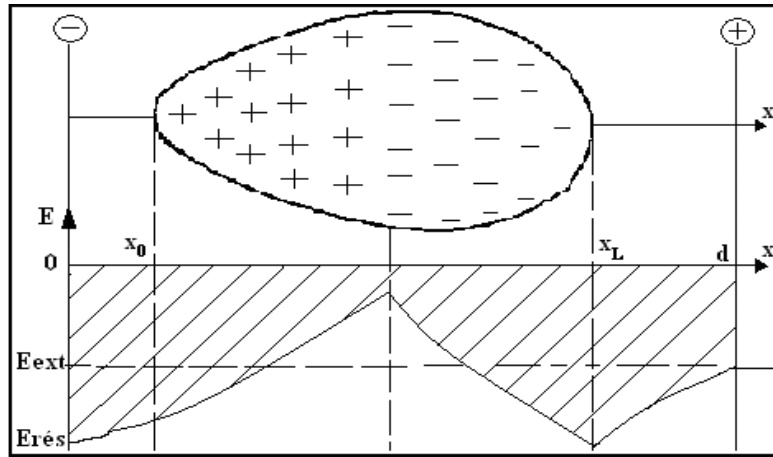


Fig. I.9: Avalanche électronique dans un champ homogène ($\varphi \neq 0$).

Si l'on considère que la mobilité des ions positifs est 104 fois plus faible de celle des électrons, la répartition des porteurs de charges ainsi que celle du champ électrique résultant peut-être estimée qualitativement (**Fig. I.9**).

Il en résulte que :

- Le champ résultant à la tête et à la queue de l'avalanche électronique est plus grand que le champ appliqué ;
- Le champ résultant à l'intérieur de l'avalanche est plus petit que le champ extérieur.

Le mécanisme de l'avalanche décrit par Townsend ne conserve sa validité que pour des produits dp inférieur à 200cm.Torr. Au-delà, l'expérimentation montre qu'il se produit des phénomènes peu compatibles avec le mécanisme d'avalanche de Townsend :

1) La densité de courant de décharge croît avec la tension. La faible mobilité des ions positifs crée une concentration de charges d'espace qui modifie le champ appliqué initialement et donc la

valeur du coefficient α . Le critère s'écrit sous sa forme générale: $\gamma \left(e^{\int_0^1 \alpha dx} - 1 \right) = 1$;

2) Le phénomène de streamers est caractérisé par un temps de retard de l'ordre de 10^{-8} s, alors que la décharge de Townsend nécessite des temps de 10^{-5} s pour entraîner un claquage. Il se produit dans des gaz soumis à des pressions élevées. Plus le produit αd est grand plus petit est la probabilité pour qu'une avalanche puisse parcourir la distance d .

Sachant que le nombre d'électrons en tête de l'avalanche ainsi que celui d'ions positifs en queue de l'avalanche augmente exponentiellement avec α et x , Reather a établi un critère simple basé sur le fait que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer.

Il s'écrit simplement $\int_0^{x_c} \alpha dx = \ln N_c$, avec x_c distance critique et N_c nombre critique d'électron, égal à environ 108 électrons.

La formation d'un streamer s'explique par des mécanismes de photoionisation (Modèle de Meek) se produisant à l'intérieur de l'avalanche primaire. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des molécules neutre qui reviennent à leur état fondamental avec émission de photons. La tête et la queue sont aussi les sièges d'une importante émission de photons qui sont absorbés par les gaz environnant. Si l'électron produit se trouve au voisinage de l'avalanche primaire, il va créer une nouvelle avalanche, dite avalanche secondaire selon le mécanisme de multiplication électronique (**Fig. I.10**).

Les avalanches secondaires et subséquentes prennent naissance à la tête et à la queue de l'avalanche et se développent par pas dans la direction de l'anode et de la cathode. La vitesse de propagation du streamer peut atteindre 1000cm/ μ S.

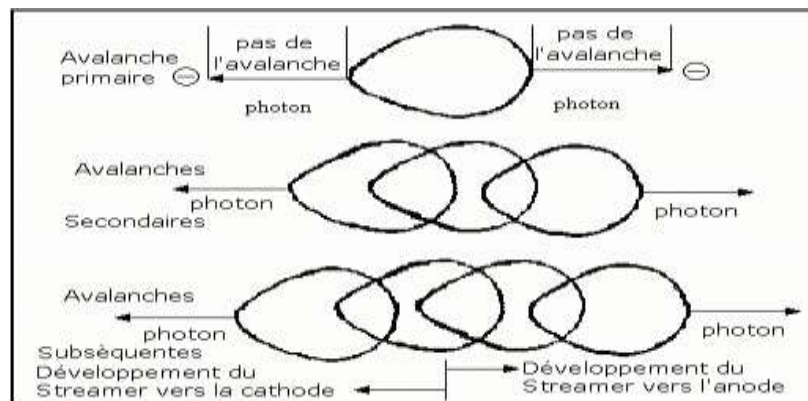


Fig. I.10: Développement d'un streamer

I.8 Décharges de type leader [6]

La tenue diélectrique des grands intervalles d'air diminue avec la distance interélectrode. Si le champ électrique moyen à l'amorçage est encore de 4,5kV/cm pour 30cm. Ceci est dû à l'influence d'un nouveau phénomène physique dénommé leader. Il est matérialisé par un canal de quelques millimètres de diamètre qui est observé dès que l'espace interélectrode dépasse une valeur comprise entre 40cm et 80cm selon les conditions expérimentales.

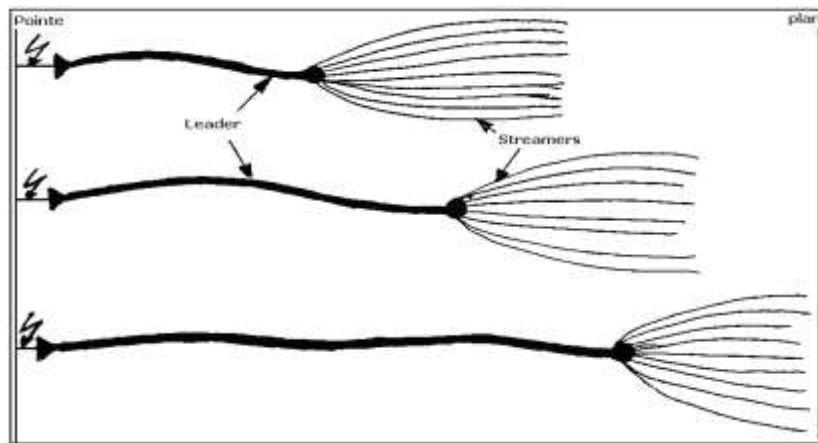


Fig. I.11: Développement d'un leader

Lorsque les streamers qui participent à l'apparition de l'effet couronne sont suffisamment développés, le gaz continu dans le tronc commun de la décharge s'échauffe sous l'action du courant électronique, sa conductivité, se met à croître, si bien que tout se passe comme si l'électrode s'était allongée. L'effet couronne se trouve donc déplacé plus en avant dans l'intervalle (**Fig. I.11**) et en proche, ce canal s'allonge jusqu'à traverser complètement l'intervalle interélectrode. C'est par un mécanisme analogue que se développe un coup de foudre.

I.9 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses [7]

L'amorçage d'un intervalle d'air peut avoir lieu par trois phénomènes distincts :

- Première avalanche;
- Streamers;
- Leader

On choisit comme configuration pointe positive-plan et pour isolation gazeuse l'air pour les raisons suivantes :

- Tension de claquage plus petite possible;
- Intérêt technique (dimensionnement des isolations externes).

I.9.1 Amorçage de l'air par avalanche primaire

Ce type de claquage n'existe que dans le cas de champ extrêmement inhomogènes (aiguilles, fil fin, etc....) et pour des tensions de choc relativement peu variable (tension continue, à fréquence industrielle,...) car d'une part l'avalanche électronique n'atteint pas sa taille critique avant le claquage et que d'autre part sa durée de vie est suffisamment grande pour que la formation d'un champ homogène par les charges d'espace s'établisse. Le champ électrique dans l'avalanche est de l'ordre de 15 à 20 kV/cm. La naissance d'un leader instable peut s'expliquer par le fait qu'avec l'augmentation de la tension de choc le phénomène de décharge s'intensifie créant ainsi une forte densité de courant au niveau de l'électrode sous tension engendrant une thermo-ionisation. Le claquage s'achève par propagation du leader vers l'électrode opposée (**Fig. I.12**).

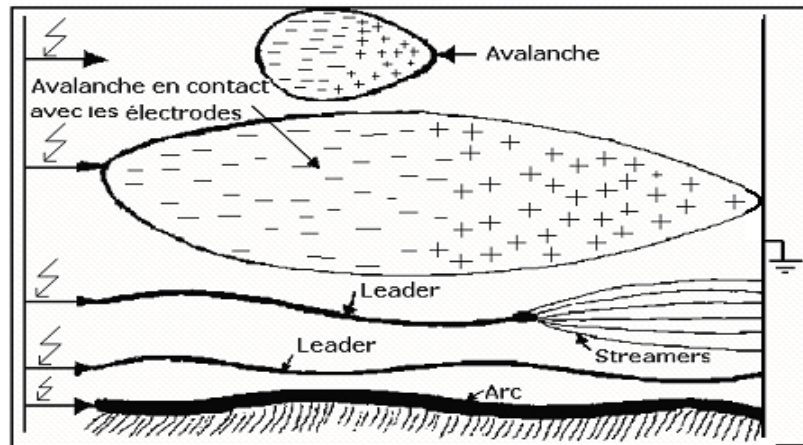


Fig. I.12: Amorçage d'un intervalle d'air par avalanche primaire

I.9.2 Claquage de l'air par streamers

En appliquant une tension impulsionnelle dont le temps de front t_f varie entre 100 à 1000 μ s, les avalanches électroniques créées dans l'intervalle d'air interélectrode atteignent leur taille critique de telle sorte que les streamers prennent naissance dans l'espace d'air et progressent vers les électrodes.

Si le champ résultant dépasse celui des streamers ($E_{S+}=4$ à 5 kV/cm), les streamers se multiplient et peuvent se propager jusqu'à contact du plan mis à la terre. A ce moment là, du fait de la contribution de l'électrode à la terre phénomène (effet γ).

La forte densité de courant engendrée au niveau de l'électrode sous tension provoque la thermo-ionisation. Ce phénomène donne naissance à un leader instable se développant dans l'intervalle d'air considéré.

Dès que le leader relie les deux électrodes, un arc se forme, permettant ainsi la circulation du courant de court-circuit (**Fig. I.13**).

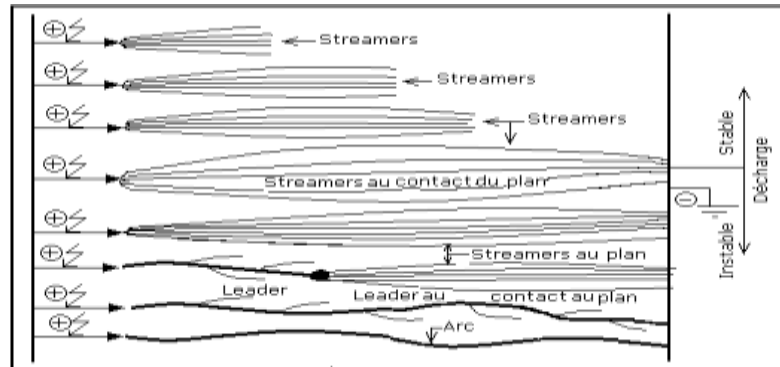


Fig. I.13: Disruption d'un intervalle d'air par streamers

I.9.3 Disruption de l'air par leader

Pour de longs intervalles d'air, la naissance d'un leader peut avoir lieu sans la contribution de l'électrode opposée. Dans ce cas le leader est stable. Dès que les streamers issus de la tête du leader atteignent l'électrode opposée, le leader devient instable. A partir de cet instant le processus évolue de façon analogue au cas précédent (**Fig. I.14**).

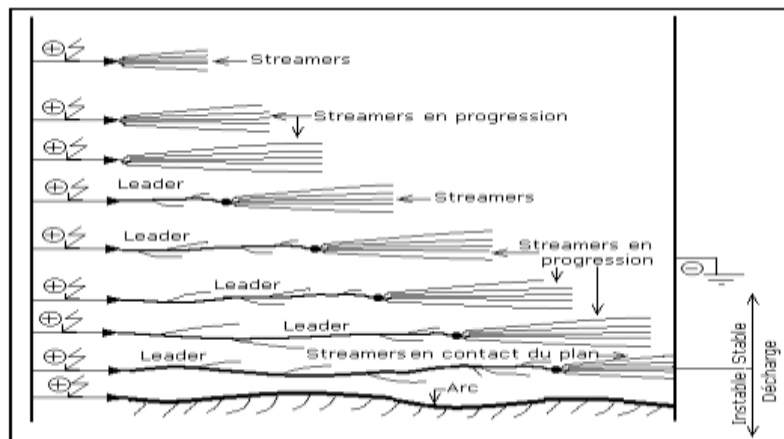


Fig. I.14: Amorçage d'un espace d'air par leader

I.10 Influence de la géométrie de l'électrode à la terre [7]

Dans un intervalle pointe-pointe, l'étincelle de laboratoire résulte de la propagation de deux décharges positive et négative l'une vers l'autre.

Le cas de l'intervalle pointe positive-plan correspond à une seule décharge positive (**Fig. I.15a**).

Si l'électrode à la masse est remplacée par une pointe (**Fig. I.15 b**) aucune décharge négative n'est observée à la cathode avant l'arrivée sur celle-ci des streamers positifs.

Cependant, dès cet instant un leader négatif se développe à la rencontre du leader positif.

Le cas de l'intervalle pointe négative-plan est analogue (**Fig. I.15c**).

Dès l'arrivée au plan du streamer, un leader positif se développe à la rencontre du leader négatif.

Enfin si l'on remplace le plan par une pointe (**Fig. I.15d**) des streamers positifs suivis par un leader positif se développent à partir de la pointe à la terre avant que la décharge négative n'ait atteint l'anode.

On constate, que lorsque l'électrode à la masse est plane ou que l'électrode sous tension est positive, le point d'impact est déterminé par la décharge descendante.

En revanche dans le cas de l'intervalle pointe négative-pointe à la masse l'électrode mise à la terre joue un rôle attractif puisqu'elle est le siège de décharges ascendantes.

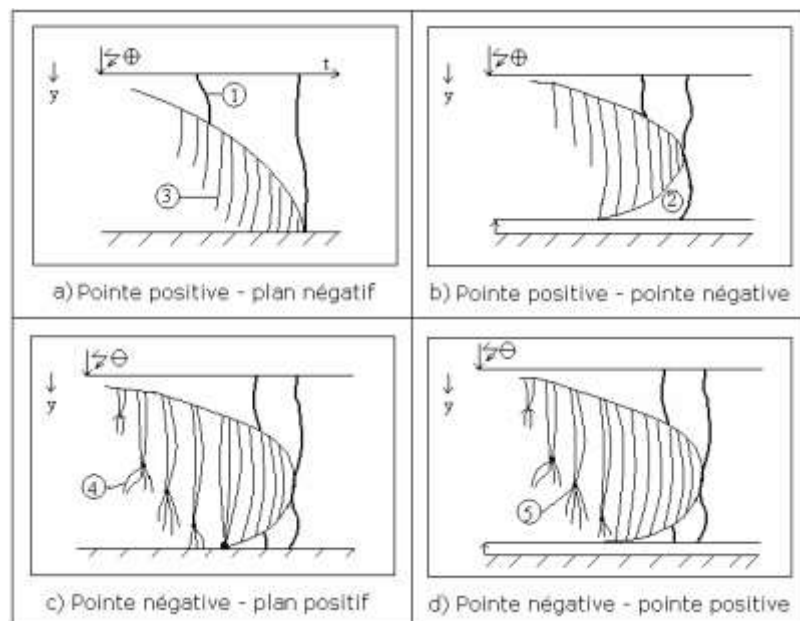


Fig. I.15 : Effet de la géométrie de l'électrode à la terre sur la décharge d'interception

- 1: Leader positif
- 2: Leader négatif
- 3: Streamer positif
- 4: Streamer négatif
- 5: stem

I.11 Influence de la nature de la tension [9]

I.11.1 Tension alternative

La tension d'amorçage de l'intervalle d'air pointe-plan compris entre 0 et 150cm est proportionnelle à la distance interélectrode.

La pente de la portion de droite est de 5kV/cm, ce qui correspond à la valeur du champ électrique dans les streamers positifs. La décharge est de type streamers.

Au delà de cette distance la décharge se fait par leader, ce qui est caractérisé par le fléchissement de la courbe vers la pente de 1kV/cm, valeur qui correspond à celle du champ électrique dans le leader positif. Quelque soit le type de claquage, il a lieu toujours durant l'alternance positive.

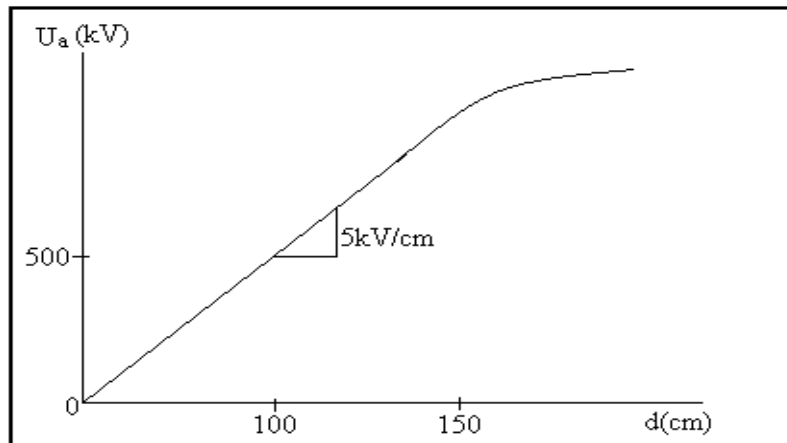


Fig. I.16: tension d'amorçage $U_a = f(d)$

I.11.2 Tension continue

La tension continue de claquage d'un intervalle pointe positive- plan est supérieure à celle obtenue en tension alternative. Le claquage se fait par streamers quelle que soit la distance interélectrode.

I.12 Application des isolants dans l'industrie électrique [1]

L'adoption définitive d'un isolant par un constructeur repose sur la prise en considération de la nature multidisciplinaire des études et essais sur celui-ci. Leur réalisation nécessite des connaissances en électricité, en mécanique, en chimie et statistiques. De nombreuses expérimentations sont également nécessaires afin d'évaluer la durée de vie d'un nouveau matériau. On estime que les progrès récents dans la mise en œuvre des isolants sont dus essentiellement à trois raisons:

- dimensionner au mieux l'isolation des matériaux électriques;
- maintenir le taux de défaillance des isolations au dessous de leurs valeurs acceptables pour les utilisateurs;
- développer les isolants permettant la construction de matériels de tensions de plus en plus élevée ou fonctionnant dans des conditions particulières.

Mais diverses contraintes, liées essentiellement à l'industrialisation provoquent des changements importants. Dès à présent les producteurs et les utilisateurs d'isolants doivent:

- tenir compte d'exigences très diverses selon les sites sur lesquels sont installés les matériels (réseaux, bâtiments, bord de mer, centrales nucléaires... etc.);
- réduire ou supprimer les pollutions résultant de la dispersion d'isolants liquides, d'additifs, dans la nature ou d'incendies entraînant la production de composés toxiques ou corrosifs;
- mettre au point des procédés de fabrication et de mise en œuvre des isolants nécessitant une moindre consommation d'énergie.

I.13 Conclusion

Dans le matériel électrique destiné à fonctionner sous HT, MT, l'isolation des conducteurs, prend une grande importance. Leur choix doit tenir compte de leurs propriétés physiques et des différentes contraintes supportées.

L'isolation assure les deux fonctions mécaniques et électriques, pratiquement celle-ci est le siège de phénomènes de pollution qui la contamine en diminuant ses caractéristiques. De ce point de vue, le choix de cette dernière se fait donc essentiellement à partir de la tension de service; en fonction des efforts mécaniques auxquels elle est soumise (facteurs climatiques, pollution, ...etc).

Les décharges dans l'air peuvent être résumées en deux théories : la théorie de Townsend pour des faibles pressions et la théorie des streamers pour des pressions élevées.

En présence d'un champ uniforme, l'activité d'ionisation conduit généralement au contournement. Par contre en champ non-uniforme, la décharge se manifeste sous forme de décharge couronne.

Il existe des paramètres influents sur la décharge dans l'air tels que : la géométrie de l'électrode à la terre et la nature de la tension.

Chapitre II

*Effet des écrans isolants
dans les intervalles d'air
pointe-plan*

II.1 Introduction

L'influence des barrières isolantes a été remarquée par C.P Steinmetz vers 1920. Il a constaté l'augmentation de la tension disruptive de l'air entre deux électrodes sphériques, séparées par une barrière isolante. Plusieurs chercheurs ont succédé par la suite pour mener des investigations plus poussées.

L'amélioration de la rigidité diélectrique d'un intervalle d'air pointe-plan, par l'introduction convenable d'une barrière isolante est un phénomène très intéressant à exploiter dans les systèmes d'isolation. En effet, la présence d'un écran isolant entre les deux électrodes transforme l'intervalle d'air initial en un système stratifié (air-barrière). Les ions 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 .

L'introduction d'une barrière influence par plusieurs paramètres la variation de la tension disruptive d'un intervalle d'air. On trouve les paramètres de configuration de l'intervalle

(longueur de l'intervalle, nombre de barrières utilisées, position de la barrière) et les paramètres concernant la barrière elle-même (son matériau, sa forme, ses dimensions...etc) [10,11].

II.2 Paramètres définissant la nature de la barrière

Les écrans isolants de natures différentes n'ont pas tous les mêmes performances du point de vue de l'augmentation de la tension disruptive d'un système d'isolation. Cela est dû au fait que les paramètres définissant les propriétés isolantes d'un matériau varient d'un diélectrique à un autre. Parmi ces paramètres, on trouve la rigidité diélectrique qui est la propriété qu'à un diélectrique à s'opposer à la décharge disruptive. Ce paramètre est évalué par l'intensité du champ électrique susceptible de conduire à la décharge disruptive. La permittivité est une propriété physique décrivant la réponse d'un milieu donné à un champ électrique. Au niveau microscopique, la permittivité est liée à la polarisabilité électrique des molécules ou atomes constituant le milieu.

Dans un diélectrique réel, il existe toujours à basses fréquences une faible conductivité liée à différents mécanismes microscopiques (défauts notamment). On parle alors de pertes diélectriques. On peut tenir compte de ces pertes en définissant une permittivité complexe[12]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon''(\omega) - i \varepsilon'(\omega) \quad (\text{II.1})$$

où ω est la pulsation de la tension appliquée

$\varepsilon'(\omega)$ est le terme de dispersion qui caractérise la vitesse de l'onde dans le matériau (plus ε' est grand, plus la vitesse est faible).

$\varepsilon''(\omega)$ est le terme d'absorption du matériau qui correspond aux pertes diélectriques dans le matériau, c'est-à-dire à sa capacité à transformer l'énergie électromagnétique en chaleur.

II.3 Décharges partielles

Le développement de la décharge disruptive (ou perforation diélectrique) à l'intérieur des matériaux isolants solides est généralement lié à un ou une association des phénomènes suivants : décharges intrinsèques, décharges thermiques et décharges partielles.

Une décharge partielle (DP) est définie par la CEI comme une décharge qui ne court-circuite que partiellement l'isolant entre deux conducteurs [13].

L'expérience montre que les mesures des DP permettent la connaissance et l'identification de plusieurs défauts d'isolation.

Les effets des décharges partielles dans les installations haute tension comprenant des matériaux isolants solides peuvent être dramatiques, aboutissant à la destruction complète (par explosion) de l'installation. Ces décharges entraînent des dommages irréversibles des matériaux isolants. Ces dommages sont causés par l'énergie libérée par les décharges, par l'apparition d'ozone attaquant les parois des cavités, la libération de gaz sous haute pression et des réactions chimiques qui ont tendance à augmenter la conductivité de l'isolant autour de la cavité. Autant de phénomènes qui tendent à accélérer et à étendre la dégradation du matériel.

Ce type de décharges prend naissance dans un défaut d'un diélectrique solide ou dans une bulle au sein d'un liquide diélectrique. Elles peuvent également apparaître à l'interface conducteur-diélectrique [14].

Les décharges partielles dans un diélectrique ont le plus souvent lieu dans une bulle gazeuse : la permittivité du gaz étant très inférieure à celle du matériau environnant, un

champ beaucoup plus important que celui existant sur une distance équivalente au sein de l'isolant apparaît. Si cette tension dépasse le seuil d'apparition de la décharge couronne pour le gaz contenu par la bulle, une décharge partielle a lieu. Une fois amorcée, la décharge va progressivement détériorer l'isolant, conduisant finalement à un claquage du diélectrique et à la destruction de l'installation. Ce phénomène peut être limité lors de la fabrication de l'équipement par sa conception et par la qualité des matériaux utilisés.

Un classement des décharges partielles est possible suivant leurs origines on trouve :

les décharges externes (décharge couronne), les décharges superficielles et les décharges internes.

Les décharges partielles sont dites superficielles lorsqu'elles se développent à l'interface de deux diélectriques dans des états différents d'agrégation. Le champ électrique donnant lieu à ce type de décharge a sa composante principale tangentielle à la surface du matériau. Du point de vue technique ce type de décharge est très nuisible au matériau car, la résistivité superficielle diminue. Pour un matériau dont la conductivité est faible, il peut se déposer des homo charges positives ou négatives qui restent piégées. Pour un certain niveau de tension, les canaux de décharge glissent sur la surface de l'isolant pour aller vers l'électrode mise à la terre. Dans le cas d'une mauvaise interface, les décharges de haute énergie se développent, même à des tensions modérées et peuvent court-circuiter d'importantes épaisseurs d'isolant [15].

Les décharges internes ont pour origine les inclusions de particules étrangères et les vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension on constate que le champ électrique est plus élevé dans les vacuoles gazeuses E_g que dans l'isolant E_i étant donné la continuité du vecteur induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on trouve dans le cas d'une stratification série :

$$E_g / E_i = \epsilon_{ri} / \epsilon_{rg} = \epsilon_{ri} \quad \text{II.2}$$

ϵ_{ri} : est la permittivité relative de l'isolant.

ϵ_{rg} : est la permittivité relative du gaz (pour l'air $\epsilon_{rg} = 1$).

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants :

- D'une part la permittivité relative des isolants solides étant plus élevée (2 à 6 fois) que celle des gaz occlus ($\epsilon = 1$), le champ électrique dans les vacuoles est proportionnellement plus élevé d'après la relation (II.2) ;

- D'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse (environ 10 fois moins) que celles des solides.

Ces deux constatations, allant dans le même sens, font que des décharges dites partielles apparaissent dans les vacuoles de gaz incluses dans les isolants solides pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui entraîneraient la perforation du diélectrique solide.

II.4 Influence des barrières sur la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan

Plusieurs investigations ont été menées pour l'étude de l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique. Nous présentons par ordre chronologique certaines d'entre elles dans cette section.

II.4.1 Influence selon E. Marx

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 diélectrique aux chocs (0.5/ 100 μ s) d'un intervalle d'air pointe-plan de 50 cm, il a obtenu une amélioration de la tension disruptive lorsque la barrière est située près de la pointe positive. Lorsque la pointe est négative, les décharges apparaissent des deux côtés de la barrière et la rendent sans effet notable. En tension continue négative, la tension disruptive peut être fortement diminuée [11].

Sous des impulsions de choc, l'augmentation de la tension disruptive a été prélevée à une position de 60% de la longueur de l'intervalle (pointe-plan), contrairement à des positions proches de l'une des électrodes où la tension disruptive diminue.

En tension alternative, l'amélioration de la rigidité du système a été remarquée pour des positions de la barrière située entre 20% et 60% de l'intervalle d'air pointe-plan.

II.4.2 Influence selon H. Roser

Il a été le premier à étudier l'influence des barrières de différentes permittivités sur la tension disruptive aux chocs de foudre, en tension alternative et continue, pour divers systèmes d'électrodes.

Dans le cas du système pointe positive-plan, la charge d'espace qui se dépose à la surface de la barrière isolante est positive. Elle tend à uniformiser le champ électrique entre la barrière et le plan. Ceci engendre l'augmentation de la tension de décharge disruptive. Par contre, dans le cas de la pointe négative, il peut y avoir une réduction de la tension disruptive.

Roser a notamment étudié l'influence des barrières poreuses et des barrières compactes trouées, où il a constaté qu'elles n'entraînent aucune amélioration notable de la tension disruptive [16].

II.4.3 Influence selon Tikhodeev

Selon Tikhodeev le processus de décharge en tension impulsionnelle positive peut être subdivisé en trois étapes principales [17]:

1) Etape non stationnaire de remplissage de la barrière par les charges. Cette étape commence dès que le seuil de la décharge couronne est dépassé. Une double couche de charges superficielle est formée, créant un champ de polarisation E_p à l'intérieur de la barrière, (**Fig. II.1**). En effet, la charge d'espace créée par la décharge couronne est stoppée par la barrière en se déposant dessus, ce qui conduit à la réduction du champ électrique à la surface de la pointe. La tension appliquée à la pointe devient alors insuffisante pour maintenir la décharge couronne. La charge installée à la barrière se répartie graduellement sur toute la surface de la barrière vu la valeur finie de la conductivité du matériau de la barrière. Dans ce cas la fréquence des impulsions de courant augmente, mais reste inférieure à celles de Trichel.

2) Une étape stationnaire de contournement de la barrière par les décharges glissantes. En augmentant la tension, les impulsions de courant se serrent et des courants stationnaires sont collectés au plan.

3) Etape de claquage de l'intervalle pointe –plan avec barrière, où la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan.

Pour une pointe négative on trouve trois étapes :

1) La décharge s'effectue de la pointe vers la barrière.

2) Pour un niveau de tension supérieur, la barrière est contournée par les décharges glissantes. D'autre part, à partir de l'électrode plane apparaît une décharge vers la surface opposée de la barrière.

3) L'amorçage s'effectue après la rencontre des deux décharges venant de part et d'autre de la barrière [17].

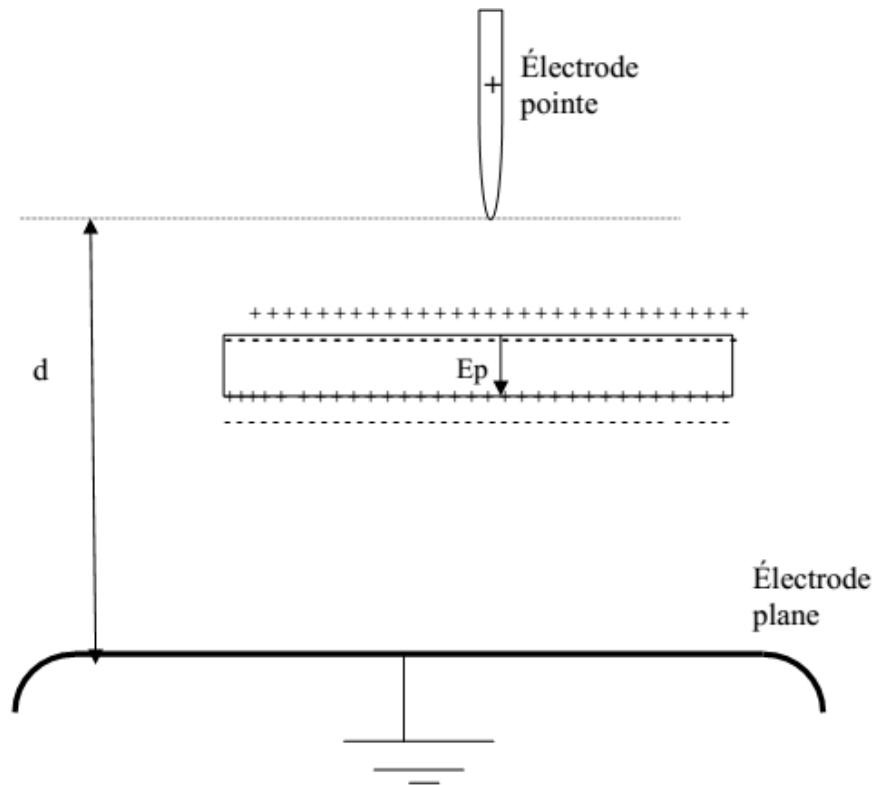


Fig. II.1: Distribution des charges au niveau de la barrière isolante

II.4.4 Influence selon M.P. Verma

Verma a travaillé sur les chocs de foudre positifs des intervalles d'air pointe-barrière-plan, de 4 à 14 cm. Les caractéristiques tensions disruptive - distance inter électrodes obtenues présentent des pentes comprises entre 5 et 30 kV/cm, selon la position de la barrière [18].

II.4.5 Influence selon J.Pilling

Pilling a étudié l'influence des barrières isolantes sur la tension disruptive, en tension alternative des intervalles d'air pointe-plan allant jusqu'à 20 cm. Il a vérifié que la tension disruptive de l'intervalle est équivalente à la somme des tensions disruptives des intervalles d'air des deux côtés de la barrière et de la chute de tension sur la barrière [19].

II.4.6 Influence selon M.Awad

Awad a étudié le comportement des barrières polluées dans des intervalles d'air pointe-pointe de longueur inférieure à 12cm pour des tensions de choc de manœuvre

23/3000 μ s [20]. Il a constaté que la tension de claquage diminue lorsque la conductivité superficielle augmente, puis tend vers une valeur constante pour une conductivité superficielle supérieure ou égale à 3 μ S dans le cas où la surface polluée est en face de la pointe HT.

II.4.7 Influence selon A.Boubakeur

A.Boubakeur a travaillé sur les intervalles d'air pointe-plan de 40 à 200 cm, en tensions de choc de foudre et de manœuvre positives et en tension alternative à fréquence industrielle. Il a montré que la barrière isolante joue un rôle d'obstacle géométrique provoquant l'augmentation de la tension disruptive, 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 [10,21].

L'évolution de la décharge peut être directe ou par étapes. La décharge directe est obtenue lorsque aucune décharge superficielle à la surface de la barrière n'est observée. Ce cas est généralement obtenu dans le cas où la barrière est suffisamment éloignée de l'une des électrodes [22]. Dans ce cas, la décharge contourne la barrière en la touchant dans un seul point, elle suit dans l'air le trajet pointe-bord de la barrière -plan (**Fig .II.2**).

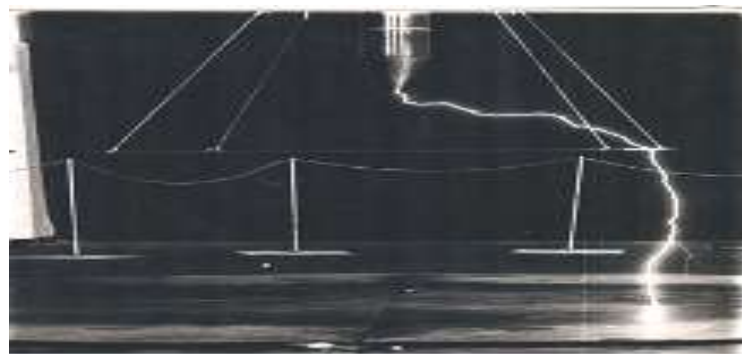


Fig. II.2: Décharge directe du système pointe-barrière-plan
($d = 150\text{cm}$, $a = 40\text{ cm}$, $170/2500\mu\text{s}$) [23].

Pour ce cas, la tension disruptive du système « pointe-barrière-plan » peut être déterminée approximativement de la caractéristique tension disruptive en fonction de la distance interélectrodes 'd' du système pointe-plan en considérant la distance géométrique d_{geom} (**Fig. II.3**).

$$d_{geom} = \sqrt{a^2 + l^2} + a' \quad (II.3)$$

telle que :

Où $a' = d - a$

a : est la distance pointe-barrière

a' : est la distance barrière -plan

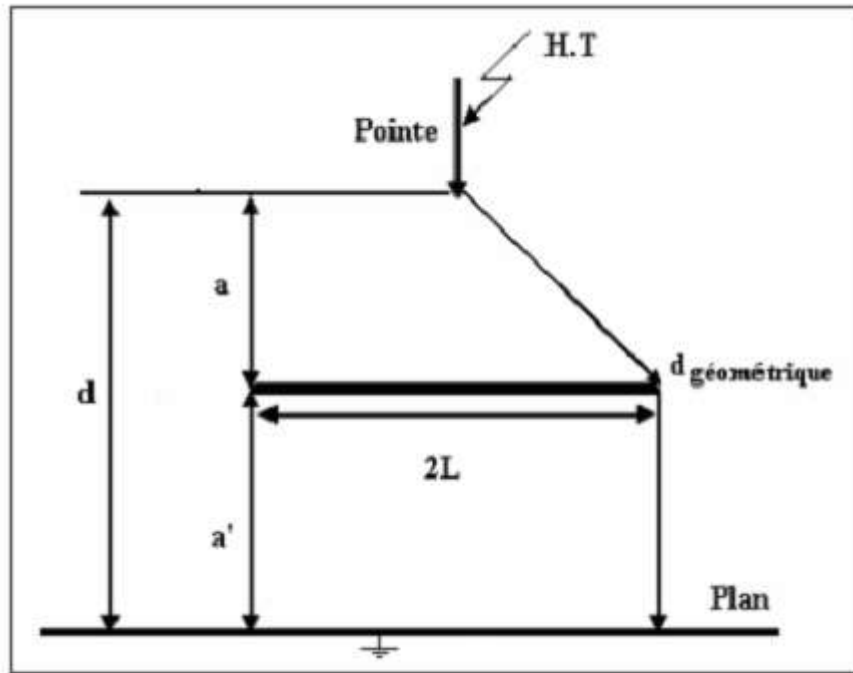


Fig. II.3 : Système pointe-barrière-plan

L'évolution de la décharge s'effectue par étapes lorsque la barrière est proche de la pointe positive. Dans ce cas, la décharge est composée de l'étincelle pointe-milieu de la barrière, de la décharge glissante sur la barrière (**Fig. II.4**) et de la décharge bord de la barrière -plan.

Dans le cas d'une pointe de polarité négative, la décharge par étapes apparaît pour pratiquement toutes les positions de la barrière. Notamment, A.Boubakeur a mis en évidence l'apparition de décharges ascendantes positives, dans le cas d'une pointe négative pour un intervalle d'air pointe-plan de 1.5 m (**Fig. II.5**).

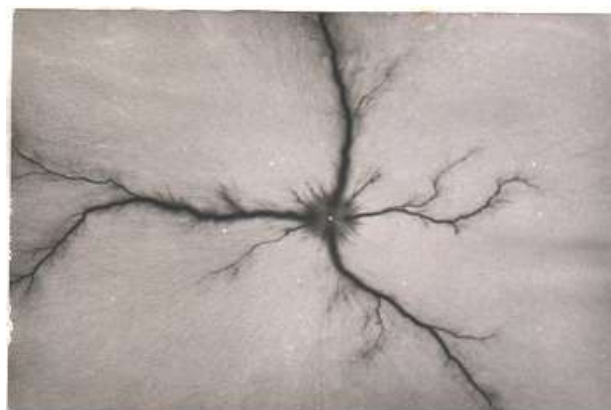


Fig. II.4: Décharges glissantes dans le cas d'une pointe positive en contact avec la barrière ($d = 100 \text{ cm}$ $U = 730 \text{ kV } 1.2/50\mu\text{s}$) [23].

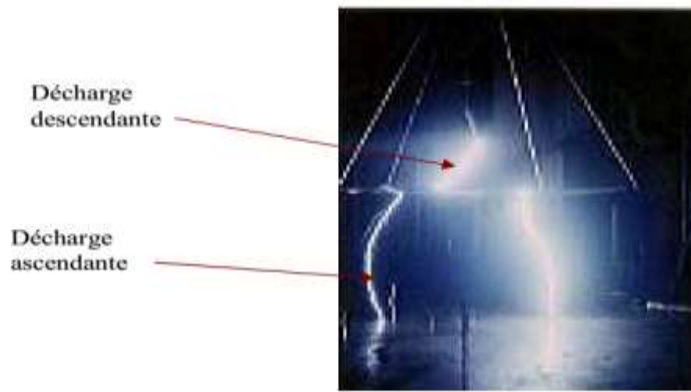


Fig. II.5:Décharge disruptive dans un intervalle d'air pointe-barrière-plan de 1,5m
(U près de 1100kV) [24]

A.Boubakeur a également travaillé sur l'influence des couches semi-conductrices appliquées sur la barrière isolante, où il a remarqué leur effet négatif sur la tension disruptive ; ceci à partir des conductivités superficielles supérieures à $0.4 \mu S$ et pour des distances pointe-barrière comprises entre 20 et 100% de l'intervalle complet.

Dans le cas d'une barrière conductrice, il a constaté que lorsque la barrière est en contact avec la pointe, la tension disruptive augmente. Par contre, lorsqu'elle est située au voisinage de la zone médiane de l'intervalle pointe-plan elle décroît. Dans le cas où la barrière est suffisamment proche du plan, la tension disruptive de l'arrangement "pointe-barrière-plan" reste voisine de celle de l'arrangement "pointe-plan" sans barrière [10].

Une étude a été réalisée sur le champ électrique dont le but est de vérifier l'uniformisation de celui-ci dans la partie barrière-plan lors d'une décharge en géométrie pointe-barrière métallique-plan [25, 26]. Il a été conclu que lorsque la pointe est sous tension, la barrière conductrice se charge par influence électrostatique et la distribution du champ se fait de deux manières. L'une non uniforme dans l'intervalle pointe-barrière et l'autre pratiquement uniforme dans l'intervalle barrière-plan. A cet effet le système "pointe-barrière-plan" aurait une rigidité équivalente à la somme de la rigidité d'un intervalle pointe-plan correspondant à la distance pointe-barrière et de celle d'un système plan-plan correspondant à l'intervalle barrière-plan, (**Fig. II.6. A, B et C**). L'approximation du calcul de la tension disruptive est acceptable en tension positive pour des positions de la barrière proches du plan, à l'inverse de la tension continue de polarité négative.

A. Boubakeur a aussi constaté l'influence de la charge spatiale déposée sur la barrière en réalisant des trous de différents diamètres au centre de la barrière [10]. La décharge

disruptive passe généralement par le bord de la barrière pour des trous de faible diamètre et elle passe par le trou à partir d'un certain diamètre limite de 10mm.

II.4.8 Influence selon Li Ming

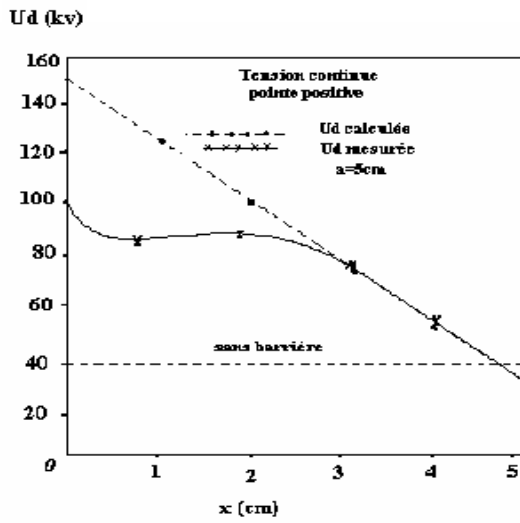
L'augmentation de la largeur de la barrière entraîne celle de la tension disruptive de l'intervalle pointe-barrière-plan. Pour les petites largeurs de la barrière, la tension disruptive est faiblement améliorée [27].

Li Ming a mesuré la tension disruptive en système pointe-plan sous tension impulsionnelle. Il a obtenu une augmentation de 30 à 45% pour une barrière de forme hémisphérique et dont la cavité est en face de la pointe, par rapport à la valeur de la tension de claquage d'une barrière plane [28] (Fig. II.7).

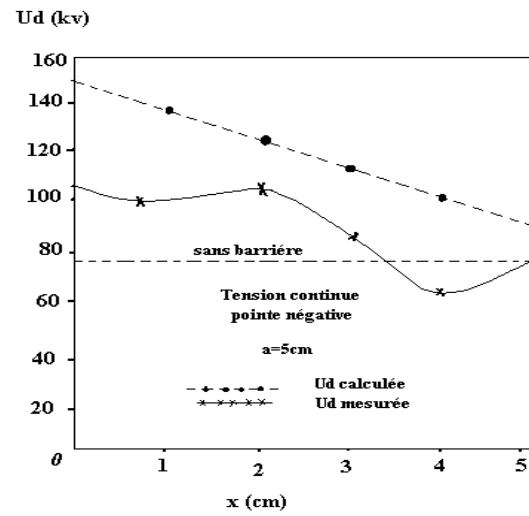
La propagation des streamers influe sur la tenue diélectrique et ne mène pas nécessairement à la rupture de l'intervalle d'air. Les décharges préliminaires accélèrent le vieillissement de la barrière et augmentent la quantité de la charge superficielle qui facilite les décharges glissantes. La tension de rupture est inférieure à celle de l'intervalle sans barrière pour une barrière proche du plan [21] (Fig. II.8). L'influence des trous au centre et au bord de la barrière est représentée à la figure II.9.

II.4.9 Influence selon Z.You Bin

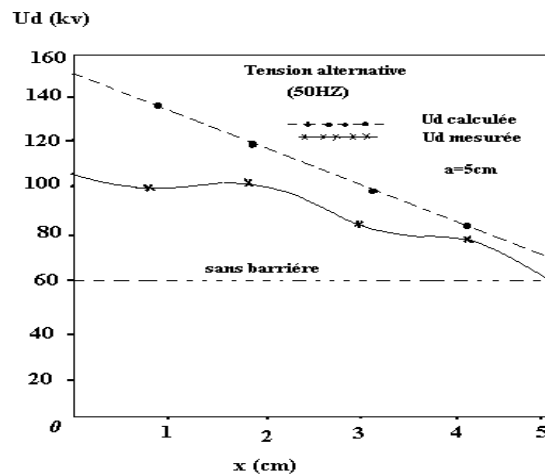
You Bin a travaillé sur les intervalles pointe-barrière-plan sous tension continue. La distribution des porteurs de charges positifs sur la surface de la barrière et la chute de tension entre les faces opposées de la barrière sont influencées par l'épaisseur et la permittivité de la barrière utilisée. Lorsque ces dernières auront des valeurs importantes, le champ électrique entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, mais leur influence est beaucoup moins importante par comparaison à l'effet de la largeur et de la position de la barrière [29].



(A) Tension continue positive



(B) Tension continue négative



(C) Tension alternative(50Hz)

Fig. II.6: Équivalence entre le système pointe-barrière-plan et l'association série pointe-plan ($d = 5\text{ cm}$) [25]

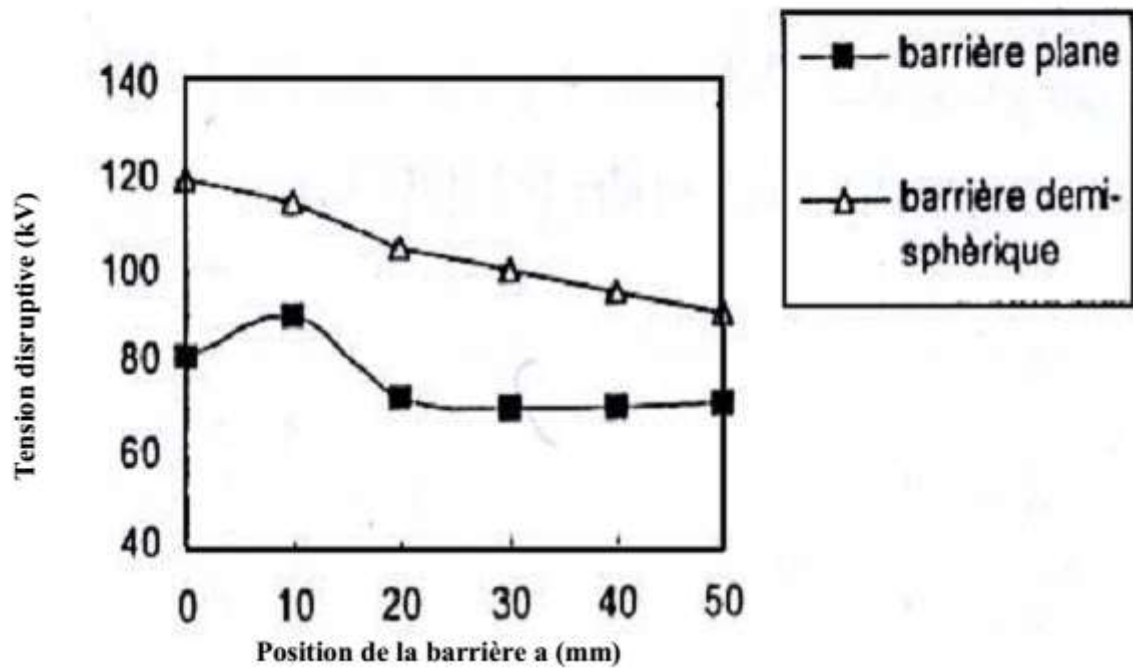


Fig. II.7: Effet de la forme de la barrière (d= 50mm) [28]

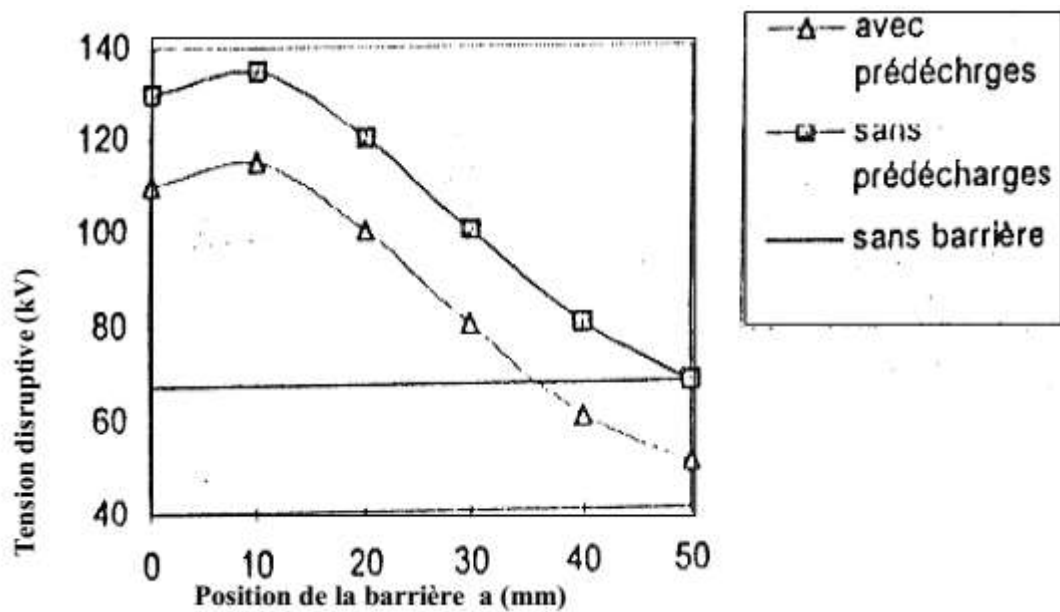


Fig. II.8: Influence des prédécharges [28]

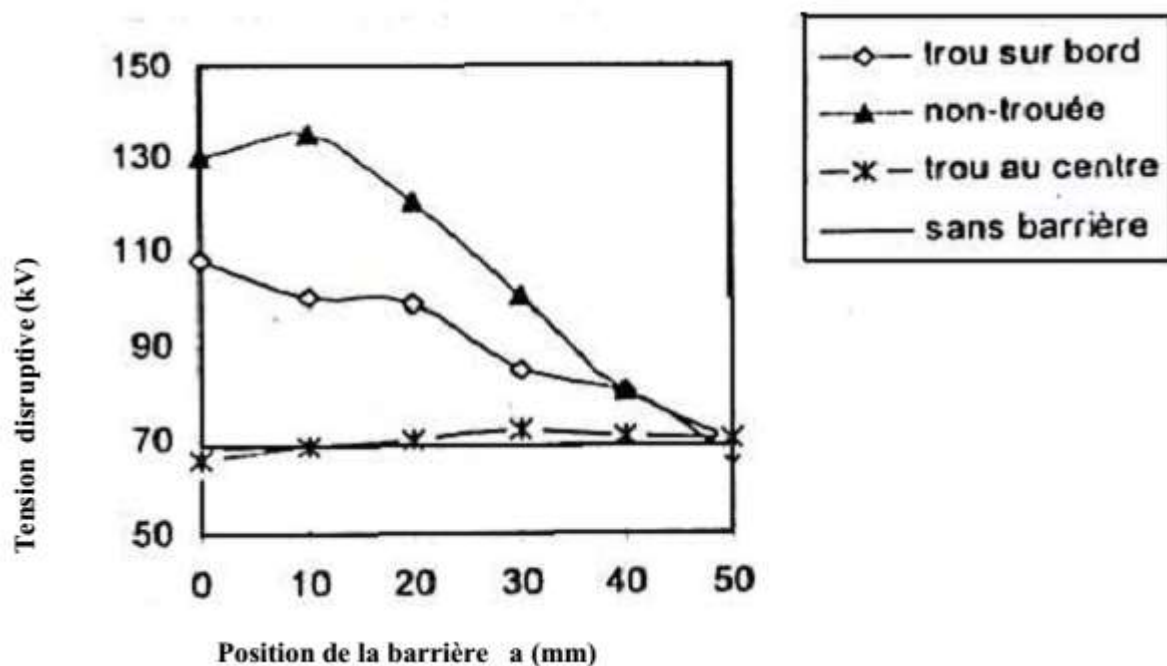


Fig. II.9: Influence des barrières trouées [28]

II.4.10 Influence selon M.V.Sokolova

Sokolova a effectué des mesures des courants de décharges pour des intervalles d'air avec différents matériaux de la barrière. L'analyse des oscillogrammes a montré que chaque impulsion de courant a une structure complexe. Il a obtenu les résultats regroupés dans le tableau II.1, pour une distance pointe-plan $d=1.5\text{mm}$ et $U_{\text{eff}}=5.4\text{KV}$ [30].

Matériau	Courant max et charge moyenne
Verre	$I_{\text{max}} = 100 - 200\text{mA}$ $Q_{\text{moy}} = 5\text{nC}$
Céramique	$I_{\text{max}} = 120 - 160\text{mA}$ $Q_{\text{moy}} = 1.5 - 2\text{ nC}$

Tab. II.1 : Paramètres de la décharge dans l'air pour différents matériaux [30]

Les deux matériaux utilisés produisent des effets différents sur la rigidité de l'intervalle malgré leur même épaisseur et même permittivité; (Q_{moy}) désigne la quantité de charge accumulée sur la barrière.

Sokolova a aussi effectué des mesures pour deux situations différentes (Tab. II.2) :

- L'une pour une barrière propre lavée avec de l'alcool puis avec de l'eau distillée ;
- L'autre pour la même barrière après trente heures sous une décharge électrique. La surface de la barrière devient polluée après la décharge.

	Surface propre	Surface chargée
$I_{\max}^+ (mA)$	1750	730
$I_{\max}^- (mA)$	1700	430

Tab .II.2: Courant maximum de décharges dans le cas d'un état de surface différent de la barrière [30]

$I_{\max}^+$ et $I_{\max}^-$ sont les valeurs maximales des courants des micro décharges correspondant aux deux polarités positive et négative des demi périodes de la tension appliquée.

II.4.11 Influence selon M. C. Siddanganga

La distribution du champ électrique et les niveaux de tension de claquage sont souvent modifiés par l'accumulation de la charge sur un isolant où la modification du champ sur la surface peut mener aux décharges glissantes. Il est important de savoir que l'influence de cette accumulation sur la distribution du champ électrique dans les systèmes stratifiés (gaz solide) est un paramètre fondamental pour établir une meilleure isolation. Afin de visualiser et de quantifier la charge déposée sur le diélectrique, on fait recours aux techniques optiques. M.C.Siddanganga [31], a utilisé la méthode de simulation de charge pour le calcul du champ électrique et de la tension disruptive. Les résultats de simulation concorde avec la base de données expérimentales obtenue, par Nakanishi [32].

II.4.12 Influence selon F.V. Topalis et I.A.Stathopulos

La rigidité diélectrique de l'air s'améliore pour des positions relativement éloignées de la barrière des deux électrodes, dans le cas des petits et moyens intervalles. L'effet de la barrière n'est plus le même dans le cas des longs intervalles et pour des positions de la barrière équivalentes à celles du cas précédent. Selon les conditions expérimentales, ceci est dû à l'influence du phénomène physique dénommé 'leader', qui est matérialisé par un canal lumineux observé dès que la distance inter électrodes dépasse 80 cm.

En tension impulsionnelle et en géométrie d'électrodes pointe-pointe, l'insertion de deux barrières de manière à ce que l'une soit fixe et l'autre mobile ne change presque pas la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, mais reste toutefois supérieure à celle de l'intervalle d'air ayant une seule barrière (**Fig. II.10**). Dans le cas d'un système pointe-plan, la tension disruptive augmente de 35% pour une barrière située à 20% de la distance inter électrodes [33].

L'insertion de trois barrières a été réalisée par YJulliard, où il a constaté une amélioration de la rigidité diélectrique du système par rapport à l'introduction de deux barrières [17].

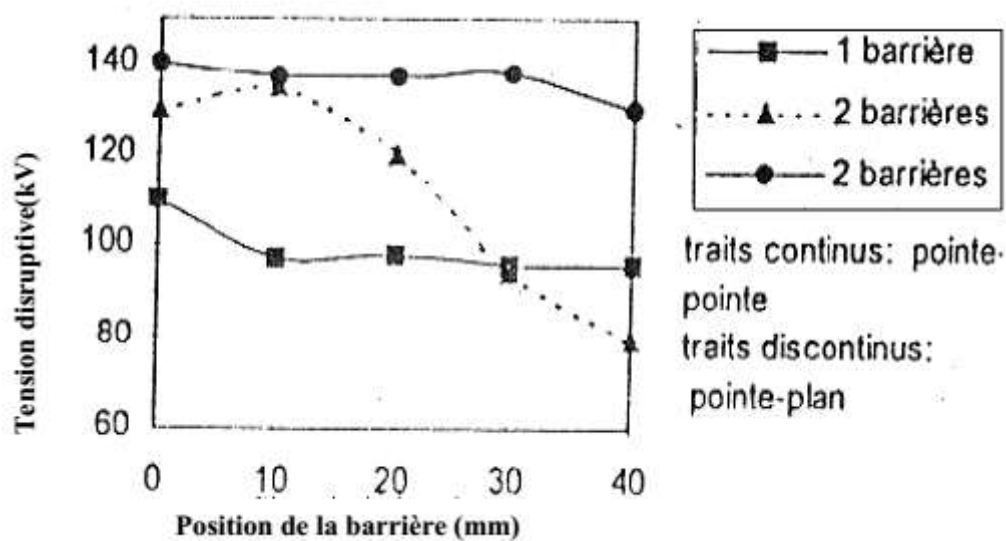


Fig. II.10 : Influence du nombre de barrières sur la tension disruptive en système pointe-pointe et pointe-plan (tension impulsionnelle) [33]

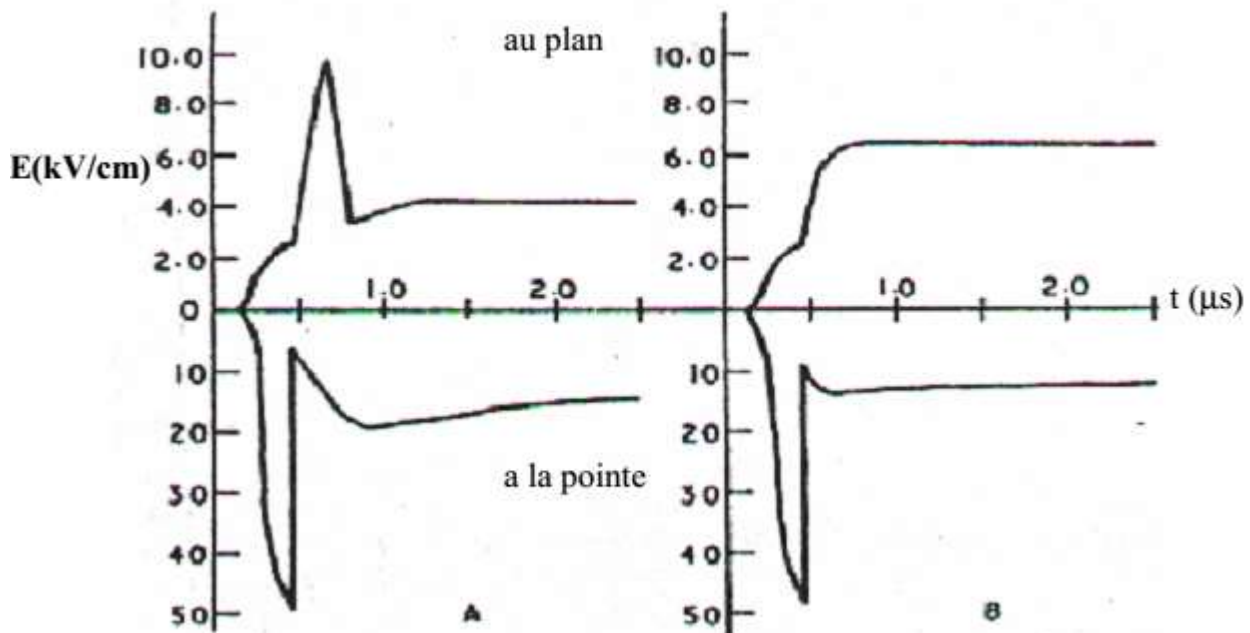
II.5 Influence des barrières isolantes sur le champ électrique des intervalles d'air pointe-plan

En utilisant une sonde capacitive, Meek et Collins ont observé les variations de l'intensité du champ électrique à la surface des électrodes d'un intervalle d'air pointe-barrière isolanteplan, ayant une distance inter électrodes de 15 cm, aux chocs 0.4/30 μ s [34].

La figure II.11 donne des oscillogrammes du champ électrique sans et avec barrière isolante. La figure (A) (sans barrière), montre un pic de champ électrique à la pointe qui décroît rapidement à cause de la charge positive injectée dans l'intervalle, créant un champ de charge d'espace opposé au champ appliqué. On note aussi le développement d'un pic au plan. Les streamers de la décharge couronne traversent l'intervalle et augmentent avec l'augmentation de la tension appliquée à la pointe. Par la suite, le champ électrique décroît tant que les streamers atteignent le plan, la charge est alors neutralisée.

La figure (B) donne le champ électrique avec barrière isolante. On remarque que le champ électrique au plan augmente pour atteindre un maximum, mais ne diminue pas tant que les streamers sont empêchés d'atteindre la barrière où ils devraient être neutralisés. Au niveau de la pointe le champ électrique est légèrement réduit par rapport à celui obtenu dans le cas sans barrière.

K.Hidaka a également effectué la même étude, mais en utilisant une sonde optique à effet pockels, **Fig (II.12)** [35]. La distribution du champ électrique sur la surface opposée à la pointe en tension impulsionnelle est donnée à la figure **II.13**. Il ressort de cette étude que la charge d'espace accumulée sur la barrière est maximale au centre de la barrière et décroît dans la direction radiale. En effet la charge accumulée réduit le champ électrique entre la pointe et la barrière.



A) Sans barrière

B) Barrière à 5 cm du plan

Fig. II.11: Effet d'une barrière isolante sur le champ électrique en Système pointe plan ($V = 89$ kV) [34]

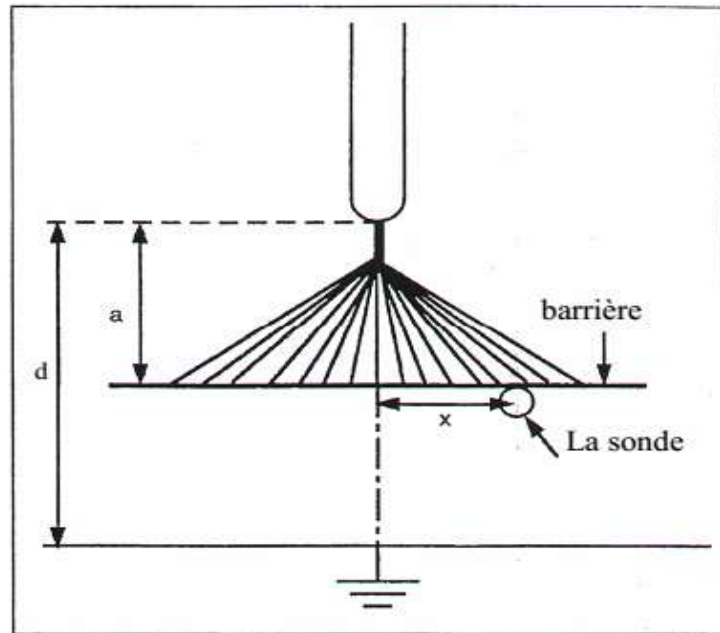


Fig. II.12: Diagramme schématique d'un système pointe-plan avec une barrière isolante [35]

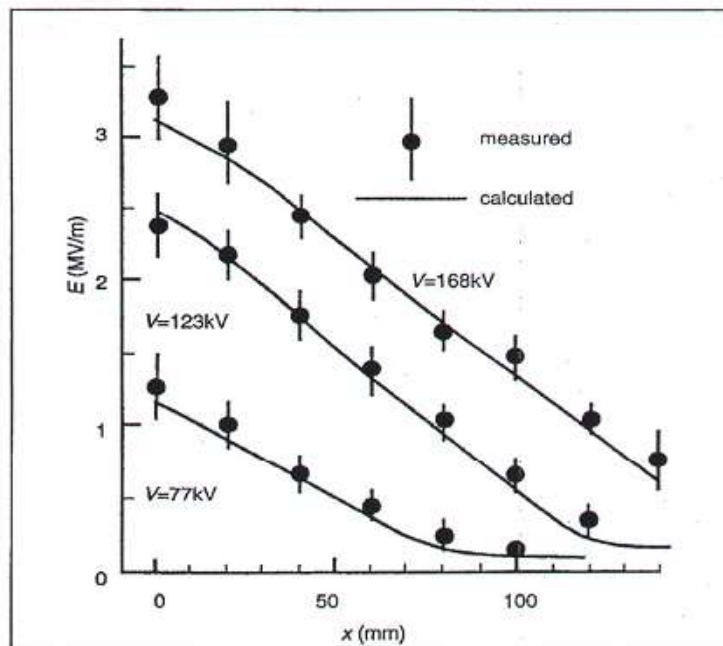


Fig. II.13: Distribution du champ électrique sous la barrière obtenue avec une sonde à effet pockels ($d = 10\text{ cm}$, $a = 3\text{ cm}$) [35]

L.Mokhnache a réalisées des modèles de simulation sur les intervalles pointe-barrière -plan [36-39]. Elle a élaboré un programme pour le calcul du champ électrique par la méthode des éléments finis, pour les longs intervalles d'air pointe-barrière-plane [18, 32]. Dans son modèle, elle a tenu compte de l'effet du champ de polarisation de la barrière et a obtenu l'influence de quelques paramètres tels que la tension, la permittivité, l'angle d'ouverture de la pointe et la largeur de la barrière.

Il ressort des résultats de simulation que plus la largeur de la barrière augmente, plus le champ électrique sur la barrière, notamment en son centre, devient important, (Fig. II.14).

Toutefois, plus l'angle d'ouverture de la pointe 'alpha' augmente moins le champ électrique est important à la surface supérieure de la barrière et sur l'axe de la pointe (Fig. II.15 et 16). Aussi l'augmentation de la permittivité relative du matériau de la barrière rend le champ électrique plus important (Fig. II.17 et 18).

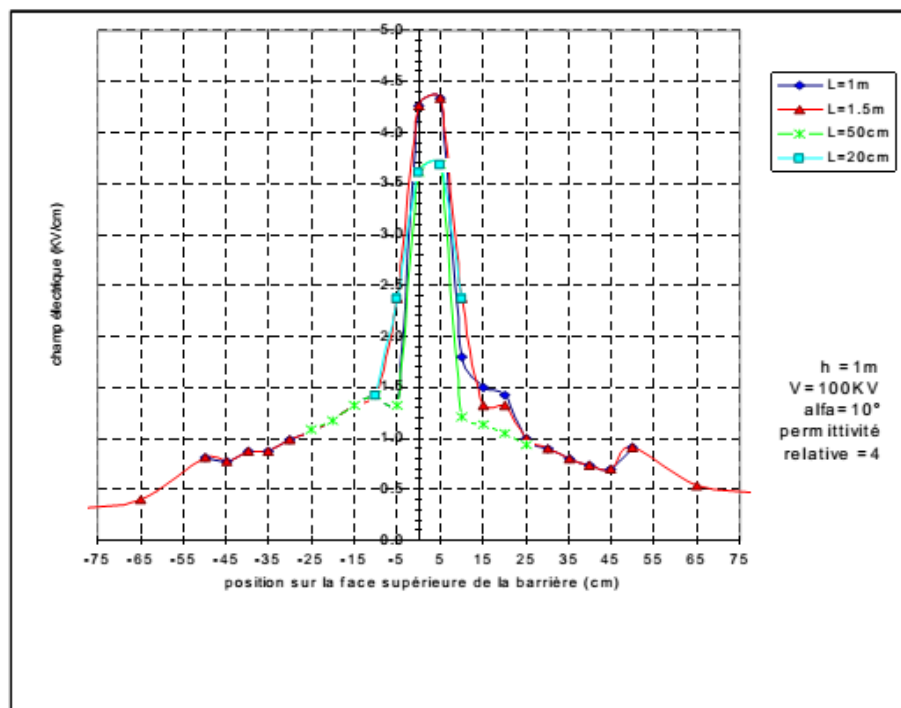


Fig. II.14:Influence de largeur L de la barrière sur le champ électrique a sa surface supérieure [25]

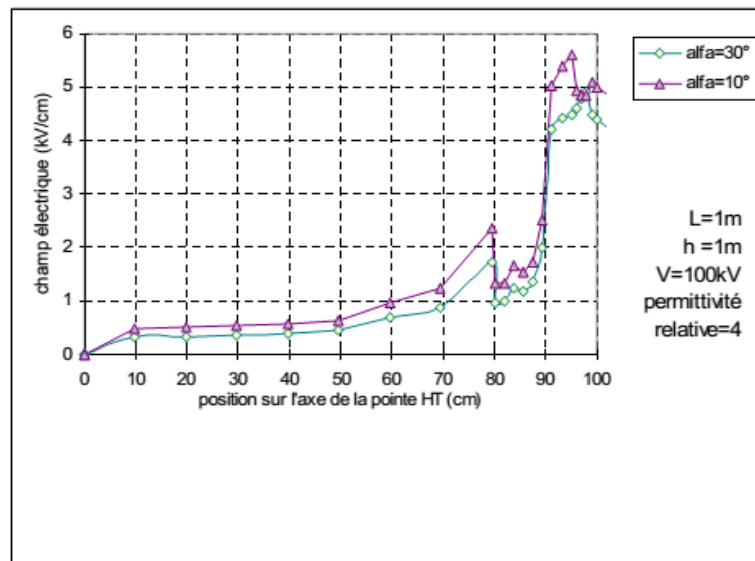


Fig. II.15: Champ électrique sur l'axe de la pointe HT pour deux ouvertures différentes de l'angle de la pointe [25]

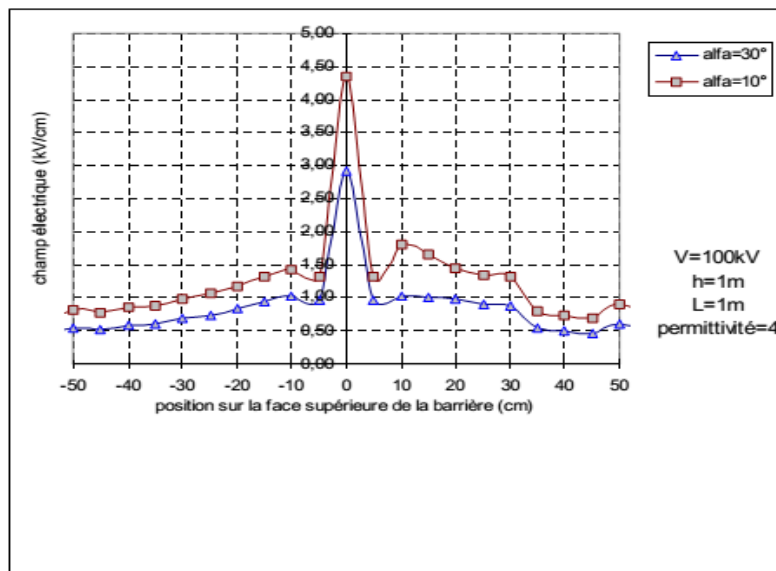


Fig. II.16: Champ électrique sur la surface supérieure d'une barrière isolante pour différentes ouvertures de l'angle de la pointe HT différentes de l'angle de la pointe [25]

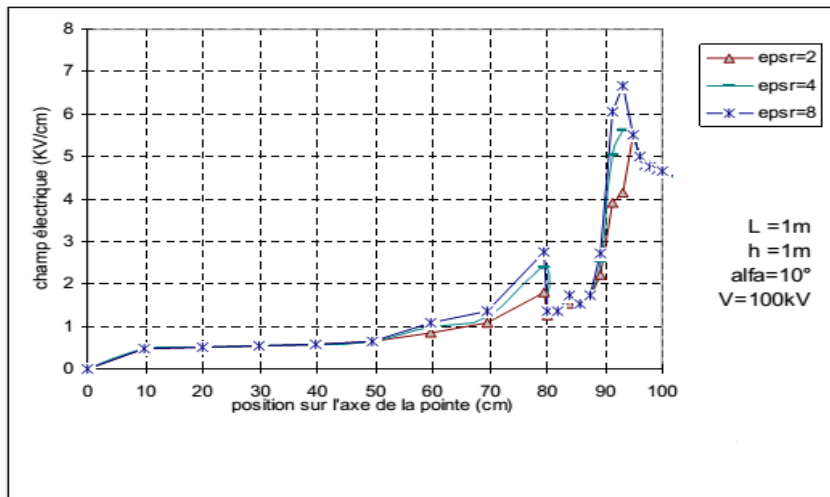


Fig. II.17: Champ électrique sur l'axe de la pointe HT pour une barrière avec des permittivités différentes [25]

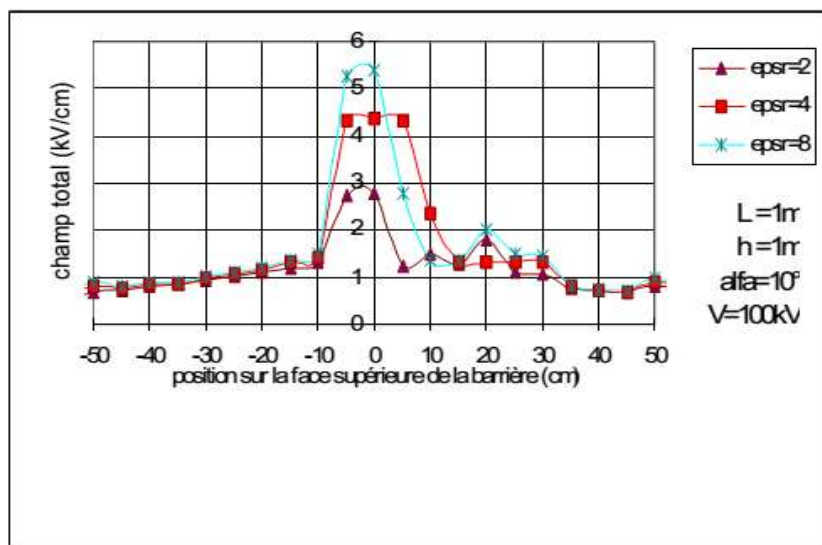


Fig. II.18: Champ électrique sur la face supérieure de la barrière pour des permittivités différentes [25]

II.6 Conclusion

Les barrières isolantes ont des propriétés différentes l'une par rapport à l'autre. La connaissance des paramètres définissant leur nature est nécessaire. On trouve parmi ces paramètres : la rigidité diélectrique, la permittivité ainsi que les décharges partielles pouvant avoir lieu à l'extérieur, à la surface et à l'intérieur des isolants solides.

L'amélioration de la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan avec barrière isolante a été constatée par plusieurs auteurs, aussi bien sous tension continue et impulsionnelle qu'en alternatif. Des paramètres concernant la barrière (matériau, dépôt de charges à sa surface, forme, permittivité, conductivité, nombre de barrières, barrière trouée et dimensions) affectent cette amélioration. La position optimale de la barrière correspond en général à 20% de l'intervalle inter électrodes.

L'évolution de la décharge peut être directe ou par étapes selon la position de la barrière dans l'intervalle d'air pointe-plan. En effet, la décharge directe est obtenue lorsque aucune décharge superficielle à la surface de la barrière n'est observée. Ce cas est généralement obtenu quand la barrière est suffisamment éloignée des électrodes. La progression de la décharge s'effectue par étapes lorsque la barrière est proche de la pointe positive. Dans le cas d'une pointe de polarité négative, la décharge par étapes apparaît pour pratiquement toutes les positions de la barrière.

Chapitre III

Partie expérimentale

III. I Introduction

Dans notre travail nous avons étudié expérimentalement l'amélioration de la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe- plan et pointe-pointe sous une tension continue positive en présence d'une barrière. Dans ce qui suit nous présentons les techniques de mesure, le dispositif expérimental, les paramètres géométriques de l'intervalle d'air étudié et enfin la visualisation de la décharge électrique.

III.2 Mode opératoire

III. 2.1 Dispositif expérimental et circuit de mesure

Le dispositif expérimental est constitué d'un circuit d'alimentation, de l'arrangement pointe-barrière-plan, pointe-barrière- pointe et d'un dispositif de mesure.

Les éléments constituant le dispositif sont schématisés dans la figure **III.1** dont on trouve :

- 1 : (Tr) transformateur (140kV) ;
- 2 : diode haute tension (20mA ,100 k Ω) ;
- 3 : (C) capacité de filtrage : 25nF
- 4 : Résistance haute tension de limitation de courant ($R_a=25\text{ M}\Omega$) ;
- 5 : Résistance BT de voltmètre de crête ($R_u= 501\text{ k}\Omega$) ;
- 6 : Résistance haute tension du diviseur résistif ($R_0 = 280\text{ M}\Omega$) ;
- 7 : Le système point- barrière – plane, le système pointe-barrière-pointe ;
- 8 : Caméscope (Cam) ;
- 9 : Voltmètre de crête (V) ;
- 10 : Pupitre de commande de l'alimentation du transformateur (ACA) ;
- 11 : Microordinateur (PC)

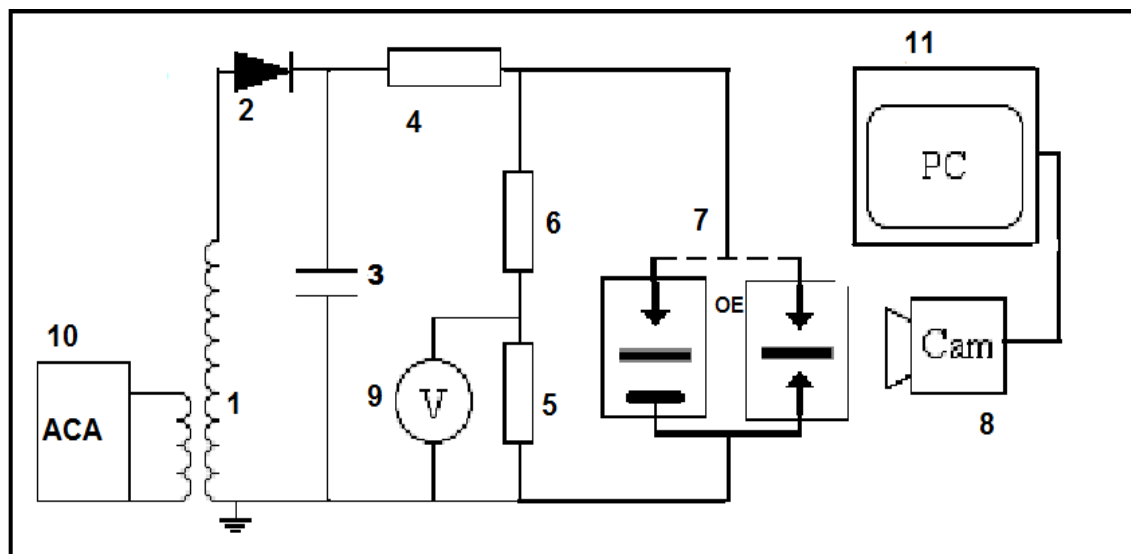


Fig.III .1: Circuit de mesure et de visualisation



Fig.III .2: Photo de laboratoire d'essai de haute tension (EL-OUED)

III.2.2 Circuit d'alimentation

Il est constitué d'un transformateur d'essai (140 kV, 5kVA), dont le primaire est relié à un transformateur de réglage (autotransformateur intégré dans ACA), permettant d'ajuster la tension à la valeur désirée.

III .2.3 Circuit de mesure de la tension appliquée

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension résistif relié au secondaire du transformateur d'essai. Ce diviseur est constitué d'une résistance haute tension ($R_o = 280 \text{ M}\Omega$) en série avec un ensemble de résistances dont la résistance basse tension, résistance du câble coaxial et la résistance d'entrée des appareils de mesure .Il permet de diviser la tension réelle de contournement .Le voltmètre de crête à affichage numérique permet la lecture de la tension de contournement réduite en la mémorisant automatiquement pendant quelques secondes.

III.2.4 Modèle expérimental

Le modèle expérimental représenté à la figure **III. (3 et 4)** est composé d'une tige pointue, d'une barrière plane et d'un plan. L'électrode haute tension (pointe) est constituée par un tube cylindrique en bronze, de diamètre égal à 10 mm, terminé par une pointe conique ayant un angle de 60° , qui se termine par une surface hémisphérique de rayon de courbure 1.6 mm .Les déplacements en sens vertical de la pointe sont assurés par le pupitre de commande.

L'électrode mise à la terre est constituée d'un plan E de diamètre égal à 16 cm et d'épaisseur égal à 2 mm. L'ensemble est déposé sur un support conducteur en aluminium , lequel est posé sur le sol.

Nous avons utilisé des barrières isolantes en verre de forme carrées et rondes de différentes épaisseurs (3, 5 et 8mm) et de 15cm de largeur .Nous caractérisons la largeur de la barrière par

le produit "2L". Le deuxième type de barrière utilisée est conductrice, fabriquée en acier galvanique. Elle est de forme circulaire, de diamètre 15cm et d'épaisseur 8mm. la barrière métallique est entourée d'un tore creux en cuivre de 10mm de diamètre (selon Rogowsky).

Les différentes barrières sont suspendues horizontalement, par des isolants en PVC.

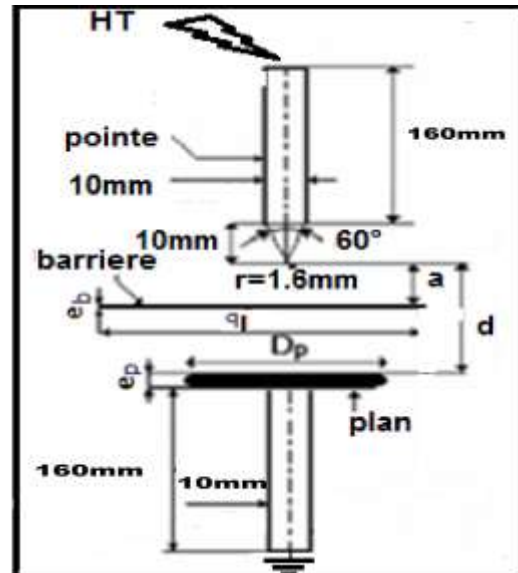


Fig. III.3.a : Photo du modèle

Fig. III.3.b : Configuration pointe – barrière – plan

Fig.III.3: Photo et caractéristiques du modèle expérimental pointe-barrière-plan.

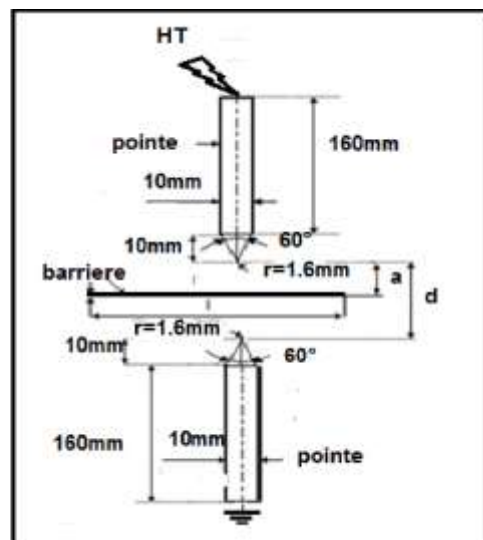


Fig. III.4.a : Photo du modèle

Fig. III.4.b : Configuration pointe – barrière – pointe

Fig.III.4: Photo et caractéristiques du modèle expérimental pointe-barrière-pointe.

III.2.5 Visualisation de la décharge

Le phénomène de décharge électrique pouvant avoir lieu dans l'intervalle "pointe -barrière -plan" depuis sa naissance jusqu'au claquage de l'intervalle d'air. La visualisation a été réalisée à l'aide d'un caméscope, relié à un microordinateur pour contrôle d'images à l'aide du logiciel VLC player.

III.2.6 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques

En utilisant les facteurs de correction, une tension disruptive, peut être ramenée à la valeur qui aurait été obtenue sous les conditions atmosphériques normales, dont on trouve la température ambiante, la pression et l'humidité ($T=20^{\circ}\text{C}$, $P_0=101.3\text{ kPa}$, $H_0=11\text{ g/m}^3$).

Lors des expériences réalisées au laboratoire, toutes les valeurs des tensions seront corrigées suivant les prescriptions des normes de la C.E.1-60-[13].

Il existe deux facteurs de correction :

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

La valeur de la tension disruptive U mesurée sera ramenée aux conditions atmosphériques normales, en la divisant par le rapport K_d/K_h , suivant la relation ci-dessous :

$$U = U_m \cdot K_h / K_d \quad (\text{III.1})$$

III.2.6.1 Facteur de correction K_d

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

$$K_d = 2,93 P / (273 + \Theta) \quad (\text{III.2})$$

III.2.6.2 Facteur de correction K_h

Il est déterminé de la figure III.5 en fonction de l'humidité absolue qui est obtenue à partir de la figure III.6.

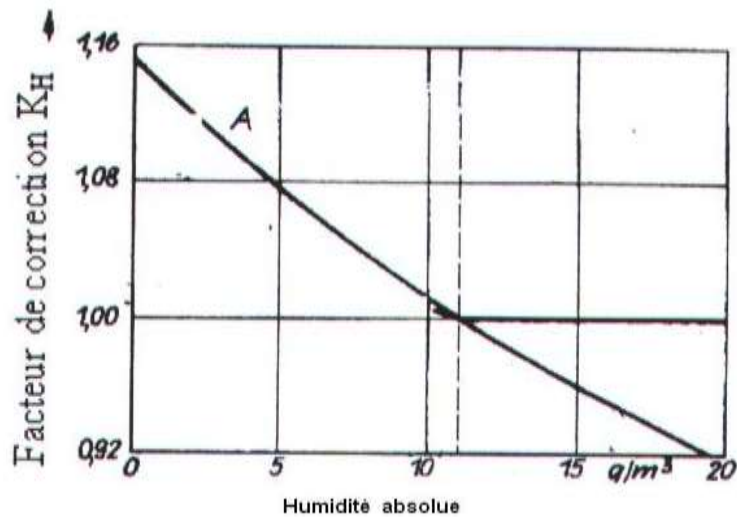


Fig.III.5 : Abaque de K_h en fonction de l'humidité absolue [40]

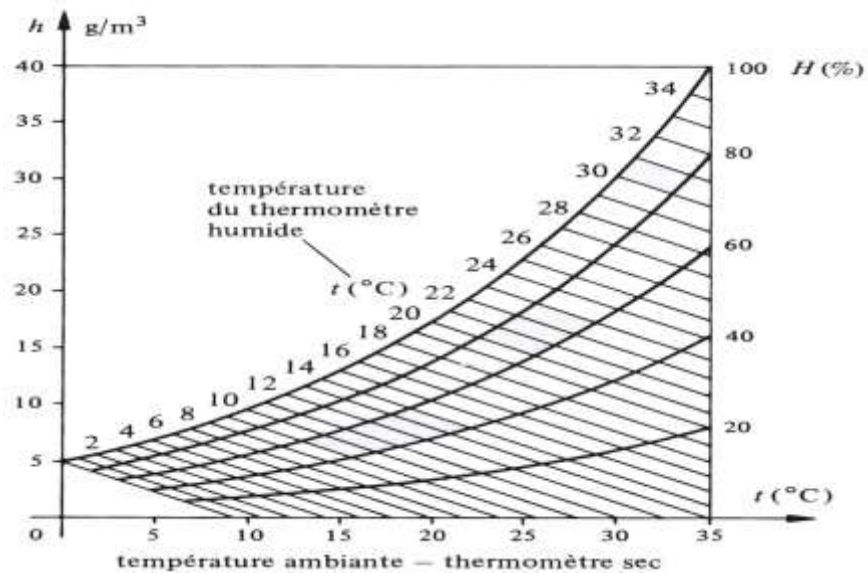


Fig. III.6 : Abaque de l'humidité absolue en fonction de la température [40]

Exemple

Soient $T = 20^\circ\text{C}$, $P = 101.5 \text{ kPa}$, $2L=15\text{cm}$, $a/d=0\%$ $U_m = 113.82\text{kV}$. $H = 86\%$

En utilisant les formules de corrections et les abaques précédentes, on trouve :

$$U = 114.49\text{kV}$$

Tous les résultats obtenus durant nos essais sont corrigés de la même manière.

III.3 Résultats et discussions

Le terme ‘‘surface propre’’ définit les surfaces isolantes non recouvertes d’une couche étrangère, par comparaison aux surfaces recouvertes d’une couche de pollution.

Pour étudier l’influence d’une barrière isolante à surface propre sur la tension de claquage de l’air dans une configuration d’électrodes pointe- barrière – plan et pointe- barrière – pointe nous présenterons en premier lieu l’influence de la position et l’épaisseur de la barrière, ensuite l’influence de type de la configuration ,l’influence sa forme et en fin l’influence la barrière métallique .

III.3.1. Effet de position et d’épaisseur d’une barrière isolante

Les barrières isolantes utilisées sont d’épaisseurs 3, 5 et 8 mm et 15cm de largeur. Les positions de la barrière restent définies par le rapport a/d (%), ‘‘a’’ est la distance entre la pointe sous tension et la barrière. Cette distance prend différentes valeurs entre 0 et d , ‘‘d’’ étant la longueur axiale de l’intervalle pointe- plan et ‘‘d’’ est gardée constante égale à 8cm (**Fig.III.3**). Les rapports a/d choisis sont : 0, 7.5, 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75 et 90%, ceci en négligeant l’épaisseur de la barrière par rapport à la distance inter-électrode ‘‘d’’. Pour chaque position on a effectué trois essais puis on a calculé la valeur moyenne pour avoir la tension mesurée.

Les valeurs de la tension de claquage du système pointe-plan en fonction d’épaisseur de la barrière propre et de la position de celle-ci par rapport aux électrodes sont consignées dans les tableaux **Tab.III**.

Barrière isolante à surface propre (2L=15cm)				
a/d (%)	U_m (kV)	U_c (kV)	$(U_c - U_{sbc})/U_c$ (%)	Correction atmosphérique
0	100	104	57.5	$P = 94.46 \text{ kPa}$ $T = 15.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ $K_d = 0.96$ $K_h = 1.02$
7.5	96.33	100.3	53.76	
12.5	90	93.8	47.3	
25	84	87.42	40.88	
37.5	80	83.26	36.72	
50	78	81.2	46.6	
62.5	75	78	31.46	
75	71	73.89	27.35	
90	69	68.94	22.4	

Tab. III .1 : $U = f(a/d)$ pour l’épaisseur de la barrière $e=3\text{mm}$ pointe -plan

Barrière isolante à surface propre (2L=15cm)				
a/d (%)	U _m (kV)	U _c (kV)	(U _c -U _{sb})/U _c (%)	Correction atmosphérique
0	112	117.77	71.23	P= 99.7kPa T = 14.8 °C K _d =1.015 K _h =1.04
7.5	105.5	110	63.46	
12.5	96	100.94	54.4	
25	91	95.7	49.16	
37.5	87	91.48	44.94	
50	83	87.27	40.73	
62.5	80.53	84.68	38.14	
75	74	77.81	31.27	
90	69	72.55	26.01	

Tab. III .2: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière e=5mm pointe -plan

Barrière isolante à surface propre (2L=15cm)				
a/d (%)	U _m (kV)	U _c (kV)	(U _c -U _{sb})/U _c (%)	Correction atmosphérique
0	101.66	104.2	55.33	P= 99.94kPa T = 14.1 °C K _d =1.02 K _h =1.03
7.5	101	103.5	55.03	
12.5	94.36	96.71	51.8	
25	92.33	94.63	50.8	
37.5	89.8	92.04	49.4	
50	85	87.12	46.6	
62.5	82	84	44.6	
75	75.25	77	39.55	
90	76	76	38.76	

Tab .III. 3: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière e=8mm pointe-plan

Barrière isolante circulaire à surface propre (D=15cm)				
a/d (%)	U_m (kV)	U_c (kV)	$(U_c - U_{sbc})/U_c$ (%)	Correction atmosphérique
0	113.33	115.6	69	P= 98.63kPa T = 16 °C $K_d=1$ $K_h=1.02$
7.5	106.66	108.79	62.26	
12.5	93	94.86	48.32	
25	88.33	90	43.46	
37.5	84	85.7	39.16	
50	81	82.62	36	
62.5	77.66	79.2	32.66	
75	75.25	77.61	31.07	
90	74.51	76	29.46	

Tab. III. 4: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=8\text{mm}$, $D=15\text{cm}$ pointe-plan

d (cm)	U_{sbm} (kV)	U_{sbc} (kV)	Correction atmosphérique
8	45.41	46.54	P=99.94kPa T = 14.1 °C $K_d=1.02$ $K_h=1.03$

Tab. III .5 : Rigidité diélectrique sans barrière pointe-plan

Barrière isolante à surface propre (2L=15cm)				
a/d (%)	U _m (kV)	U _c (kV)	(U _c -U _{sb})/U _c (%)	Correction atmosphérique
0	122.54	125	56.99	P= 98.86kPa T = 22.6 °C K _d =0.96 K _h =0.98
7.5	122	124.54	55.55	
12.5	97.33	99.35	54	
25	89.33	91.2	41.52	
37.5	86.66	88.46	39.71	
50	86	87.8	38.46	
62.5	85.33	87.1	34.47	
75	106	108.2	38.77	
90	108	110.25	51.6	

Tab. III. 6: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=3\text{mm}$ pointe-pointe

Barrière isolante à surface propre (2L=15cm)				
a/d (%)	U _m (kV)	U _c (kV)	(U _c -U _{sb})/U _c (%)	Correction atmosphérique
0	127.6	125	57.33	P= 97kPa T = 23.1 °C K _d =0.96 K _h =0.98
7.5	119.51	122	56.28	
12.5	116	118.41	54.96	
25	103	105.14	49.67	
37.5	90	91.87	38.54	
50	84.66	86.42	33.09	
62.5	80.66	82.34	29.01	
75	94	95.95	42.62	
90	111	113.31	52.93	

Tab. III. 7: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière $e=5\text{mm}$ pointe-pointe

Barrière isolante à surface propre (2L=15cm)				
a/d (%)	U _m (kV)	U _c (kV)	(U _c -U _{sbc})/U _c (%)	Correction atmosphérique
0	131.68	129	58.65	P= 98.16kPa T = 22.6 °C K _d =0.96 K _h =0.98
7.5	125.38	128	58.33	
12.5	123	125.56	57.33	
25	104	106.16	49.76	
37.5	97	99.02	46.14	
50	86	87.8	39.25	
62.5	89	90.85	41.29	
75	90.66	92.54	44.73	
90	104	106	54	

Tab. III. 8: $U = f(a/d)$ pour l'épaisseur de la barrière e=8mm pointe-pointe

d (cm)	U _{sbm} (kV)	U _{sbc} (kV)	Correction atmosphérique
8	53.04	53.56	P=99.94kPa T = 14.1 °C K _d =1.02 K _h =1.03

Tab. III .9: Rigidité diélectrique sans barrière pointe-pointe.

Tab. III : $U = f(a/d)$ pour les différentes épaisseurs de la barrière.

L'effet de la position de l'écran sur la tension d'amorçage de l'espace d'air interélectrode des systèmes considérés est illustré par les figures **Fig.III.6** et 7.

Il en résulte que le système avec barrière est plus rigide que celui sans celle-ci quelle que soit la configuration considérée. La tension de claquage de l'intervalle d'air du système est croît avec l'élévation du l'épaisseur d'écrans insérés.

Il résulte de la figure **III.7 et 8** que la valeur maximale de la rigidité diélectrique du système est obtenue quand la barrière est en contact avec la pointe ($a/d=0\%$) quelle que soit la configuration considérée.

Par contre, pour la barrière de 15cm de largeur de forme circulaire, le maximum de tension est obtenu en 0% et de la même façon, la tension de claquage décroît lorsqu'on éloigne la barrière de la pointe (**Fig.14**).

En outre, la tension de claquage et par conséquent la rigidité diélectrique du système augmente avec l'épaisseur de la barrière. Ceci peut être expliqué par la croissance de la longueur du canal de la décharge avec l'élévation de l'épaisseur de la barrière. La figure **III.9 et 10** montre clairement que le taux d'augmentation de la rigidité diélectrique pour une barrière à surface propre des épaisseurs 3, 5 et 8mm, est respectivement de 57.5, 71.23 et 55.33%, celles ci sont obtenues pour $a = 0\%$ de la distance inter électrode.

Pour la configuration pointe-pointe le taux d'augmentation de la rigidité diélectrique pour une barrière à surface propre des épaisseurs 3, 5 et 8mm, est respectivement 56.99, 57.33 et 58.65 %. Pour une barrière de forme circulaire $e=8\text{mm}$, le taux d'augmentation est respectivement de 69%. Ces valeurs reflètent l'influence de la décharge sur la barrière où la rigidité diélectrique du système est améliorée avec l'augmentation de l'épaisseur e .

Il résulte de la visualisation de la décharge (**Fig.III.16 et 17**) que l'augmentation de la tension de claquage est surtout liée à l'allongement du canal de la décharge principale. Ce canal est généralement un chemin allant de la pointe vers le bord de la barrière puis de bord vers le plan. Les photographies de ces figures illustrent clairement le chemin de la décharge disruptive ; elles montrent toutes les étapes de sa progression depuis la naissance la décharge jusqu'au claquage, pour différents types et positions des barrières utilisées.

Ces figures nous montrent aussi que la décharge se propage d'abord dans l'air au dessus de la surface de la barrière propre et donne lieu ensuite au claquage de l'intervalle d'air entre la barrière et le plan quelles que soient l'épaisseur et la position de la barrière. On conclut alors que la décharge ne perce pas la barrière mais empreinte le chemin le plus court qui est l'air situé entre la pointe sous tension et bord de la barrière, puis du bord de la barrière au plan à la terre.

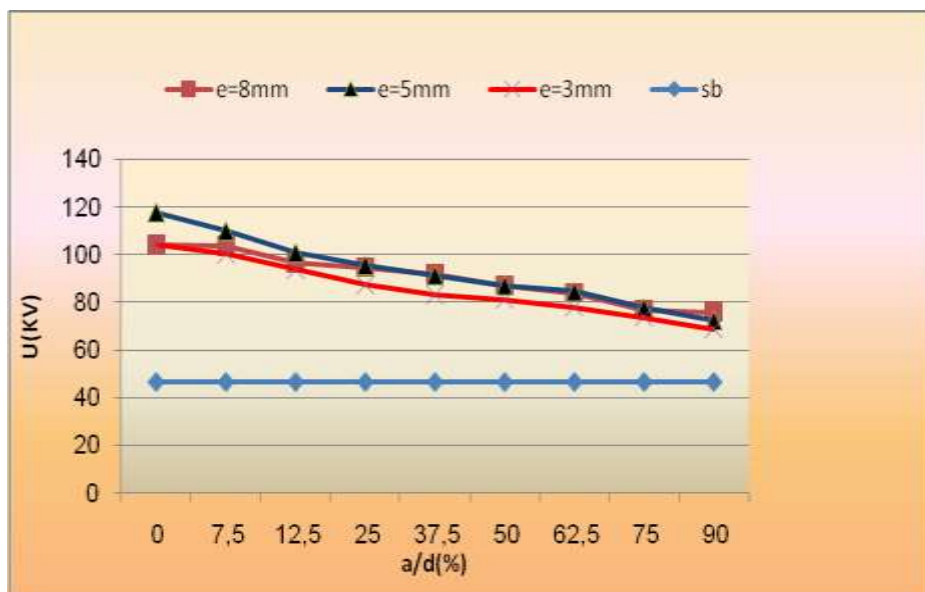


Fig. III.7 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d (e variable, $d=8\text{cm}$, pointe-plan).

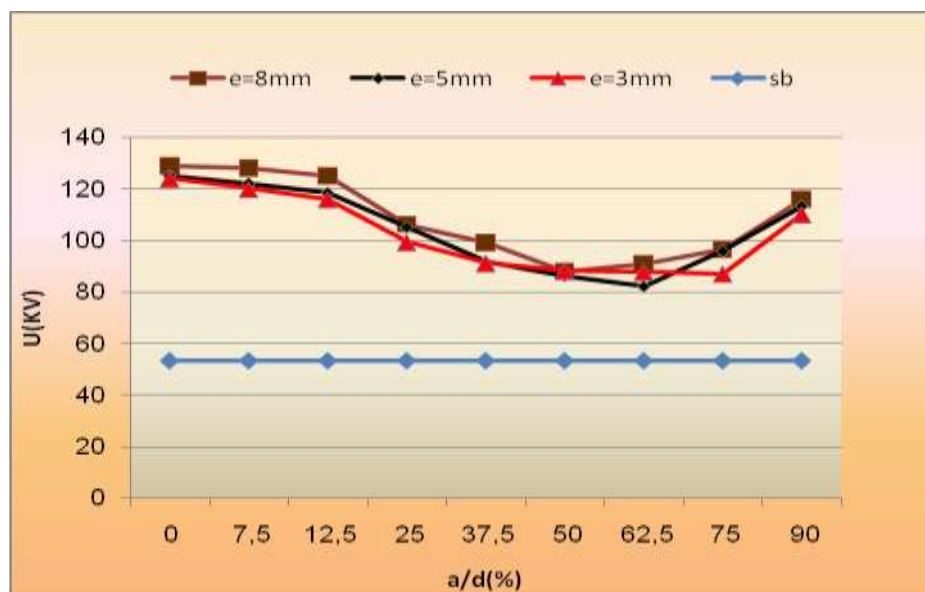


Fig. III.8 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d (e variable, pointe-pointe).

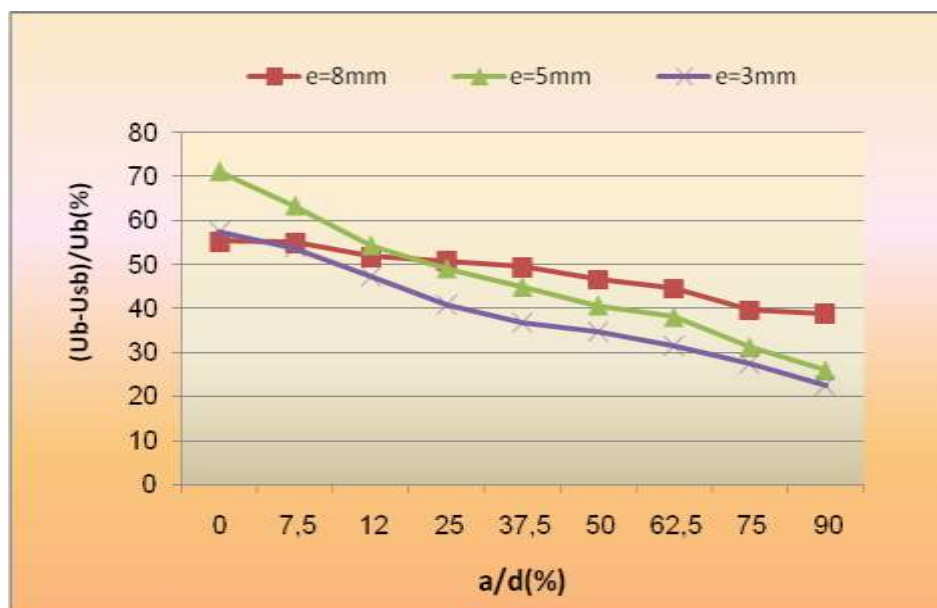


Fig. III.9 : Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique (e variable, pointe-plan).

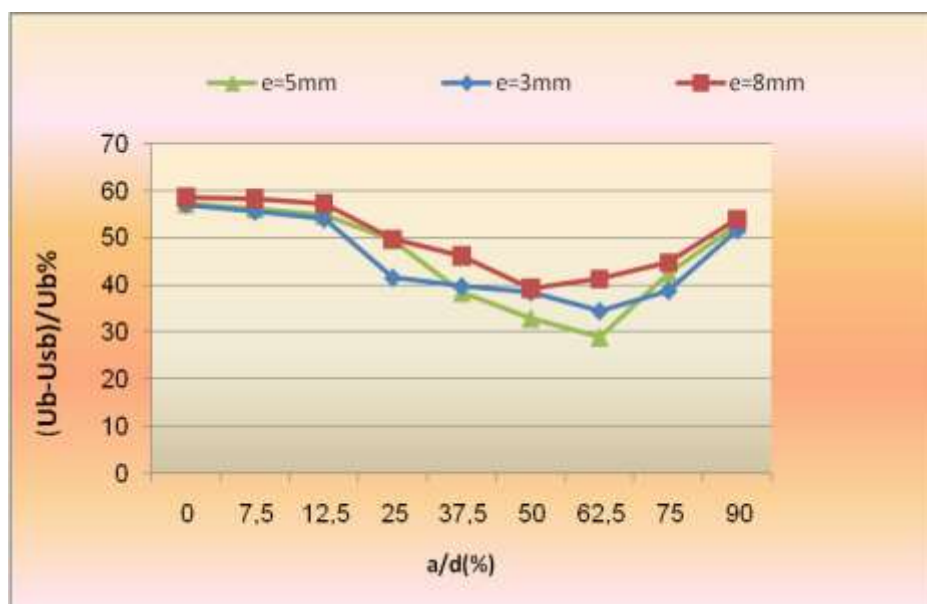


Fig. III.10 : Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique (e variable, pointe-pointe).

III.3.2 Influence de type de configuration

Les résultats consignés dans les tableaux **III.6.7** et **8** sont illustrés par les figures **III. (11, 12 et 13)**.

Il résulte que la valeur maximale de la rigidité diélectrique du système est obtenue quand la barrière est en contact avec la pointe ($a/d=0\%$) quelle que soit la configuration considérée et la forme de la barrière.

Il en découle que la tension disruptive du système décroît avec l'élévation de la distance entre les électrodes de base.

Dans la configuration pointe-plan la tension de claquage maximale obtenue pour les épaisseurs 3, 5 et 8mm, est respectivement de 104, 117.77 et 104.2KV. A partir de ce point, elle décroît sans atteindre la valeur de la rigidité diélectrique de l'intervalle sans barrière.

Pour la configuration pointe-pointe la tension de claquage maximale obtenue pour les épaisseurs 3, 5 et 8mm, est respectivement de 124.54, 125 et 129KV. A partir de ce point, elle décroît sans atteindre la valeur de la rigidité diélectrique de l'intervalle sans barrière.

En ce qui concerne les deux configurations, la tension de disruption de l'intervalle d'air en pointe-pointe est plus grande que celle obtenue en configuration pointe-plan quelque soit l'épaisseur de la barrière c'est-à-dire que le système pointe-barrière-pointe est plus rigide que celui où la configuration est une pointe-barrière-plan.

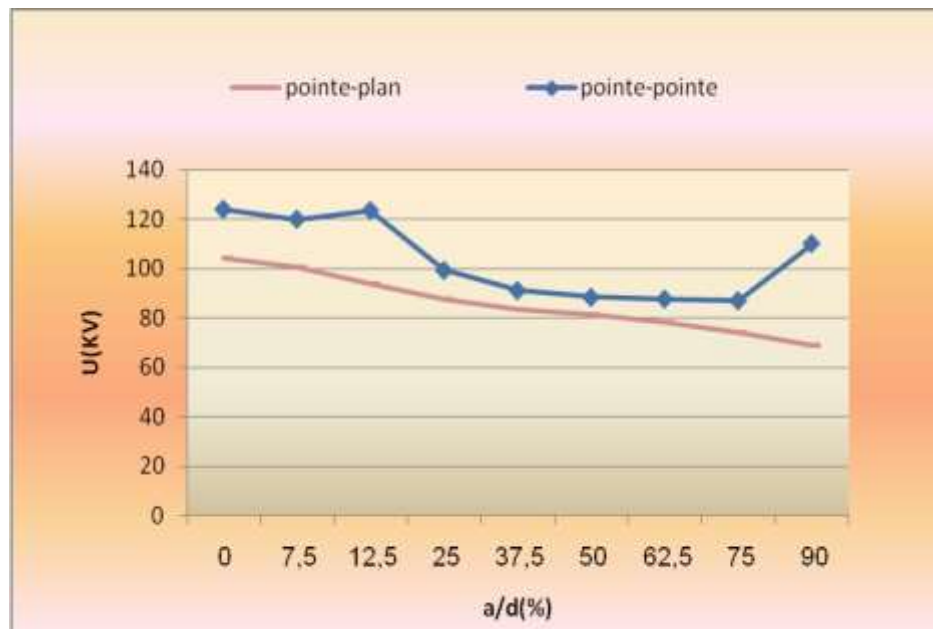


Fig. III.11 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($2L=15\text{cm}$, $e=3\text{mm}$).

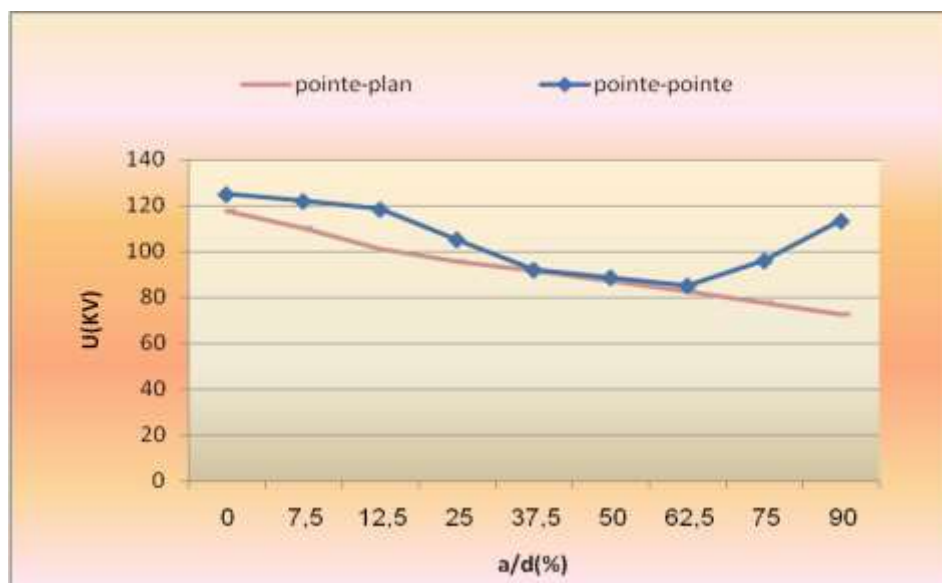


Fig.III.12 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($2L=15\text{cm}$, $e=5\text{mm}$).

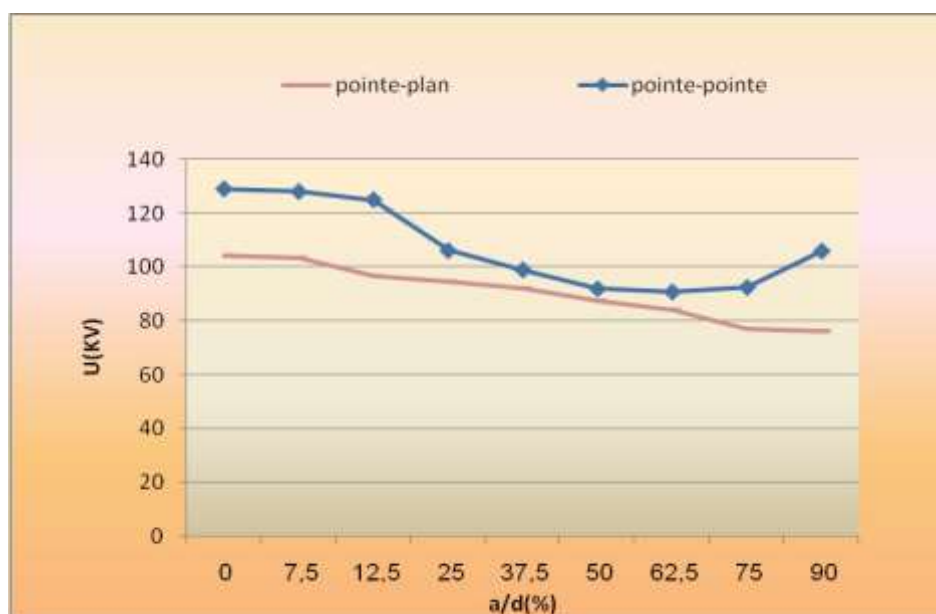


Fig. III.13 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d ($2L=15\text{cm}$, $e=8\text{mm}$).

III.3.3 Effet de la forme

Les résultats consignés dans les tableaux III. 3 et 4 sont illustrés par les figures III.14 et 15. En ce qui concerne la forme de la barrière, la tension de disruption de l'intervalle d'air en forme circulaire est plus grande que celle obtenue en forme carrée quelque soit l'épaisseur de la barrière c'est-à-dire que la barrière de forme circulaire est plus rigide que celle de forme carrée.

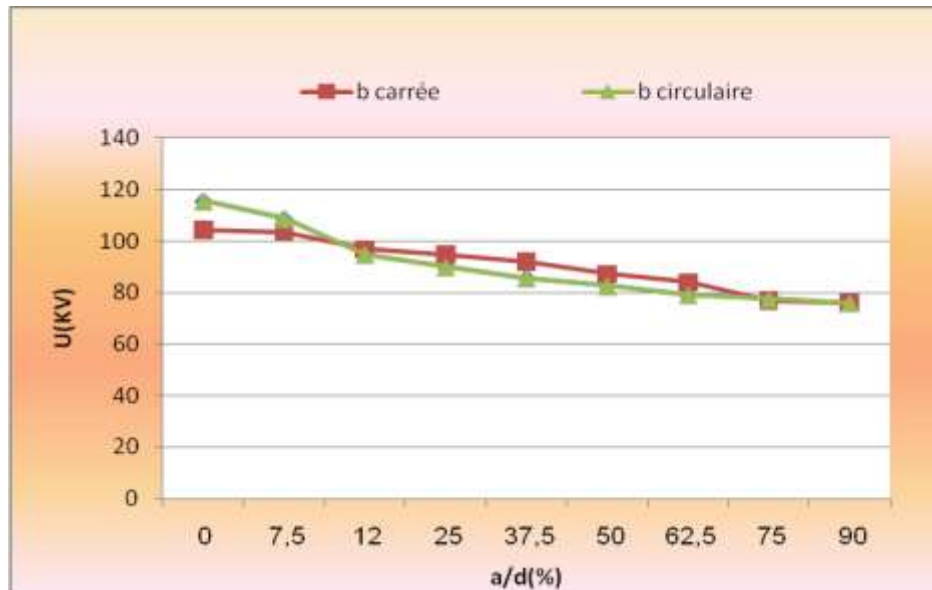


Fig. III.14 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d (2L=15cm, pointe-plan).

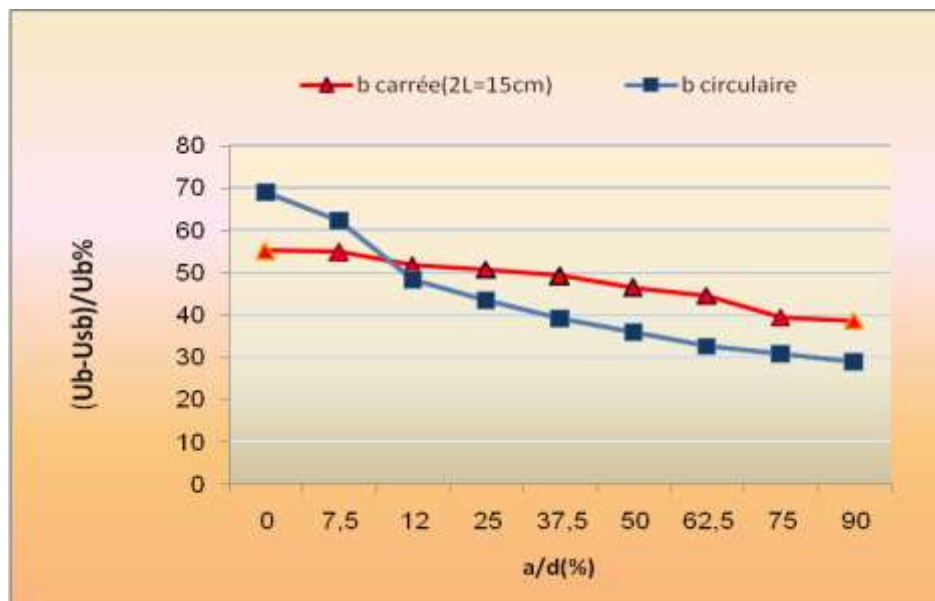


Fig. III.15 : Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique (2L=15cm, pointe-plan).

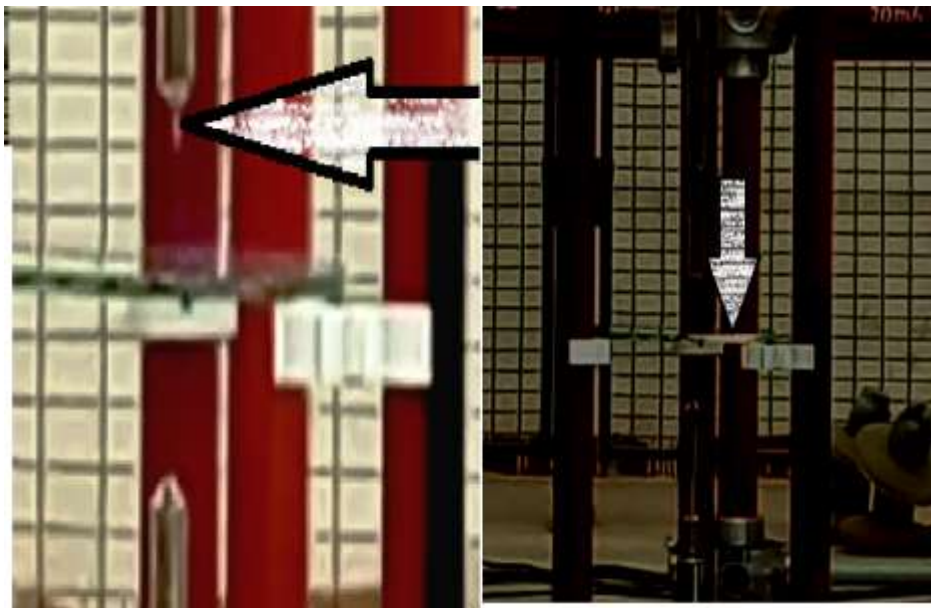


Fig.III.16: Chemin des décharges de rupture de l'espace d'air du système pointe-écrans- pointe pour une barrières d'épaisseur 3mm.

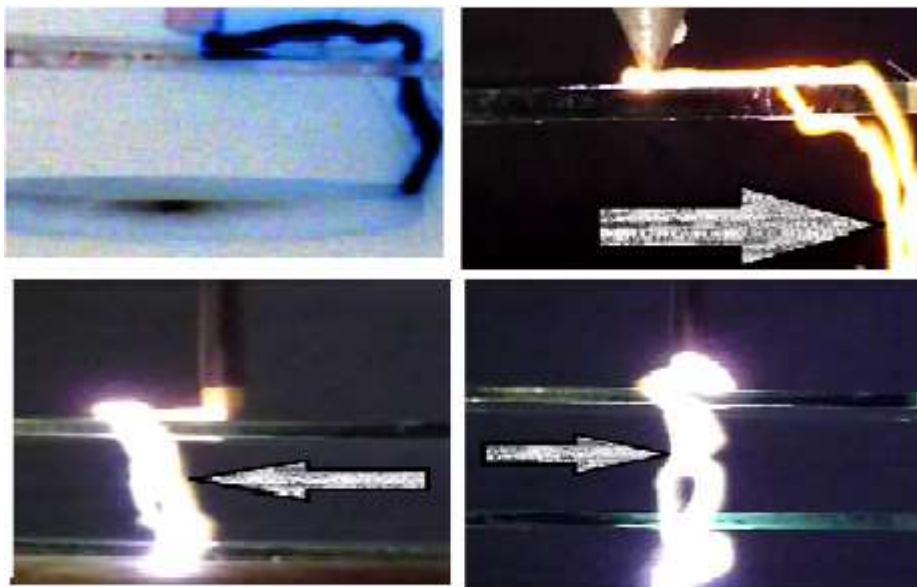


Fig.III.17: Chemin des décharges de rupture de l'espace d'air du système pointe-écrans- plan pour une barrière d'épaisseur 3mm.

III.3.4 Influence de la barrière métallique

Les valeurs de la tension de claquage du système pointe- barrière- plan en fonction de la largeur de la barrière métallique et la position de celle-ci par rapport aux électrodes sont consignées dans le tableau **III. 10**

Barrière métallique (D=15cm, e=5mm)				
a/d (%)	U_m (kV)	U_c (kV)	$(U_c - U_{sbc})/U_c$ (%)	Correction atmosphérique
0	51,24	51,2	9,1	$P = 100.7 \text{ kPa}$ $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $K_d = 1.007$ $K_h = 1.0079$
7,5	50,17	50,22	7,32	
12,5	49,42	49,47	5,92	
25	48,19	48,24	3,52	
37,5	46,22	46,27	-0,58	
50	45,98	46,02	-1,129	
62,5	43,86	43,9	-6	
75	42,27	42,3	-10	
90	40,85	40,89	-13,81	

Tab. III.10 : Diamètre de la barrière métallique D=15cm.

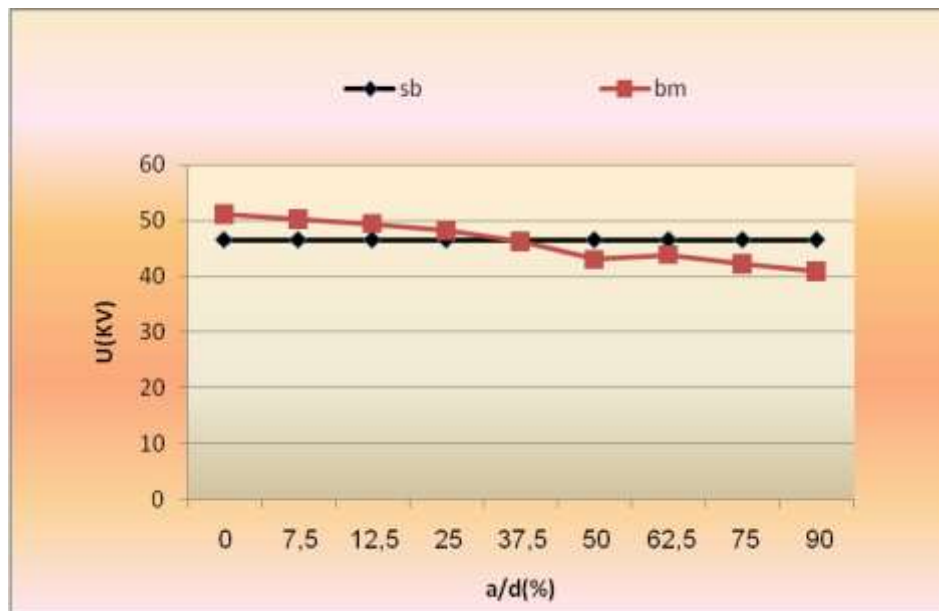


Fig. III.18 : Tension de claquage en fonction du rapport a/d (D=15cm, e=5mm).

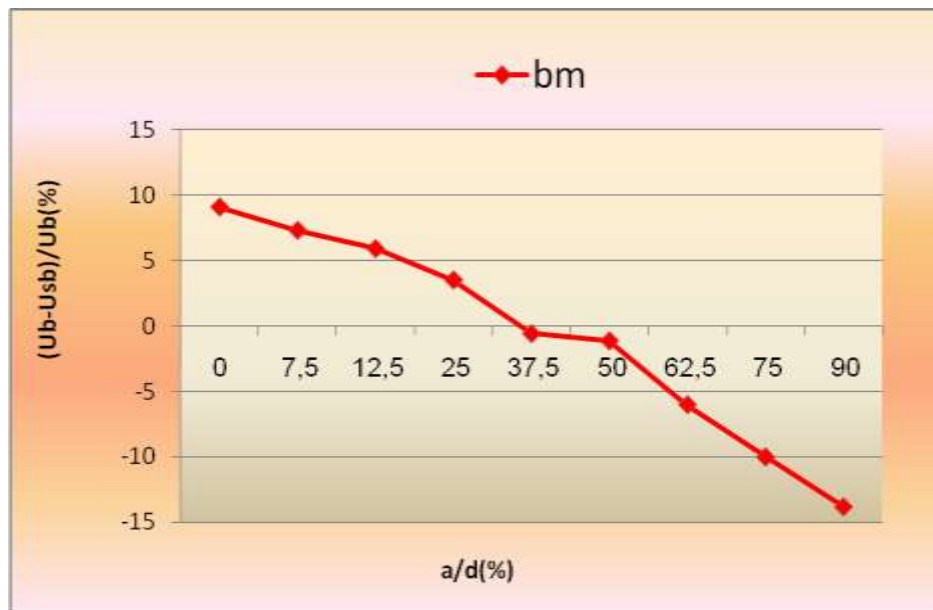


Fig. III.19 : Taux d'augmentation de la rigidité diélectrique (D=15cm, pointe-plan).

Les résultats consignés dans le tableau **III.10** sont illustrés par les figures **III.18** et **19**. La barrière métallique utilisée dans notre cas est de forme circulaire de diamètres 15 et de 5mm d'épaisseur. La figure **III.18** met en évidence l'influence de barrière conductrice sur la tension de claquage du système.

Il en résulte que pour la barrière de 15cm de diamètre, la rigidité diélectrique du système avec barrière est supérieure à celle sans barrière lorsque $0 < a/d < 37,5\%$. Par contre elle est inférieure quand $a/d > 37,5\%$.

Le taux d'augmentation maximum de la rigidité diélectrique du système avec écran conducteur est de 9,1% pour la barrière de 15cm de diamètre obtenu pour $a/d=0\%$.

La figure **III.20** montre qu'avec une barrière métallique, la rupture diélectrique de l'intervalle d'air se fait de façon différente qu'avec la barrière isolante. Nous observons que lorsque la barrière est en contact avec la pointe, la disruption du système est équivalente à la rupture de l'intervalle d'air barrière- plan. Lorsque le rapport a/d est supérieur à 0%, c'est la rupture de l'intervalle barrière- plan qui s'effectue avant celui entre la pointe et barrière pour provoquer finalement la rupture totale du système pointe-barrière- plan.

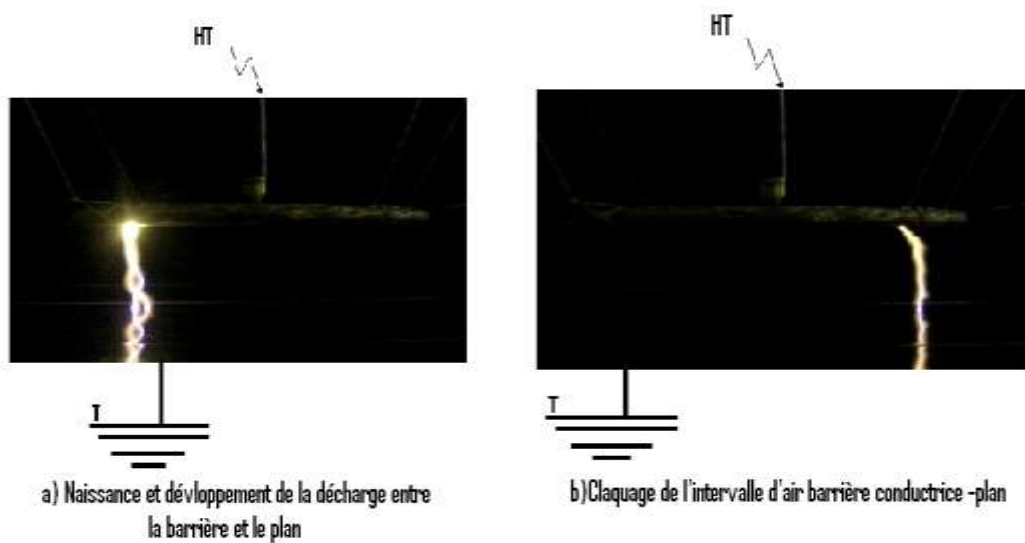


Fig. III.20: Étapes de propagation de la décharge sur une barrière métallique de 15cm de diamètre en contact avec la pointe.

III. 4 Conclusion

Notre travail expérimental a pour objectif d'analyser le comportement d'une barrière isolante située entre deux électrodes pointe- plan et pointe-pointe mise sous tension continue positive.

Il découle de cette étude les résultats suivants :

- ❖ Dans les intervalles d'air« pointe – plan», pour une tension continue positive la barrière isolante avec une surface propre joue en premier lieu le rôle d'obstacle géométrique provoquant l'allongement de la décharge disruptive et en conséquence l'augmentation de la tension disruptive.
- ❖ L'efficacité de la barrière dépend principalement des positions entre l'électrode et le plan. Cependant, la caractéristique de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière a une allure décroissante; elle a un maximum lorsque la barrière est placée au voisinage de l'électrode pointe. Cela est dû en fait que la barrière uniformise la distribution du champ électrique entre la barrière et le plan.
- ❖ L'efficacité de la barrière dépend aussi de ses dimensions (épaisseurs). Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que plus l'épaisseur de la barrière est grande, plus le système d'isolation est rigide. Cependant nous avons trouvé que l'épaisseur a pratiquement qu'une légère influence.

- ❖ La valeur maximale de la rigidité diélectrique du système dépend de l'épaisseur et de la position de la barrière. Un optimum de 117.77kV est atteint pour une épaisseur de 5mm pour la configuration pointe-plan et 129KV pour la configuration pointe-pointe.
- ❖ Le taux d'augmentation maximal de la rigidité diélectrique lors de l'insertion d'une barrière isolante circulaire d'épaisseur 8mm est de 58.65% lorsqu'elle est située à environ 0% de la distance interélectrode.
- ❖ Le taux d'augmentation maximal de rigidité diélectrique du système pointe-plan d'une barrière isolante propre d'épaisseur 5mm est de 71.23KV%.
- ❖ La rigidité diélectrique du système avec une barrière isolante circulaire d'épaisseur 8mm est plus grande que celle de forme carrée.
- ❖ La rigidité diélectrique du système pointe-pointe est supérieure à celle du système pointe-plan.
- ❖ Nous avons observé expérimentalement qu'en présence d'une barrière isolante, la décharge se propage de la pointe vers le bord de la barrière, et en suite vers l'électrode plane.
- ❖ La barrière métallique améliore légèrement la rigidité diélectrique de système lors de son insertion dans celui-ci.
- ❖ L'évolution de la décharge dans une barrière métallique peut être résumée par un développement de deux arcs en série dont le premier apparaît entre la pointe et la surface de la barrière et un deuxième arc entre le bord de la barrière et le plan. Le premier arc progresse vers le deuxième et une fois la longueur de l'arc critique est atteinte, il se produit le claquage de l'intervalle d'air du système.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principal visé dans ce travail expérimental était l'étude de l'effet de l'épaisseur de la barrière sur la tenue électrique d'un intervalle d'air d'un système à champ non uniforme sous tension continue positive.

Les résultats essentiels émanant de ce travail peuvent être résumés comme suit :

- ❖ Dans les intervalles d'air « pointe– plan » et « pointe– pointe », pour une tension continue positive la barrière isolante avec une surface propre joue en premier lieu le rôle d'obstacle géométrique provoquant l'allongement de la décharge disruptive et en conséquence l'augmentation de la tension disruptive;
- ❖ Le système avec barrière est plus rigide que celui sans celle-ci quelle que soit la configuration considérée et la tension de claquage de l'intervalle d'air du système est pratiquement décroît quelle que soit la position de l'écran dans l'intervalle interélectrode ;
- ❖ La rigidité diélectrique d'un système pointe-plan est maximale lorsque la barrière est située à (0%) de la distance interélectrode à partir de la pointe sous tension continue positive;
- ❖ La tension disruptive des deux systèmes augmente peu avec l'élévation de l'épaisseur de la barrière isolante insérée entre les électrodes de base;
- ❖ Le système pointe-barrière-pointe est plus rigide que celui où la configuration est assimilée à une pointe-barrière-plan ;
- ❖ La rigidité diélectrique de la configuration pointe-pointe est maximale au voisinage des électrodes haute tension (0%) et terre (90%) ;
- ❖ La tension disruptive de l'intervalle d'air de système pointe- barrière -plan de forme circulaire est plus grande que celle de système pointe-barrière carrée-plan;
- ❖ En ce qui concerne la barrière métallique la rigidité diélectrique du système est légèrement améliorée.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **M. NEMAMCHA** : Polycope de cours : «Claquage des isolantes hautes tensions » Université de Guelma ,2001.
- [2] **X.DUCURET** : « lignes aériennes : matériels » , Technique de l'ingénieur, D4423.
- [3] **R.BOUDISSA** :« cours du module matériaux en électrotechnique » Université A MIRA. de Bejaia ,2005
- [4] **I.NDAYE** : « Initiation et développement d'une décharge couronne sur une surface de glace» mémoire présenté à l'université de Québec 2000.
- [5] **Tatiana Guerre Olivera** : « Etude expérimentale du comportement des isolateurs recouverts de glace sous tension de foudre et de manoeuvre», Mémoire présenté à l'université de Québec, juillet 2004.
- [6] **Roland Coello, Bernard Aladenize** : «Les diélectriques» : Propriétés diélectriques des matériaux isolants, Edition Hermès, Paris.
- [7] **George Le Roy, Claude De Gary, Bernard Hutzler, Jacques Lalot, Christian Dubanton** : « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Ed EYROLLES, 1^e Edition, 1984.
- [8] **Z.You.Bin**: «The influence of the electrode material of rod-rod gap with tip on its DC breakdown voltage », Session 2135, 9th ISH, Graz 1995, pp1-2.
- [9] **Iamarene Ouarda** : « Influence d'une barrière isolante polluée sur la tension de claquage et sur le champ électrique d'une configuration d'électrode pointe-plan », P.F.E, Université A. Mira de Bejaia, 2005.
- [10] **A. Boubakeur** : « Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan », Thèse doctorat, Université Varsovie, Pologne 1979.
- [11] **E. Marx**, «Air dielectric strength in uniform fields ». E.T.Z. H 33, pp.1161, 1930.
- [12] **M. Aguet, M .Ianoz** , « Haute tension »,volume XXII: traité d'électricité. Deuxième édition, 1982.
- [13] **CEI60270-2**, « Partial discharge measurement »,2000.
- [14] **C. Guillermin**, « la dégradation des isolants électriques », LEMD-Schneider Electricque, p 1-4,1999.
- [15] **E. Kuffel, W. Zaengl, J .Kuffel**, « High voltage engineering fundamentals » edition ,Butterworth- Heineman ,Oxford 2000.
- [16] **H. Roser**, « Dielectric strength screen in air », E.T.Z . H17, Bd 53, pp.411, 1932.
- [17] **N.N. Tikhodeev**, « Effect of an incomplete barrier in electrical discharge; new experiments and advances in theory », Soviet Physics Tech. Phys, Vol.2, pp.385, 1957.

BIBLIOGRAPHIE

- [18] **M. P. Verma**, « Electric field lines of rod-barrier-plane in positive impulse voltage », Wiss.Zeit. der TU Dresden H1, pp.111, 1962.
- [19] **J. Pilling** ,« Dielectric barrier in uniform field », Elektrie 23, H11, pp.463, 1969.
- [20] **M. Awad**, « Disruption d'un intervalle d'air pointe-plan avec barrière polluée», Elektrie29, H10, pp.559, 1975.
- [21] **A. Beroual , A. Boubakeur**, « Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in pointe-plane arrangements », IEEE Trans. Electr. Insul,Vol .20. N°6, pp.1131, 1991.
- [22] **J.L. Jakubowski, A .Boubakeur**, « Rigidité des moyens intervalles d'air dans les systèmes isolants pointe-plan avec barrières », Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences (Polish Academy of Sciences Bulletin), Vol.28, N°9-10, pp.141-147, 1980
- [23] **A. Boubakeur**, « Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe-plan », Rozprawy Elektryczne (Polish Academy of Sciences), Vol.27, N°3, pp.729-744,1981.
- [24] **A. Boubakeur**, « Discharge phenomena in long air gaps with insulating screens », 4th International Symposium on High Voltage Engineering (4th ISH), paper 44-05, Athens ,Greece, 1983.
- [25] **L. Mokhnache**, « Contribution à l'étude de l'influence des barrières dans les intervalles d'air-pointe-plan par le calcul numérique du champ à l'aide de la méthode des éléments finis avec et sans charge d'espace », Thèse de magister, ENP d'Alger 1997.
- [26] **A.Boubakeur, L.Mokhnache**, « Potentiel d'une barrière conductrice flottante dans un intervalle d'air pointe-plan », Première Conférence National sur la Haute Tension (CNHT'95), pp.27-31, Bejaia 1995.
- [27] **L. Ming, T. Bengtsson** , « Barrier effects air insulates systems under DC voltage »,session 4303, 8th ISH, pp.1-4. Japan 1993
- [28] **L. Ming, M. Leijon , T. Bengston**, « Factors influencing barrier effects in air gaps », International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 2168, pp.1-4, Graz 1995.
- [29] **Z .You Bin**, « The influence of the electrode material of rod-rod gap with tip on its DC breakdown voltage », International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 2135, pp.1-2, Graz 1995.
- [30] **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 (9th ISH),session 2899, pp. 1-4, Graz 1995.

BIBLIOGRAPHIE

- [31] **S. Chakravorti, M. C. Siddagangapa**, « Effect of charge accumulation on the electric field distribution along spacer surfaces », International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 8352, pp. 1-4, Graz 1995.
- [32] **K. Nakanishi, A. Yoshiyoka, Y. Shibuya**, « Surface charging on epoxy spacer at DC stress in compressed SF₆ gas », IEEE Trans. Power Apparatus and Syst, Vol.102, N°12, pp.3919-3927, 1983.
- [33] **F.V. Topalis, I. A. Stathopoulos**, « Barrier effect on electrical breakdown air gaps: a theoretical approach », International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 2147, pp.1-4, Graz 1995.
- [34] **J. M. Meek, M. MC. Collins**, « Measurement of field preceding impulse breakdown of rodplane gaps », Proc. Of the 7th Int.conf. on Phenomena in ionized gases, Vol1, Belgrad, pp.581-585, 1966.
- [35] **k. Hidaka**, « Progress in Japan of space charge field measurement in gaseous dielectric using a pockels sensor », IEEE. Electrical Insulation Magazine, Vol.12, N°1, pp.17-28.1996.
- [36] **A. Boubakeur, L. Mokhnache, S. Boukhtache**, « Theoretical investigation on barrier effect in point-plane air gap using finite elements method in presence of space charge », POWERCOM'98, International conference on Power System Technology, Vol.1, pp.116-121, Beijing, 1998.
- [37] **A. Boubakeur, L. Mokhnache, S. Boukhtache**, « Numerical model describing the effect(s) of a barrier and the space charge fields on the electrical strength of a point-plane air gap using the finite elements », Conference on Electrical. Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP'2000, Vol.2, pp.466-469, Victoria (Canada), 2000.
- [38] **A. Boubakeur, L. Mokhnache, S. Boukhtache, A. Felliachi**, « Theoretical investigation on barrier effect on point-plane air gap breakdown voltage based on streamers criterion », IEEE. Science, Measurement and Technology. Vol.151, pp.167-174, 2004.
- [39] **A. Boubakeur, L. Mokhnache, S. Boukhtache**, « Numerical Model of Electrostatic Barrier effect in a Point-Plane Air Gap in Presence of Positive Space Charge », Archives of Electrical Engineering, Polish Academy of Sciences, edited by Polish Scientific Publishers PWN, ISSN 0004-0746, Index 351 660, Vol.XLVIII, N°189- 3/99, 1999
- [40] **W. Mosch, E. Lemke, M. Eberhardt** « Einführung in die Hochspannungstechnik; Luftisolation » VEB Kongress-und Werbedruck, Oberlungwitz,; qes 1984, Dresden, RFA.

Résumé

Généralement, les barrières isolantes propres sont utilisées entre les contacts des disjoncteurs à gaz, dans les interrupteurs HT, les bornes de traversées, les isolateurs, les transformateurs et les actionneurs. Leur insertion dans ces équipements apporte une très grande amélioration de la rigidité de ces systèmes.

Cette amélioration est influencée par des paramètres concernant la barrière (la forme, le nombre de barrières utilisées, la nature, ses dimensions,...). Elle est influencée aussi par la configuration de l'intervalle (la longueur de l'intervalle, la position de la barrière) ainsi que la pollution de l'air est l'humidité.

Pour ces raisons, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de l'épaisseur d'un écran sur l'efficacité des systèmes d'air à champ non uniforme.

Mots clés: barrières, la rigidité, l'efficacité.

Abstract:

Typically, clean insulation barriers are used between gas break contacts, HV switches, bushing a terminal, insulators, transformers and actuator. Their insertion in this equipment brings a very great improvement in the rigidity of these systems.

This improvement is influenced by parameter concerning the barrier (the shape, the number of barriers used, the nature, its dimension, etc.) it is also influenced by the configuration of the interval (the length of the gap, the position of the barrier) as well as air pollution is moisture.

For these reason, we were interested in studying the effect of a thickness of screen on the efficiency of non-uniform field air systems.

Keywords: barriers, the rigidity, efficiency.

المخلص:

عادةً يتم استخدام حواجز العزل النظيفة بين اتصالات قواطع الغاز، مفاتيح الجهد العالي، محطات الجبة، العوازل، المحولات والمحركات. إدخالها في هذه الأجهزة يوفر تحسناً كبيراً جداً في صلابة هذه النظم. يتأثر هذا التحسن بعدة عوامل متعلقة بالحاجز (الشكل، عدد الحواجز المستخدمة، الطبيعة وأبعادها) ويتأثر أيضاً بالمجال الفاصل (طول الفجوة، مواضع الحواجز) وكذلك تلوث الهواء والرطوبة. لهذه الأسباب قمنا بدراسة تأثير سماكة الحاجز على كفاءة أنظمة الهواء الميدانية الغير الموحدة.

الكلمات المفتاحية : الحواجز، صلابة العزل، كفاءة