

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique
Option : Techniques de haute tension

*Modélisation de la disruption d'un intervalle d'air
à champ électrique non uniforme avec barrières
sous atmosphère polluée et tension alternative*

Présenté par :

M^{elle} : YAHIAOUI Nadjat

M^{elle} : ZIDANE Fatima

Soutenu publiquement le 29/06/2015 devant le jury constitué de :

M ^f	ZEBBOUDJ	Youcef	Professeur	Univ. Bejaia	Président
M ^f	YAHIAOUI	Belkacem	Doctorant	Univ. Bejaia	Examineur
M ^f	BOUDISSA	Rabah	Professeur	Univ. Bejaia	Rapporteur
M ^{me}	BOUGHANI	Talit	Doctorante	Univ. Bejaia	Co- Rapporteur

2014/2015

Remerciement

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

*Arrivé au terme de notre travail, nous tenons à exprimer vivement notre profonde gratitude à notre promoteur **M^r R. BOU DISSA** et notre Co-promotrice **M^{me} T. BOUGHANI**, pour l'aide, le suivi et l'intérêt qu'ils n'ont cessé de nous apporter jusqu'à l'achèvement de notre travail. Nous remercions **M^{elle} F. Bouchelga** a généreusement fait profiter de ses connaissances en haute tension et pour son aide et ses conseils utiles.*

Nous tenons également à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont fait l'honneur de juger notre travail.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui ont toujours été derrière mes exploits, avec leur aide matérielle et morale durant tout mon cursus que Dieux les protège et le garde en bonne santé.

A mes grands parents.

A mes chères Sœurs.

A mes chers frères.

À tous mes amis (es) sans exception et tous ceux qui me sont chers.

Fatima



Dédicace

A ma très chère mère, qui représente pour moi l'exemple du sacrifice du dévouement, et de l'honnêteté

A mon père, symbole de patience et du courage

Mes très chères sœurs Zahia, Naima, et Sakina

Mes très chers frères Mouloud, Firas, et Fayçal

A mes neveux Adam et Aya

A toute la Famille YAHIAOUI et ZERKOUNE

*A Tous mes Ami (e)s, chez lesquels j'ai trouvé
réconfort et soutien dans les moments les
plus pénibles*

Que je dédie ce travail

Y. Nadjjet



Sommaire

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I

**SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LA PERFORMANCE DES
BARRIERES**

I. 1 Introduction..... 3

I. 2 Investigations antérieures de recherches sur la performance des barrières 3

 C. P. Steinmetz, 1920 3

 E. Marx, 1930 3

 H. Roser, 1930-32 3

 N. F. Wolochtchenko, 1947 4

 J. Pilling, 1968-69 4

 M. Awad, 1975 – 77 5

 A. Boubakeur, 1979 5

 A. Beroual, 1991 6

 F.V. Topalis, 1991 7

 S. M. Lebedev et Co, 2001 7

 R. Boudissa, 2009..... 8

 H. Madi, 2010..... 8

 T. Belhoul, 2010..... 10

 L. Slimanou, 2010 11

 H. Mekbel, 2010 12

 S. Iouknane, 2011 12

 R. Boudissa et Co, 2011 13

 S. Mouhoubi et Co, 2011 14

 S. Slimani, 2012 14

 F. Mauseth, 2012 15

 S. Mansouri, 2012 15

 R. Boudissa, 2013..... 16

 M. H. Ramesh et Co, 2013 17

 F. Guerbas et Co, 2013 17

I. 3 Conclusion	18
-----------------------	----

CHAPITRE II

DIELECTRIQUES ET DECHARGES ELECTRIQUES

II. 1 Introduction	19
II. 2 Définitions	19
II. 2. 1 Isolant	19
II. 2. 2 Diélectrique	19
II. 3 Propriétés diélectriques des isolants	19
II. 3. 1 Rigidité diélectrique	20
II. 3. 2 Permittivité	21
II. 3. 3 Angle de pertes et facteur de dissipation	21
II. 3. 4 Résistivité et résistance d'isolement	22
II. 3. 4. 1 Résistance en tension continue	22
II. 3. 4. 2 Résistance d'isolement	23
II. 4 Différents matériaux isolants	23
II. 4. 1 Isolants gazeux	23
II. 4. 2 Isolants liquides	23
II. 4. 3 Isolants solides.....	24
II. 5 Verre	24
II. 5. 1 Verres trempés	25
II. 5. 2 Verres recuits	25
II. 5. 3 Fibres de verre	25
II. 6 Décharge dans l'intervalle d'air protégé par une barrière isolante.....	27
II. 6. 1 Décharge de type streamers.....	28
II. 6. 2 Décharges de type leader.....	29
II. 7 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses	29
II. 7. 1 Amorçage de l'air par avalanche primaire	29
II. 7. 2 Claquage de l'air par streamers	30
II. 7. 3 Disruption de l'air par leader	30
II. 8 Conclusion	31

CHAPITRE III

PHENOMENE DE POLLUTION EN HAUTE TENSION

III. 1 Introduction	32
III. 2 Définitions	32
III. 2. 1 Pollution	32
III. 2. 2 Salinité (Sa)	32
III. 2. 3 Couche de pollution	33
III. 2. 4 Degré de pollution	33
III. 2. 5 Conductance superficielle	33
III. 2. 6 Contrainte de contournement	33
III. 3 Différents types de polluants	33
III. 3. 1 Polluants naturels	33
III. 3. 2 Polluants dus aux activités humaines	34
III. 4 Sources de pollution	34
III. 4. 1 Pollution naturelle	34
a- Pollution marine	34
b- Pollution désertique	34
c- Autre type de Pollution naturelle	35
III. 4. 2 Pollution industrielle	35
III. 4. 3 Pollution domestique	35
III. 5 Facteurs climatiques d'influence de la pollution	35
a- Vent	35
b- Pluie	36
c- Humidité	36
d- Température	36
III. 6 Répartition de pollution sur les barrières isolantes	36
III. 7 Effet de la pollution sur les équipements électriques	37
III. 8 Principales méthodes d'évaluation de la sévérité de la pollution d'un site	37
III. 8. 1 Densité de dépôt de sel équivalente (DDSE)	38
III. 8. 2 Dispositif de mesure de conductivité superficielle à l'aide d'une sonde mobile	38

III. 9	Classification des niveaux de pollution atmosphérique extérieure	40
III. 9. 1	Pollution légère (première classe)	40
III. 9. 2	Pollution moyenne (deuxième classe)	41
III. 9. 3	Pollution forte (troisième classe)	41
III. 9. 4	Pollution très forte (quatrième classe)	41
III. 10	Classification des sévérités de pollution intérieure	41
III. 11	Méthodes de simulation de la pollution	41
III. 11. 1	Essais sous pollution naturelle	41
III. 11. 2	Essais sous pollution artificielle	42
III. 11. 2. 1	Pollution liquide	42
III. 11. 2. 2	Brouillard salin	42
III. 11. 2. 3	Couche solide	43
III. 12	Techniques de lutte contre la pollution	44
III. 13	Conclusion.....	44

CHAPITRE IV

PARTIE EXPERIMENTALE

IV.1	Introduction	46
IV. 2	Dispositif expérimental et techniques de mesure	46
IV. 2. 1	Circuit de mesure et de visualisation	46
IV. 2. 2	Modèle expérimental	47
IV. 2. 3	Composition de la solution polluante	48
IV. 2. 4	Procédé d'application de la pollution	49
IV. 2. 5	Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques	49
IV. 3	Résultats et discussions	50
IV. 3. 1	Disruption d'un intervalle d'air à champ non uniforme	50
IV. 3. 2	Amorçage d'un intervalle d'air pointe - pointe fixe avec une ou deux barrières	51
IV. 3. 3	Disruption d'un espace d'air pointe-pointe variable protégé par une ou deux barrières polluées	53
IV. 3. 4	Visualisation de la décharge électrique dans l'intervalle d'air pointe - pointe avec barrière uniformément polluée	58

IV. 3. 5 Caractère de la décharge électrique disruptive d'un intervalle d'air à pointe- pointe avec une barrière isolante fortement polluée	59
IV. 4 Conclusion	61
Conclusion générale	63

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Fig. I. 1: Arrangement «pointe - barrière - plans»	6
Fig. I. 2: Schéma de principe d'un intervalle d'air avec une barrière	7
Fig. I. 3: $\hat{U}_c = f(d)$ avec $D_{pa} = 15$ cm et σ_s variable	10
Fig. I. 4: $\hat{U}_c = f(d)$ avec $D_{pa} = 5$ cm et σ_s variable	10
Fig. I. 5: Photo et caractéristiques du modèle expérimental	11
Fig. I. 6: Schéma de mesure et de visualisation	15
Fig. I.7: Tension disruptive de l'intervalle d'air sphère-sphère avec barrière isolante	17
Fig. I. 8: Schéma de la cellule d'essais	18
Fig. II. 1: Cellules de mesure de rigidité diélectrique des isolants	20
Fig. II. 2: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension	21
Fig. II. 3: Circuit électrique équivalent série	22
Fig. II. 4: Circuit électrique équivalent parallèle	22
Fig. II. 5: Schéma de mesure des résistivités transversale ρ_{tcc} et superficielle ρ_{scc}	22
Fig. II. 6: Représentation schématique de la structure du verre de silice	24
Fig. II. 7: Décharge par Streamers ($d \leq 1m$)	30
Fig. II. 8: Décharge par leader	31
Fig. III. 1: Variantes d'uniformité et de non uniformité de distribution de pollution sur une barrière isolante	36
Fig. III. 2: Dispositif allemand de surveillance de la sévérité de pollution	38
Fig. III. 3: Sonde à électrodes planes avec papier absorbant	39
Fig. IV. 1 : Circuit de mesure électrique et de visualisation de la décharge	47
Fig. IV. 2: Modèle expérimental pointe-pointe avec une ou deux barrières	48
Fig. IV. 3: Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre)	49
Fig. IV. 4: $H = f(H_r, T)$	51
Fig. IV. 5: $K_h = f(H)$	51
Fig. IV. 6: Tension disruptive en fonction de la distance interélectrode des systèmes pointe -pointe et pointe - plan à diamètre du plan variable	52
Fig. IV. 7: Efficacité d'un système à barrière propre et sèche en fonction de la position relative et la largeur d'une seule barrière de protection	53

Fig. IV. 8: Efficacité du système à deux barrières propres et sèches dont l'une est en contact avec la pointe sous tension en fonction de leur largeur et de la position entre elles ($d=5$ cm)	53
Fig. IV. 9: $\hat{U}_{ACmax} = f(l_b)$ d'un système pointe - pointe avec barrières sous atmosphère polluée	54
Fig. IV. 10: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe – pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 10 cm	55
Fig. IV. 11: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 15 cm	56
Fig. IV. 12: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe – pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 20 cm	56
Fig. IV. 13: $\hat{U}_d = f(d)$ pour un système pointe – pointe protégé par une barrière polluée de même largeur ($l_b = 20$ cm) et à épaisseur différente (6 mm ou 10 mm)	57
Fig. IV. 14: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 30 cm	58
Fig. IV. 15: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe – pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 40 cm	58
Fig. IV. 16: Evolution de la décharge dans le cas d'un système pointe – pointe isolé par une barrière isolante fortement polluée	60
Fig. IV. 17: $\hat{U}_d = f(d, l_b)$ d'une barrière diélectrique de 10 cm sous atmosphère polluée	61
Fig. IV. 18: $\hat{U}_d = f(d, l_b)$ d'une barrière diélectrique de 40 cm sous atmosphère polluée	62

Introduction générale

Introduction générale

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

Suivant des conditions atmosphériques données, la disruption de l'air dépend largement de la forme des électrodes et du genre de la tension appliquée.

Dans la pratique, la majorité des configurations rencontrées peut être caractérisée, à partir d'une certaine distance interélectrodes, par des géométries à champs non uniforme pointe - pointe ou pointe - plan.

Les matériaux isolants solides sont fréquemment utilisés dans les intervalles d'air à cause du renforcement de la rigidité diélectrique. En l'occurrence, l'un des moyens utilisés pour réduire les distances d'isolement et l'encombrement d'une part, et augmenter la tension d'autre part, est l'insertion de barrières isolantes dans l'intervalle interélectrode.

L'introduction d'une barrière isolante modifie considérablement la tension disruptive aussi bien en milieu gazeux que liquide. En particulier, la barrière améliore la rigidité diélectrique, le champ électrique subit une déformation engendrant une nette augmentation de la tension disruptive du système.

En électrotechnique, les principales applications des barrières concernent l'utilisation d'écrans isolants entre les contacts des disjoncteurs à gaz, les interrupteurs de HT, les bornes de traversées, les isolateurs, les transformateurs et les actionneurs.

Dans la technique de haute tension, on utilise souvent l'air pour parvenir à une isolation entre électrodes. Ces dernières 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 sont très diverses.

L'effet des barrières propres et sèches dans les intervalles d'air pointe - plan ou pointe - pointe a fait l'objet de plusieurs investigations. L'amélioration de la rigidité diélectrique des systèmes à champ électrique non uniforme protégé par une barrière sous atmosphère propre a été bien prouvée par plusieurs chercheurs. Par contre l'effet du degré de pollution de la barrière sur sa performance électrique lorsque celle-ci est insérée surtout dans l'intervalle d'air variable d'un système pointe - pointe n'a pas suscité beaucoup d'intérêt chez des chercheurs.

Notre travail est une contribution à l'étude de la modélisation de la disruption d'un intervalle d'air pointe - pointe avec barrière sous une atmosphère fortement polluée et tension alternative. Pour ces raisons, notre présent mémoire se voit structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre traite un bref historique sur la synthèse des travaux de recherches sur la performance électrique des barrières sous conditions de pollution très sévères. Nous évoquons au deuxième chapitre les différentes propriétés électriques et les divers types d'isolations des barrières utilisées jusqu'à présent dans l'industrie électrique.

Le phénomène de pollution, sa caractérisation, sa simulation au laboratoire, ses effets néfastes sur l'équipement électrique ainsi que les diverses méthodes de lutte contre celle-ci sont décrits respectivement dans le troisième chapitre.

Au quatrième chapitre, nous exposons le protocole expérimental où sont présentés les divers dispositifs et méthodes de mesures adoptés dans notre étude. Les divers résultats obtenus et leurs interprétations sont présentés. Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I

Synthèse des travaux de recherches sur la performance des barrières

I. 1 Introduction

L'introduction d'une barrière est influencée par plusieurs paramètres de la variation de la tension disruptive d'un intervalle d'air. Les paramètres essentiels concernant la configuration interélectrodes sont (la longueur de l'intervalle d'air, le nombre et la position des barrières utilisées) et les paramètres concernant la barrière elle-même (son matériau, sa forme, ses dimensions...etc.)

Plusieurs investigations ont été menées pour l'étude de la modélisation des barrières isolantes dans un intervalle d'air sous une tension alternative. Nous présenterons par ordre chronologique certaines d'entre elles suivant les noms des chercheurs et l'époque.

I. 2 Investigations antérieures de recherches sur la performance des barrières**- C. P. Steinmetz, 1920 [1]**

L'auteur remarqua que pour les intervalles relativement petits (inférieurs à 30 cm), l'insertion d'une barrière augmente la rigidité diélectrique.

- E. Marx, 1930

Marx montra que la présence d'une barrière isolante modifie la répartition du champ électrique, et provoque une amélioration notable quand l'écran est placé près de la pointe positive. Quand à la pointe négative, la présence de l'écran est pratiquement sans effet [2]. Sous des impulsions de choc, l'augmentation de la tension disruptive a été prélevée à une position de 60 % de la longueur d'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 [3].

- H. Roser, 1930 - 32

Il a été le premier qui 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 [4].

Il a expliqué aussi que l'augmentation de la tension disruptive est surtout due à l'uniformisation du champ électrique entre la barrière et le plan. 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 [5].

- N. F. Wolochtchenko, 1947 [6]

Wolochtchenko a vérifié les résultats de Marx et Roser pour différents systèmes d'électrodes avec différentes sortes de barrières. D'après les essais effectués avec un condensateur cylindrique et un système pointe-plan, il a remarqué que la variation de la distribution du champ est liée aux charges d'espace et aux charges superficielles sur la barrière. A l'aide d'une sonde diélectrique, il vérifia que le champ électrique entre la barrière et le plan (système pointe - plan) devient uniforme et que le champ sur la barrière diminue lorsque la largeur de cette dernière augmente. Pour des intervalles d'air de 8 à 12 cm, Wolochtchenko n'a obtenu une bonne amélioration de la tenue diélectrique de l'air que pour les systèmes d'électrodes à champ non uniforme. Entre deux électrodes pattes ou cylindriques, la barrière provoque une très faible amélioration, si non une diminution de la tension disruptive car l'ionisation autour de la barrière est facile dans ces cas. Pour l'arrangement pointe-barrière-plan, l'auteur affirme que la rupture a lieu en différentes étapes: il y a d'abord la rupture de l'intervalle pointe - plan, ensuite celle de l'intervalle barrière - plan qui apparaît en même temps que la rupture totale.

- J. Pilling, 1968 - 69 [7]

Pilling a étudié l'influence des écrans isolants sur la tenue diélectrique à 50 Hz des intervalles d'air pointe-plan et pointe-pointe allant jusqu'à 20 cm. La tension de rupture totale des intervalles avec barrière est la somme des tensions de rupture partielles des intervalles d'air des deux côtés de la barrière et de la chute de tension sur la barrière. Pour la configuration pointe - plan, Pilling a mesuré la tension d'amorçage des décharges préliminaires (streamers) à la pointe à l'aide d'une sonde isolée insérée au plan. Le champ électrique à la tête des streamers a une intensité trouvée de l'ordre de 4.1 kV/cm.

La constante diélectrique et l'épaisseur de la barrière influencent la distribution des porteurs de charges positives et la chute de tension sur la surface de la barrière isolante. Quand la constante diélectrique et l'épaisseur augmentent, la ramification des streamers s'élargit de plus en plus et le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme. Quand la barrière est placée au milieu de l'intervalle d'air, la rupture a lieu indépendamment de la forme des électrodes pour une tension égale à : $U_d = d.10kV/cm$ (d distance entre électrodes en cm). Ce résultat peut être pris en considération en ce qui concerne l'utilisation pratique des barrières.

- M. Awad, 1975 - 77 [8]

Awad a étudié le comportement des barrières polluées dans des intervalles d'air pointe-pointe et pointe-plan de longueur inférieure à 12 cm. Les tensions utilisées étaient à fréquence industrielle 50 Hz et de chocs de manœuvres $(230/3000) \mu s$. Les couches polluantes furent caractérisées par leurs conductivités superficielles. Quand la surface polluée est en face de la pointe HT, la tension disruptive diminue lorsque la conductivité superficielle augmente et tend vers une valeur constante pour une conductivité supérieure ou égale à $3 \mu S$. La diminution de la tension est attribuée à l'uniformité de la distribution de charges sur la barrière quand la conductivité superficielle augmente et à l'augmentation de la capacité de l'intervalle barrière - plan. Selon la largeur de la barrière, les décharges préliminaires partant de la pointe peuvent soit se prolonger par des décharges superficielles facilitant la rupture à partir des bords de la barrière, soit facilement contourner la barrière quand sa largeur est relativement petite par rapport au diamètre de l'électrode plate (système pointe-plan). Quand la surface polluée est en face de l'électrode mise à la terre, les décharges préliminaires partant de la pointe HT rencontrent une surface isolante à grande résistivité superficielle, se prolongent généralement en décharges glissantes et la tension disruptive n'est pas diminuée.

- A. Boubakeur, 1979 [9]

A. Boubakeur a travaillé sur les intervalles d'air pointe-plan de 40 à 200 cm, en tension de choc de foudre et de manœuvre positive 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 environs de 20 % de la distance pointe plan. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de décharge disruptive.

Il 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. 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. 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 10 mm.

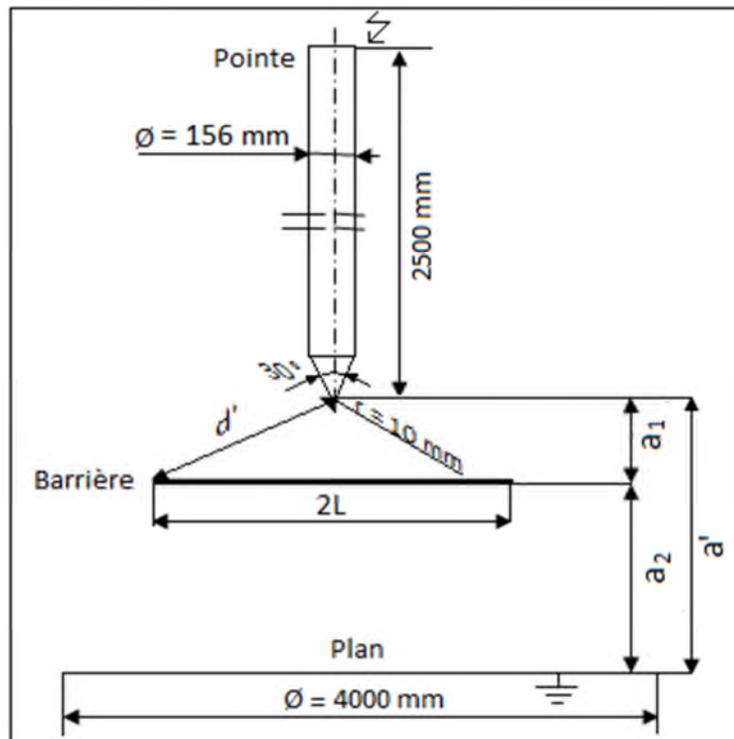


Fig. I. 1: Arrangement «pointe - barrière - plan»

- A. Beroual, 1991 [10]

L'auteur a étudié l'influence des barrières propres et polluées sur la tension de claquage pointe - plan, c'est-à-dire des intervalles d'air de 30 à 200 cm sous le choc de foudre et demanceuvre. Les conditions de l'existence des décharges électriques autour de la barrière, située à côté de l'électrode pointe, particulièrement autour de 20 % de l'espace d'air, conduit à une augmentation significatrice de la tension de claquage d'air. Cette augmentation est spécialement due au prolongement du canal de la décharge.

Une barrière polluée sur sa surface à une conductivité supérieure à $1,6 \mu\text{S}$ est équivalente à une barrière métallique.

Un modèle d'estimation de la position optimale de la barrière, simplifié, le quel est basé sur la densité de charge déposée sur les deux faces de la barrière a été présenté.

- **F.V. Topalis, 1991 [11]**

Le travail de cet auteur se rapporte au comportement de petits et moyens d'intervalles d'air de tige - tige et tige - plan avec une barrière isolante, sous la tension de foudre. La barrière est une feuille de papier, utilisée pour l'isolation de l'enroulement de transformateur, avec différentes épaisseurs. Sa position par rapport à l'électrode haute tension est variée de 0 à 50 %. La forme de l'extrémité de la tige et son diamètre ont été variés.

La conclusion résultant de sa recherche expérimentale montre une augmentation de la tension de claquage avec la distance interélectrode. Cependant, lorsque l'épaisseur de la barrière augmente, la position de la barrière correspondant à la tension maximale disruptive de l'espace d'air tige - tige ou tige - plan est décalée du centre vers l'électrode HT. Cette conclusion est conforme à celle obtenue par J. Pilling [7].

- **S. M. Lebedev et Co, 2001 [12]**

Les études expérimentales effectuées par S. M. Lebedev et Co, se rapportent à l'influence de la polarisation préliminaire des barrières minces d'éthylène sur la tension de claquage de l'intervalle d'air de la configuration d'aiguille - plan sous tension AC (**Fig. I. 2**). Celle-ci joue un rôle considérable sur la défaillance de l'isolation. Il a été montré que la polarisation non homogène d'un intervalle d'air avec barrière est due au fort changement de la permittivité et/ou conductivité de la surface de la barrière diélectrique.

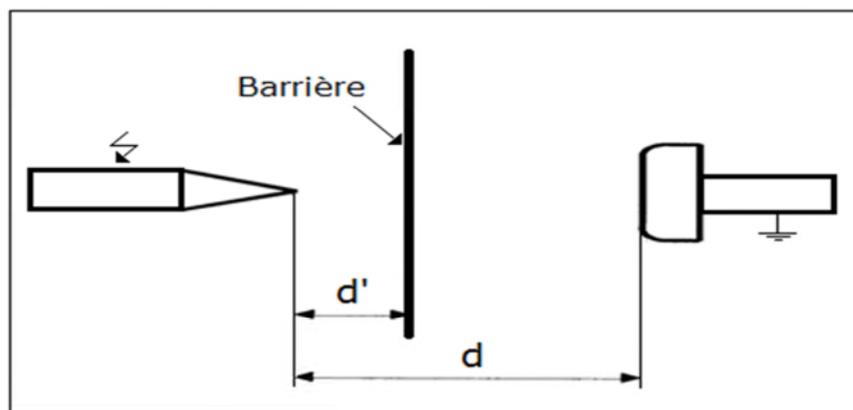


Fig. I. 2: Schéma de principe d'un intervalle d'air avec une barrière

d: distance entre les deux électrodes de base; d': distance entre la barrière et la pointe sous tension.

- R. Boudissa, 2009 [13]

L'auteur a pris un système pointe-barrière-plan (axe vertical de la configuration) pour analyser l'effet de degré de pollution de l'écran isolant sur la tenue électrique d'un intervalle d'air de taille égale à 5 cm et mis sous tension continue positive.

Les résultats importants obtenus sont résumés comme suit:

- L'insertion d'une barrière isolante propre et sèche dans un système à champ non uniforme joue un rôle d'obstacle électrique provoquant ainsi l'allongement de la décharge disruptive et par conséquent l'amélioration de la tenue électrique de celui-ci lorsque le couple de valeurs de ses caractéristiques (I_b , a/d) est judicieusement déterminé ;
- Le taux d'augmentation de la rigidité diélectrique d'un système avec écran propre par rapport à celui sans écran est de 196 % pour une position relative (a/d) de l'écran égale à 20 % et une largeur $I_b = 25$ cm;
- Pour une même barrière polluée et humidifiée, le taux d'augmentation obtenu est de 20 % pour un degré de sévérité de pollution très faible de la barrière isolante contaminée ($\sigma_s = 5 \mu S$). De ce fait le contrôle de la pollution des barrières en tension continue devient impératif afin d'assurer un meilleur isolement du système.

- H. Madi, 2010 [14]

Les travaux de recherche effectués par H. Madi et Co, concerne l'étude de l'effet du mode de distribution et de la sévérité du degré pollution d'une barrière isolante sur la tension disruptive d'un intervalle d'air d'un système pointe - écran - plan mis sous tension alternative. Les essais ont été réalisés sur des barrières propres en verre puis contaminées selon des modes de distribution de pollution uniforme et non uniforme. Lors de cette étude, une comparaison de la performance entre une barrière propre et polluée a été effectuée. Il en résulte qu'une barrière isolante contribue fortement à l'amélioration de la tenue électrique du système d'électrodes à champ non uniforme lorsqu'elle est propre et sèche, mais à un degré très défavorable lorsqu'elle est polluée uniformément et humidifiée. Dans ce dernier cas l'écran se comporte pratiquement comme une barrière métallique humidifiée.

Les figures **I. 3** et **I. 4** réalisées par H. Madi représentent l'allure de la tension disruptive du système avec barrière polluée en fonction du diamètre du plan mis à la terre, de la longueur de l'intervalle d'air entre les deux électrodes de base et du niveau de pollution de la barrière de largeur égale à 40 cm. Il en ressort une diminution de la rigidité du système avec l'élévation

du degré de pollution de la barrière ($\sigma_s = 3 \text{ à } 50 \mu\text{S}$) pour enfin se rapprocher pratiquement de celle du système, acquise avec une barrière métallique humidifiée (ou pulvérisée), quelle que soient la distance interélectrode et le diamètre du plan à la terre. Ceci elle amène à conclure qu'une barrière isolante en verre fortement et uniformément polluée se comporte pratiquement comme une barrière conductrice humidifiée et ou pulvérisée.

Il est à remarquer que la courbe donnant la tension de disruption de l'intervalle d'air de son système (pointe - plan) avec une barrière de largeur égale à 40 cm, déterminée selon le modèle de Awad conformément à la formule (I), est proche de celles trouvées expérimentalement. L'écart maximal entre ces courbes théorique et expérimentale est de 17 %. Ce grand écart peut être justifié par le fait que l'équation établie par cet auteur est basée sur une décharge de type streamer alors que dans le cas de barrières isolantes polluées, la décharge évoluant dans l'espace d'air u système est de type leader.

$$\hat{U}_d = E_{st} \left(\frac{d}{2} - \frac{e}{2} \right) + E_d \eta_G \eta_s \left(\frac{d}{2} - \frac{e}{2} \right) = (E_{st} + E_d \eta_G \eta_s) \left(\frac{d}{2} - \frac{e}{2} \right) \quad (\text{I})$$

Avec :

\hat{U}_d : tension crête de disruption de l'intervalle pointe - barrière - plan (kV);

E_{st} : Champ électrique dans les streamers (en Alternatif, $E_{st} \approx 5 \text{ kV/cm}$);

E_d : Rigidité diélectrique de l'air, fonction de la distance interélectrode (27 à 30 kV/cm);

d : distance dans l'air entre les électrodes pointe - plan (cm);

e : Epaisseur de la barrière (cm), dans notre cas $e = 0,6 \text{ cm}$;

η_G : Degré d'homogénéité du champ électrique entre la barrière et le plan à la terre ;

η_s : facteur prenant en considération l'influence des gouttes d'eau de la barrière sur le champ ; électrique régnant entre l'écran et le plan ($\eta_s = 0,8$).

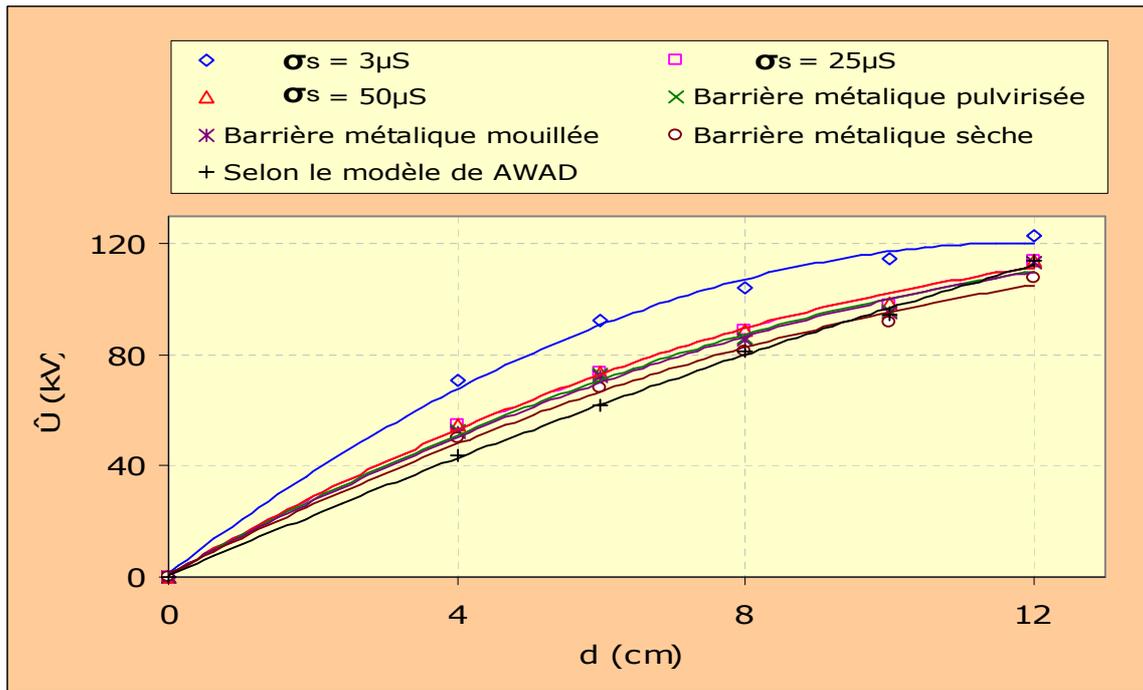


Fig. I. 3: $\hat{U}_c = f(d)$ avec $D_{pa} = 15$ cm et σ_s variable

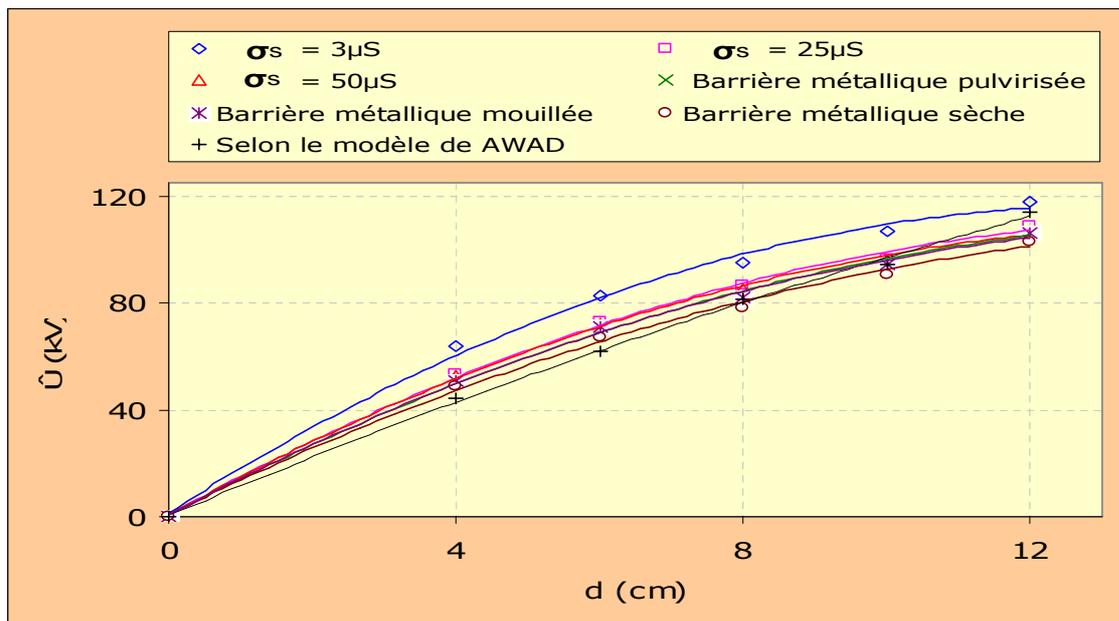
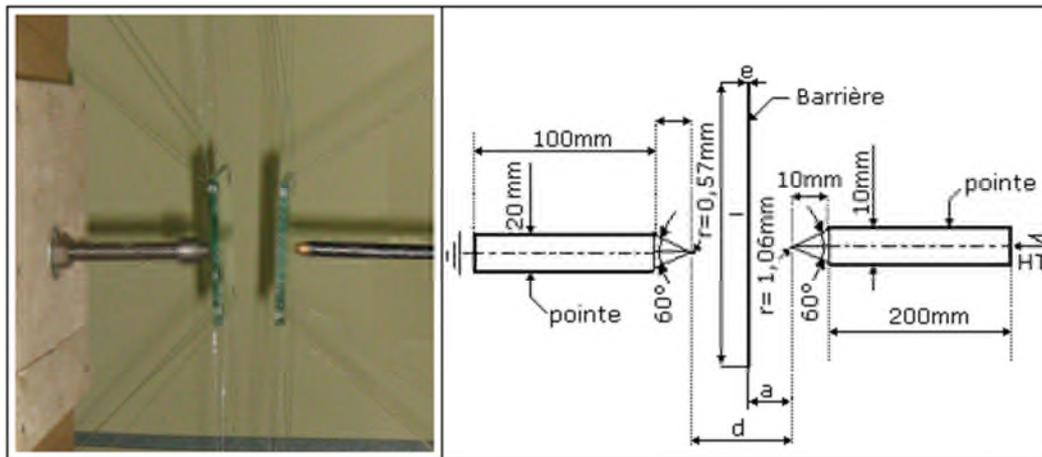


Fig. I. 4: $\hat{U}_c = f(d)$ avec $D_{pa} = 5$ cm et σ_s variable

- T. Belhoul, 2010 [15]

Les investigations réalisées par T. Belhoul et Co, consistent en l'analyse de l'effet du nombre d'écrans pollués sur l'amorçage de l'espace d'air d'un système pointe-pointe sous tension alternative 50 Hz (Fig. I. 5).



a) Photo du modèle

b) Caractéristiques du modèle

Fig. I. 5: Photo et caractéristiques du modèle expérimental

Les essais ont été effectués sur des écrans propres et secs puis pollués. Lors de cette investigation, l'influence des paramètres importants tels que la position, la largeur, le nombre d'écrans, le mode de répartition et le degré de pollution des écrans sur la performance du système a été mise en évidence. Une comparaison de l'efficacité des écrans lorsque ceux-ci sont propres et /ou contaminés a été établie. Les résultats émanant de cette analyse montrent que le système à deux écrans propres est pratiquement deux fois plus efficace qu'avec un seul sans pollution. Par contre lorsque les écrans sont fortement et uniformément pollués, l'efficacité du système est environ la même que celle obtenue dans le cas d'un seul écran dans les mêmes conditions.

- L. Slimanou, 2010 [16]

Les travaux expérimentaux effectués par L. Slimanou et Co, se rapportent à l'influence sur la tenue électrique de l'épaisseur d'un écran isolant sous atmosphère propre et/ou contaminée et mis sous tension alternative lorsqu'il est inséré dans un intervalle d'air des systèmes pointe-pointe et pointe-plan. Les essais ont été réalisés avec des barrières propres en verre. Puis contaminées selon des modes de distribution de pollution uniforme et non uniforme. Lors de cette expérience, les paramètres géométriques de la barrière, telles que sa position, sa largeur et son épaisseur ainsi que sa conductivité superficielle, ont été prises en considération. Il en résulte que la barrière isolante propre de large épaisseur contribue très bien au perfectionnement de la tenue du système d'électrode à champ non uniforme dans lequel elle est introduite.

- H. Mekbel, 2010 [17]

L'étude a été réalisée sur un système pointe - barrière-plan (axe vertical de la configuration) sous tension continue positive. Comme paramètres essentiels d'influence de la tension disruptive d'un intervalle d'air du système à champ électrique non uniforme, ont été pris en considération, la position, l'état de la surface et l'isolement de l'écran. Les résultats émanant de cette étude peuvent être résumés de la façon suivante :

- La valeur maximale de la rigidité du système est obtenue quand la barrière .de largeur égale à 25 cm, est en contact avec la pointe sous tension $(a/d) = 0\%$;
- La décharge évoluant dans l'espace d'air du système à écran propre et sec est de type streamers positifs quels que soient l'isolement et la position de la barrière. par contre si l'écran est pollué, la décharge est de type leader quelle que soit la conductivité volumique de la solution polluante, supérieure à 5 ms/cm ;
- La tension de rupture d'un système avec barrière isolante augmente avec la distance d'isolement dans l'air de celle-ci par rapport à la terre pour devenir constante à partir d'une certaine hauteur limite. De plus elle croît avec l'élévation de la résistance insérée entre le bord d'un écran conducteur et la terre ;
- La rigidité diélectrique du système avec barrière polluée décroît rapidement avec l'élévation de la conductivité volumique pour devenir minimale et constante à partir d'une certaine valeur limite de celle-ci ;
- Pour une conductivité volumique supérieure à 20 ms/cm, l'efficacité d'un écran uniformément pollué est à sa valeur minimale. Elle est confondue avec celle d'une barrière métallique isolée et pulvérisée à l'eau de robinet.

- S. Iouknane, 2011 [18]

Dans l'étude expérimentale effectuée par S. Iouknane, celle-ci s'est intéressée à l'effet de l'isolement de la barrière par rapport à la paroi de base du dispositif contenant celle-ci sur la tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système pointe-plan mis sous tension alternative. Celle-ci a mené aux résultats essentiels suivants:

- En absence d'un écran isolant horizontal, la tension disruptive de l'espace d'air d'un système à écran isolant vertical croît avec la hauteur de son isolement par rapport à la terre jusqu'à une valeur limite, au-delà de laquelle, elle demeure constante quelle que soit la taille de la barrière. Cette limite est fonction de la largeur de l'écran considéré ;

- L'insertion d'une barrière isolante horizontale en contact simultanément avec la terre et le bord de l'écran isolant vertical permet la réduction de la taille du dispositif contenant le système à champ non uniforme tout en gardant la même tension de tenue de celui-ci, que celle obtenue lorsque la hauteur d'isolement de l'écran est supérieure à la valeur limite suscitée.

- **R. Boudissa et Co, 2011 [19]**

L'objectif essentiel recherché par R. Boudissa et Co, consiste en l'étude de l'effet de l'état de surface et d'isolement d'un écran isolant sur l'efficacité d'un système à champ non uniforme mis sous tension alternative. Les essais ont été réalisés essentiellement sur des barrières en verre isolées propres et sèches puis contaminées selon des modes de distribution de pollution uniforme et non uniforme.

Il en résulte que:

- En atmosphère propre et sèche, l'optimisation de l'efficacité d'un système est subordonnée à un choix non seulement du mode d'isolement et de la position de l'écran par rapport aux électrodes de base mais aussi du rapport des diamètres de l'écran et de l'électrode mise à la terre. Dans ce cas, la décharge entraînant la disruption de l'espace d'air du système est de type streamers ;
- La diminution de l'efficacité du système à écran pollué et asséché par rapport à celui où la barrière est propre et sèche est au maximum de 14 % ;
- En atmosphère polluée et humide, une efficacité minimale de l'écran est atteinte pour une valeur de sa conductivité superficielle égale au degré de pollution d'un site de classe légère, indépendamment du mode de sa répartition sur celui-ci. Dans ce cas de figure, l'écran se comporte pratiquement comme une barrière conductrice et l'amorçage de l'intervalle d'air du système est engendré par une décharge de type leader. Si un niveau d'isolement exigé pour ledit système doit être maintenu, des mesures de dépollution de l'écran deviennent alors impératives ;
- L'efficacité d'un système à écran en verre est environ neuf fois plus élevée quand celui-ci est isolé que lorsqu'il est mis directement à la terre. De plus, l'utilisation d'une paroi de base du système en tant que deuxième écran isolant et isolé de la terre contribue fortement à l'élévation de son efficacité.

- S. Mouhoubi et Co, 2011 [20]

Les travaux de recherche effectués par S. Mouhoubi et Co, se rapportent à l'Influence d'un écran isolant sur la rigidité diélectrique et le champ électrique d'un intervalle d'air pointe-plan sous tension alternative. Les interfaces diélectriques peuvent avoir un significatif effet sur les exécutions isolantes des appareillages de HT. Ils ont réalisé des expériences avec les barrières propres, polluées et en métal. Ils sont également considéré l'influence de la pollution sur les paramètres suivants: conductivité, barrière partiellement et pollution complètement polluée, humide et sèche.

Les résultats obtenus sont résumés comment suit:

- La position optimale de la barrière dans l'intervalle d'air pointe-plan correspond au cas où la barrière est en contact avec l'électrode pointe. Dans ce cas, le taux d'augmentation par rapport à l'intervalle d'air sans barrière atteint de grandes valeurs, notamment lorsque la largeur de la barrière augmente, ce qui incite à utiliser des barrières diélectriques dans les systèmes d'isolation;
- L'utilisation de barrières d'épaisseurs convenables est nécessaire afin d'éviter la perforation qui peut réduire la tenue du système de moitié;
- La barrière métallique améliore légèrement la tension disruptive. La pollution réduit la tension disruptive, toute fois, elle reste toujours supérieure à celle sans barrière pour des conductivités superficielles inférieures ou égales à $3,86 \mu\text{S}$;
- La barrière, par sa largeur, constitue un obstacle géométrique au développement de la décharge vers le plan;
- Le champ électrique au plan diminue lorsqu'on rapproche la barrière de la pointe. Ce résultat confirme l'hypothèse de la réduction du champ électrique lors de l'introduction d'une barrière isolante dans un système pointe - plan, notamment pour la position $a/d = 0 \%$;
- La pollution appliquée à la surface supérieure de la barrière entraîne une augmentation du champ électrique au plan, quelle que soit la position de la barrière;
- Les résultats obtenus concernant le champ électrique concordent parfaitement avec ceux de la tension disruptive.

- S. Slimani, 2012 [21]

Le but visé à travers les investigations réalisées par S. Slimani, se rapportent à l'évolution de la tenue électrique des systèmes pointe-pointe et pointe - plan en fonction du nombre d'écrans y insérés, leur isolement et leur état de surface sous tension continue. Les résultats

issus de cette analyse montrent qu'en atmosphère propre et sèche, l'isolement à deux écrans des systèmes pointe-pointe et pointe-plan est respectivement de 50 % et 19 % plus élevé qu'avec un seul. Au-delà de cette valeur, aucune amélioration supplémentaire de leur tenue n'est décelée. Pour une conductivité faible de la solution polluante, recouvrant uniformément les deux écrans du système pointe-pointe, la valeur de sa tenue minimale se trouve réduite de plus de 50 % par rapport à celle acquise sous atmosphère propre, comme si ces écrans isolants pollués étaient devenus des barrières conductrices. L'isolement des deux barrières par un écran isolant solide, mis en contact entre elles et une paroi du système conductrice et mise à la terre, conduit économiquement à une réduction énorme de la taille du dispositif d'insertion et techniquement, sa tension de tenue électrique optimale reste la même que celle obtenue lors de leur isolement au moyen d'une couche d'air de cette même taille.

- **F. Mauseth, 2012 [22]**

F. Mauseth a étudié l'initiation et propagation du streamer dans l'intervalle d'air du système tige - plan avec sans barrière sous AC. Les résultats obtenus montrent que le streamer prend naissance au niveau de la pointe et se propage en direction de la barrière. A partir du centre de la barrière celui-ci propage dans toutes les directions sur la surface de l'isolation. Ce résultat est comparé à ceux de simulation basés sur le calcul du champ au niveau de l'électrode terre. Ceux-ci sont en concordance avec ceux établis par l'expérimentation.

- **S. Mansouri, 2012 [23]**

L'objectif recherché à travers l'expérimentation menée par S. Mansouri, consiste en la quantification de l'efficacité d'un système à champ non uniforme avec barrière en silicone revêtue de gouttes d'eau et mise sous tension alternative (**Fig. I. 6**).

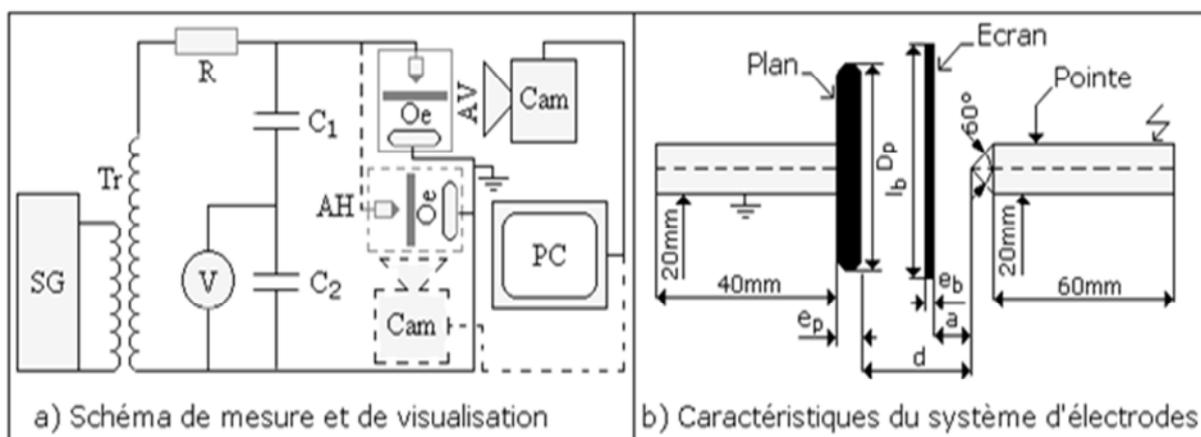


Fig. I. 6: Schéma de mesure et de visualisation

Cette quantification s'est traduite par la caractérisation des paramètres d'influence, à savoir, la position de l'écran par rapport à l'électrode sous tension, l'état de surface de la barrière, propre et sèche ou recouverte de gouttes d'eau, le nombre de surfaces pulvérisées, la conductivité de l'eau utilisée et l'orientation de l'écran et l'axe des électrodes de base sur la tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système de base pointe-plan. Les résultats d'une telle étude sont résumés comme suit:

- La rigidité du système avec barrière diminue en fonction de la position de l'écran par rapport à l'électrode sous tension, quelles que soient la nature de l'isolation utilisée et ses orientations par rapport à l'axe du système de base;
- Sous atmosphère propre et sèche, la performance de l'isolation en silicone est meilleure que celle des deux autres;
- La rigidité diélectrique du système est peu influencée par l'orientation de la barrière propre et du dispositif, quelle que soit l'isolation de la barrière employée;
- Une perte partielle d'hydrophobie est constatée au bout de quatre essais indépendamment de la conductivité volumique des gouttes d'eau recouvrant l'écran en silicone. Le retour de celle-ci à son état initial est établi après une pause d'une heure;
- Que l'écran soit vertical ou en position horizontale au dessus de l'électrode sous haute tension, le système d'insertion de l'écran en silicone recouvert de gouttes d'eau est plus rigide que celui à écran en verre hydrophile et/ou l'arrangement à barrière conductrice.

- **R. Boudissa, 2013 [24]**

L'objectif recherché à travers l'expérimentation menée par R. Boudissa, consiste en l'étude comparative de la performance des barrières en silicone et en verre sous tension alternative. L'influence de l'état de l'atmosphère, le degré de pollution, le nombre de faces polluées des barrières ainsi que leur orientation sur la fiabilité de leur protection a été quantifiée. Enfin cette investigation a été appuyée par une visualisation du phénomène de décharge électrique évoluant dans l'espace d'air entre les électrodes de base dans tous les cas. Les résultats trouvés par cet auteur militent bien pour l'emploi de l'isolation en silicone comme barrière dans les intervalles d'air à champ non uniforme quel que soit l'état de l'atmosphère régnant sur site de son utilisation.

- **M. H. Ramesh et Co, 2013 [25]**

L'étude expérimentale réalisée par M. H. Ramesh et Co, est basée sur le critère d'initiation et de propagation du streamer dans un intervalle d'air sphère - sphère avec barrière isolante sous tension alternative. Selon les auteurs une position optimale de la barrière correspondant à une tension disruptive maximale de l'espace d'air du système considéré a été décelée. Un modèle basé sur le calcul du champ électrique dû aux charges d'espace formées sur la barrière a été utilisé. Les résultats émanant de la mesure de la tension de disruption de l'intervalle d'air à position variable de la barrière ont été confrontés à ceux obtenus par le calcul du champ sur la surface de la barrière engendrant la rupture de l'intervalle d'air suscitée.

L'utilisation du critère du streamer est subordonnée à la prise en considération de la charge piégée sur la barrière pour une éventuelle quantification de son effet.



Fig. I.7: Tension disruptive de l'intervalle d'air sphère-sphère avec barrière isolante

- **F. Guerbas et Co, 2013 [26]**

Les travaux de recherche effectués par F. Guerbas et Co, concernent l'influence de la position et de l'épaisseur d'une barrière insérée dans un intervalle d'huile de transformateur à champ électrique non uniforme sous tension alternative sur la capacitance d'un système d'électrodes pointe-plan. Il en résulte que l'insertion d'une barrière engendre une élévation de la capacité du système par la diminution de l'impédance de celui-ci. Une corrélation entre la charge d'espace créée et la rigidité diélectrique du système a été établie.

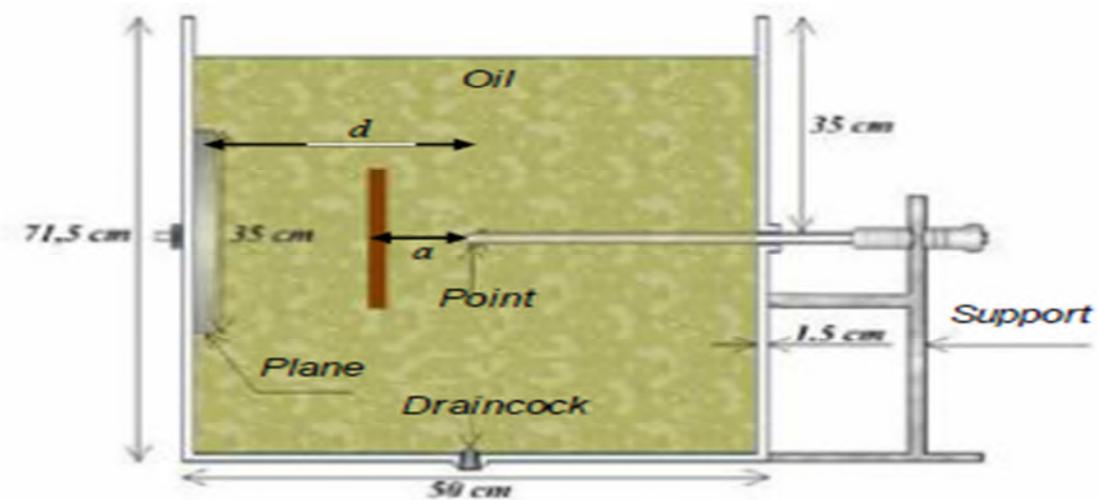


Fig. I. 8: Schéma de la cellule d'essais

I. 3 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, d'un ordre de grandeur de 2 à 3 fois plus élevée, 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 interélectrode.

L'évolution de la décharge peut être directe ou par étapes selon la position de la barrière dans l'intervalle d'air pointe - plan ou pointe - pointe. En effet, la décharge directe est obtenue lorsqu'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.

On constate aussi que la synthèse des travaux réalisés par plusieurs chercheurs sur la performance des barrières de perfection des intervalles d'air à champ électrique non uniforme sous tension alternative, nous a permis la mise en évidence des paramètres affectant essentiellement la performance électrique de celle-ci.

Chapitre II

Diélectriques et décharges

électriques

II. 1 Introduction

Il existe une grande variété d'isolants solides, liquides, et gazeux. En plus des isolants naturels, on trouve sur le marché de nombreux isolants synthétiques qui ont été développés pour différentes applications. L'étude des matériaux diélectriques est née du besoin pratique d'isolants, avec l'apparition du courant électrique et pour satisfaire aux demandes pratiques sans cesse croissantes, il fallait étudier les propriétés électriques essentielles et effectuer une synthèse sur ces divers types d'isolations utilisées comme barrière de protection et mettre en évidence le rôle joué par celle-ci dans le milieu de son insertion.

Par la suite, on ne se préoccupera que des propriétés électriques des matériaux isolants, en faisant remarquer toutefois que les propriétés physiques vont parfois à l'encontre l'une de l'autre sur le plan de l'utilisation pratique, ce qui peut présenter de graves inconvénients. Par exemple, une mauvaise isolation électrique correspond en général à une mauvaise isolation thermique ce qui pose des problèmes d'échauffement du matériel isolant.

II. 2 Définitions

II. 2. 1 Isolant [27]

Un isolant est une substance ou un corps dont la conductivité est nulle ou, en pratique, très faible. On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$.

II. 2. 2 Diélectrique [27]

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. Le milieu matériel peut être constitué par un solide, un liquide ou un gaz.

II. 3 Propriétés diélectriques des isolants [28 - 30]

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 matériaux déterminée, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau au cours de son service (Température, fréquence, ...).

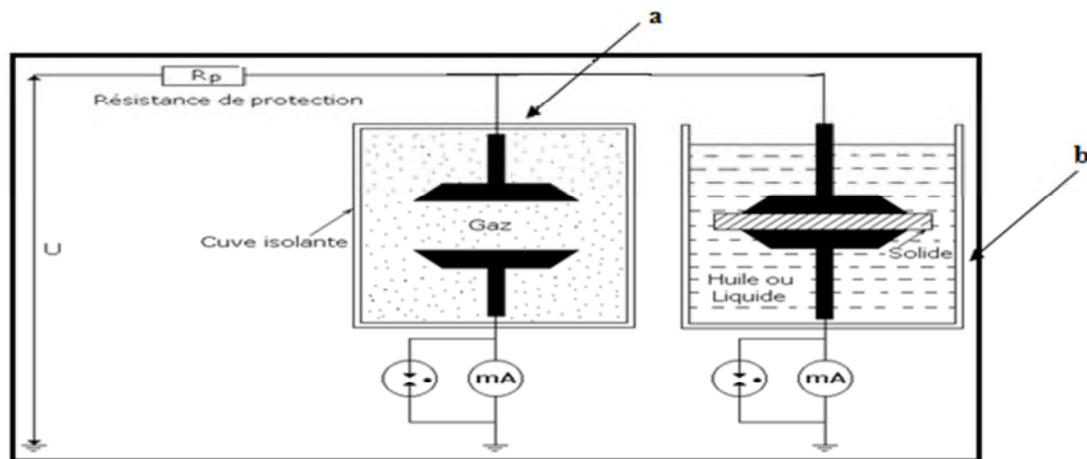
Dans certains cas ces dernières caractéristiques peuvent être les éléments déterminants du choix d'un isolant destiné à une certaine fonction.

II. 3. 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 laquelle 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 longitudinale, obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant ;
- La rigidité diélectrique transversale est calculée d'après la mesure de la tension électrique minimale produisant, pour une vitesse de la montée en tension donnée, la rupture de rigidité diélectrique de l'isolant se trouvant entre les électrodes, selon sa plus faible épaisseur égale à d illustré par la (Fig. II. 1) $E_d = \hat{U}_d / d$ (V/m), avec \hat{U}_d : tension de crête et d : la distance inter électrode.



a) Cellule de mesure de E_d des isolants gazeux

b) Cellule de mesure de E_d des isolants solides et liquides

Fig. II. 1: Cellules de mesure de rigidité diélectrique des isolants

II. 3. 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. II. 2**). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

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: $\epsilon_r = C_x / C_0$ **(II. 1)**

La permittivité absolue ϵ_a est le produit de la permittivité relative par la constant électrique du vide: $\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ **(II. 2)**

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

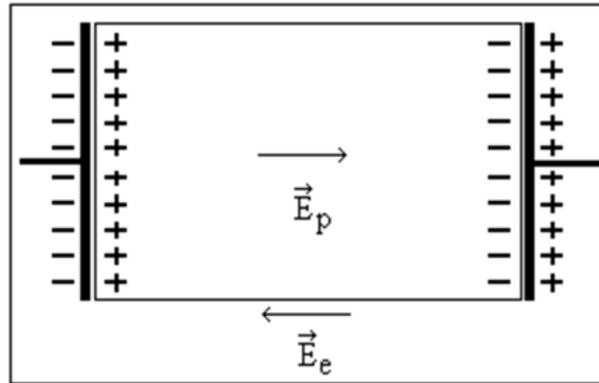


Fig. II. 2: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

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: $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ **(II. 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: $\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0$ **(II. 4)**

II. 3. 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. II. 3 et 4**).

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:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_r = U_a / U_r = P_a / P_r \tag{II. 5}$$

D'après la formule (II. 3) on peut écrire: $\operatorname{tg} \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$ (II. 6)

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

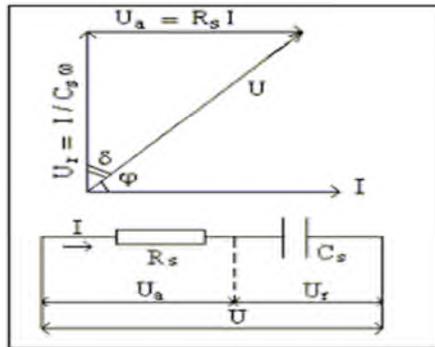


Fig. II. 3: Circuit électrique équivalent série

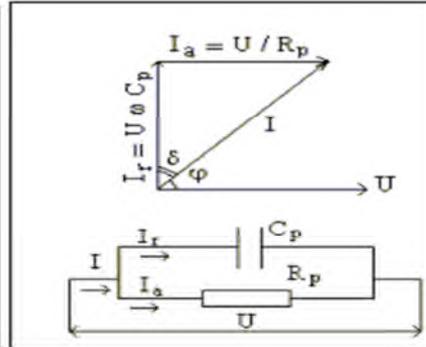
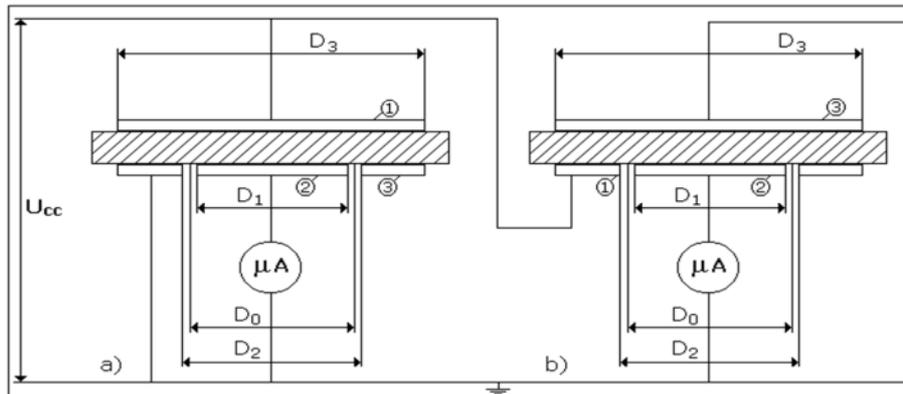


Fig. II. 4: Circuit électrique équivalent parallèle

II. 3. 4 Résistivité et résistance d'isolement

II. 3. 4. 1 Résistance en tension continue



a) Mesure de la résistivité transversale **b)** Mesure de la résistivité superficielle

Fig. II. 5: Schéma de mesure des résistivités transversale ρ_{tcc} et superficielle ρ_{scc}

1: Electrode sous tension, 2: Electrode à la terre, 3: Anneau de garde

$$\rho_{tcc} = S_t R_V / d$$

Avec $S_t : \pi D_0^2 / 4;$

$$D_0 = (D_1 + D_2) / 2$$

R_V : Résistance de volume

$$\rho_{scc} = P R_S / f$$

$P : \pi D_0$ (Périmètre moyen)

$$f = (D_2 - D_1) / 2$$

R_S : Résistance superficielle

ρ_{tcc} : la résistivité transversale mesurée en courant continue.

ρ_{scc} : la résistivité superficielle mesurée en courant continue.

II. 3. 4. 2 Résistance d'isolement

La résistance d'isolement entre deux électrodes qui sont en contact avec un isolant est le rapport de la tension continue appliquée aux électrodes au courant global qui les traverse à un moment après l'application de cette tension. Ce rapport dépend à la fois des résistances transversale et superficielle de l'isolant.

II. 4 Différents matériaux isolants

D'après leur état physique, les isolants électriques sont classés en trois grandes catégories: les isolants solides, liquides et gazeux. Selon leur origine on en distingue deux types, les isolants naturels et les isolants synthétiques. Le premier type concerne les isolants minéraux et certains isolants organiques naturels, le second type concerne les matières plastiques et les composites.

II. 4. 1 Isolants gazeux [31, 32]

Dans les conditions normales, un des meilleurs isolants connus est l'air qui nous entoure. Ses caractéristiques thermiques sont supérieures à celles des porcelaines; il peut aussi agir comme agent de refroidissement et ne coûte absolument rien. Cependant, à des températures élevées, l'air devient bon conducteur par suite du phénomène d'ionisation.

Ces isolants gazeux ayant des propriétés particulières:

- Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz ;
- Permittivité faible, les gaz sont auto-générateurs ;
- Phénomène d'ionisation des gaz ;
- Légers et inflammables.

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

II. 4. 2 Isolants liquides [33]

Les liquides diélectriques sont souvent utilisés en association avec des solides (transformateurs, condensateurs câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont sources de décharges partielles. Les liquides sont utilisés pour:

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

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

II. 4. 3 Isolants solides [32]

Lors d'une réaction chimique, dite de polymérisation, certaines molécules simples peuvent s'unir de façon à former une grosse molécule contenant plusieurs fois la molécule initiale. On dit alors que la nouvelle substance ainsi formée est un polymère de la première molécule. Tous les isolants synthétiques sont des polymères. Le caoutchouc naturel, les résines, les vernis et la bakélite sont des polymères. Selon leur composition et leurs parties constituantes, les polymères peuvent être subdivisés en grandes classes comme les polyvinyles, les polyuréthanes, les polyesters, les polyamides, les polyimides etc. Ainsi, le nylon est un polyamide, le Dacron et le Mylar sont des polyesters et le Kapton est un polyimide.

Dans ce qui suit, nous présentons plus particulièrement le verre, ce type d'isolants étant utilisé dans notre travail comme barrières isolantes.

II. 5 Verre [32]

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 constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2) et de fondants (**Fig. II. 6**).

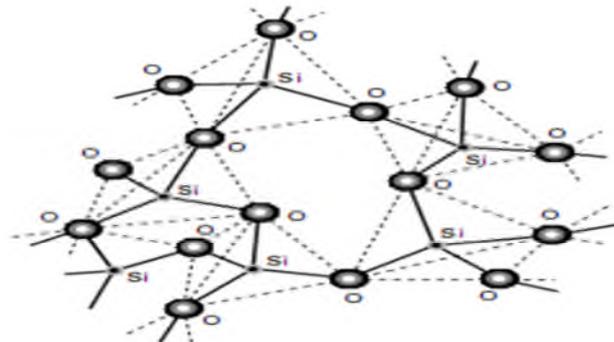


Fig. II. 6: Représentation schématique de la structure du verre de silice [34]

Les isolateurs en verre, un peu moins chers, mais plus fragiles que ceux en porcelaine.

- 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: $10^{10} \dots 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$.

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

II. 5. 1 Verres trempés [35]

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 déféctuosité de l'isolateur.

II. 5. 2 Verres recuits [35]

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, borosilicates et les polyamides

II. 5. 3 Fibres de verre [36]

Elles sont destinées au renforcement mécanique de pièces en résine directement au contact d'éléments conducteurs comme par exemple dans les isolateurs en matériaux composites de lignes ou de postes de transformation.

- L'épaisseur du verre utilisé dans notre étude est de 6 mm Pour une tension d'alimentation du pont de Schering $U = 100 \text{ V}$, ses caractéristiques sont comme suit:
 - Sa capacité est de l'ordre de 26,52 Pf ;
 - Sa permittivité relative du verre utilisé est: $\epsilon_r = 8,16$;
 - Son facteur de dissipation (ou de pertes) est: $\text{tg } \delta = 4,354.10^{-2}$.

Le tableau **II. 1** résume les caractéristiques électriques importantes des divers diélectriques passifs les plus utilisés comme barrières isolantes.

Tab. II. 1: Propriétés des matériaux isolants

Propriétés électriques des matériaux isolants					
Isolants	Temperature d'opération	rigidité diélectrique	Résistances à la rupture	Résistivité	Constante Diélectrique ϵ_r
	°C	kV/mm ²	N/mm ²	$\Omega \cdot m$	/
Verre Sable de silice + chaux + soude	180	25 à 45	/	10^{10} à 10^{17}	6
Papier Cellulose agglomérée et imprégnée	80	60 à 80	70 à 120	10^{10} à 10^{10}	6
Mica Feuilles minces à l'état naturel	200	100 à 200	/	10^{13}	6 à 7
Bakélite Résine phénolique + farine de bois	150 à 170	10 à 20	3 à 5	10^{10} à 10^{12}	5 à 9
Polyester Résine alkyles	120	13 à 22	4,5	10^{13}	2,5 à 4
Silicone Carbone remplacé par du silicium	180	300	40 à 80	10^{14} à 10^{15}	2,5

PVC Polychlorure de vinyle	60	35	4	10^{12}	5
Polystyrène	80	25	5	10^{15}	2,5
Plexiglas	80	15	7	10^{15}	4
Nylon- rilsan Polyamides	100 à 150	14	6	10^{11}	5
Téflon Fluoréthène	250	18	3	10^{17}	2
caoutchouc	70	14	4	10^{10}	7
Air sec	/	3	/	10^{14}	1
SF ₆ hexaflu- orure de soufre	/	7,5	/	/	1

II. 6 Décharge dans l'intervalle d'air protégé par une barrière isolante

L'étude des décharges électriques présente de l'intérêt d'un point de vue industriel pour les problèmes liés à l'isolement et à la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (ligne à haute tension, transformateurs, générateurs...) ainsi plusieurs études et ouvrages se sont intéressés à leur compréhension.

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 de l'état isolant à l'état conducteur de l'air, ne se produit pas de façon instantané mais avec un retard qui dépend essentiellement de la valeur de la distribution et de l'évolution temporelle du champ électrique ainsi que d'autres facteurs qui sont liés à l'environnement où elle se produit.

Dans un intervalle d'air à champ non uniforme avec barrière isolante sous atmosphère propre et sèche, la décharge de disruption de l'espace d'air dans lequel la barrière est insérée et mise sous contrainte de tension alternative, est de type streamers positifs quels que soient l'isolement et la position de la barrière. Par contre lorsque la barrière est sous atmosphère contaminée, la décharge créée sous tension alternative est de type leader quelle que soit la conductivité volumique de la barrière supérieure à 5 mS/cm.

II. 6. 1 Décharge de type streamers [37]

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.

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 (d.p) inférieur à 200 cm. Torr. Au-delà, l'expérimentation montre qu'il se produit des phénomènes peu compatibles avec le mécanisme d'avalanche de Townsend:

- 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 ;

- 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 (d.p) est grand, plus petite 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 x, Reuther a établi un critère simple basé sur le fait que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer.

La formation d'un streamer s'explique par des mécanismes de photo ionisation (Modèle de Meek) se produisant à l'intérieur de l'avalanche primaire. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des molécules neutres 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.

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 1000 cm/ μ s.

II. 6. 2 Décharges de type leader [37]

La tenue diélectrique des grands intervalles d'air diminue avec la distance inter électrode. Si le champ électrique moyen à l'amorçage est encore de 4,5 kV/cm pour 30 cm. 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 inter électrode dépasse une valeur comprise entre 40 et 80 cm selon les conditions expérimentales.

Lorsque les streamers qui participent à l'apparition de l'effet couronne sont suffisamment développés, le gaz contenu 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 et de proche en proche, ce canal s'allonge jusqu'à traverser complètement l'intervalle inter électrode. C'est par un mécanisme analogue que se développe un coup de foudre.

II. 7 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses [37]

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).

II. 7. 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.

II. 7. 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 inter électrode 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 ($E_{S+} = 7,5$ kV/cm), les streamers se multiplient et peuvent se propager jusqu'à contact du plan mis à la terre (**Fig. II .7**). A ce moment-là, du fait de la contribution de l'électrode à la terre phénomène.

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.

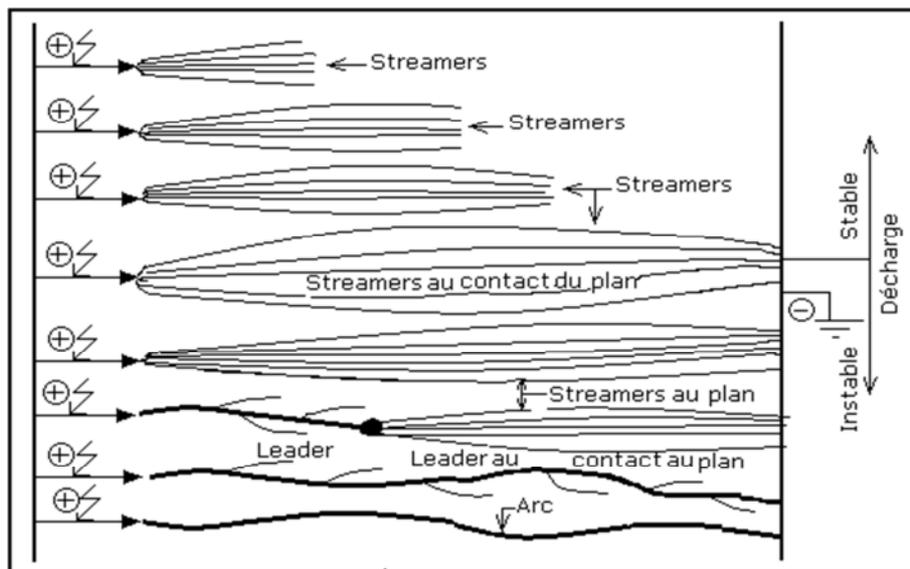


Fig. II. 7: Décharge par Streamers ($d \leq 1m$)

II. 7. 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 (**Fig. II. 8**). 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.

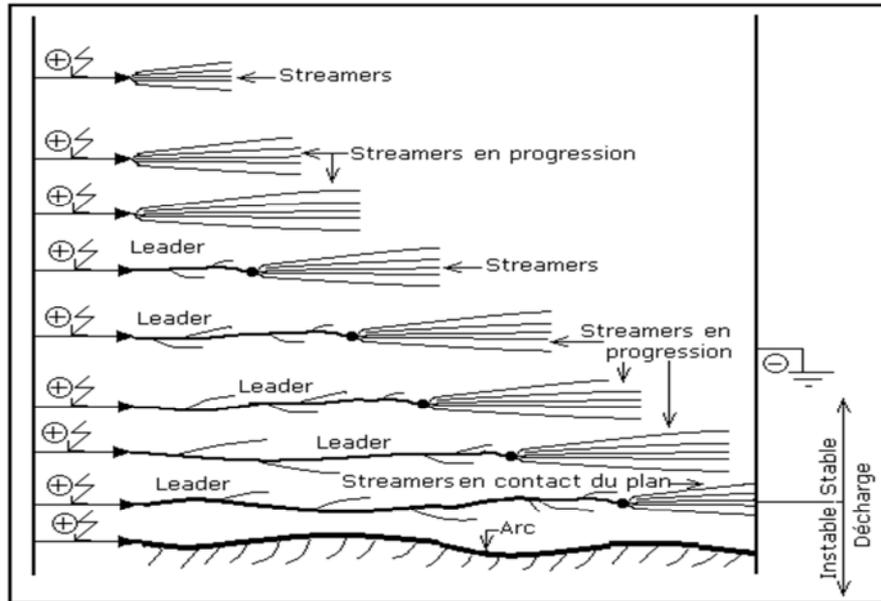


Fig. II. 8: Décharge par leader

II. 8 Conclusion

Dans le matériel électrique destiné à fonctionner sous haute et moyenne tension, 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.). L'étude des caractéristiques des matériaux isolants et leurs utilisation dans l'industrie, nous a permis de constater que:

- Un matériau isolant ne peut être caractérisé que par sa rigidité, sa permittivité diélectrique, son facteur de perte et sa résistance d'isolement (transversale et longitudinale) en tension continue et alternative;
- Un matériau isolant ne peut être considéré comme un bon isolant que lorsque celui-ci possède une permittivité faible, des pertes électriques les plus faibles, une rigidité diélectrique très élevée et un niveau de décharges partielles très bas.

Chapitre III

Phénomène de pollution en haute tension

III. 1 Introduction

Dans le domaine d'électrotechnique, la pollution constitue un sérieux problème dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement de l'appareillage haut tension. En effet, les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de tenue des barrières isolantes. Ils peuvent dans les cas les plus critiques, conduire à un contournement total, ce qui constitue la situation la plus grave, car conduisant à la mise hors service de l'appareillage. La connaissance du degré de pollution est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés, en vue de dimensionner convenablement l'isolation. L'amorçage d'une surface isolante polluée dépend de paramètres différents de ceux de l'amorçage d'un intervalle d'air et pour représenter les conditions naturelles qui provoquent l'amorçage sous pollution, plusieurs techniques d'essais ont dû être mises en œuvre.

Vu les performances électriques des matériaux isolants solides, l'effet de claquage est quasiment nul, mais le contournement, est loin d'être évité, il est essentiellement causé par une surtension et principalement par une couche conductrice imposée par la pollution environnante.

III. 2 Définitions [38]

III. 2. 1 Pollution

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il détient, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature.

III. 2. 2 Salinité (Sa)

La salinité est définie comme la concentration du sel dans l'eau. Elle correspond à la masse de sel divisée par le volume de la solution, généralement exprimée en kg/m^3 .

III. 2. 3 Couche de pollution

C'est une couche conductrice électrolytique appliquée sur la surface d'une isolation. Elle est composée du sel et des matériaux inertes.

III. 2. 4 Degré de pollution

Valeur de la quantité (salinité, conductivité de la couche, densité du dépôt de sel) qui caractérise la pollution artificielle appliquée sur une isolation en essai.

III. 2. 5 Conductance superficielle [39]

La conductance superficielle est le rapport du courant qui traverse une surface isolante à la tension appliquée. Par exemple, la conductivité superficielle d'une isolation peut être également obtenue en multipliant la conductance superficielle par le facteur de forme de celle-ci.

III. 2. 6 Contrainte de contournement [39]

La contrainte de contournement d'une surface isolante est la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolation solide.

On détermine soit la contrainte de contournement minimale, soit la relation entre celle-ci et la fréquence de contournement. La mesure de la contrainte de contournement d'une surface isolante donne toutes les informations nécessaires sur le calcul de la longueur de celle-ci, qui donnera une fiabilité raisonnable, où un taux de défauts acceptable.

III. 3 Différents types de polluants [39]

Les polluants de l'air (ou polluants atmosphériques) peuvent être d'origine naturelle ou provenir des activités humaines (industries, transports). Ils sont présents en quantité extrêmement faible.

III. 3. 1 Polluants naturels

Les polluants d'origine naturelle sont principalement le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂). Ils sont dus aux éruptions volcaniques, aux décompositions de matières organiques (animaux et végétaux morts) et aux feux de forêts.

Des particules en suspension dans l'air (aérosols) peuvent également provenir des éruptions des volcans ou des déserts et être transportées sur de très grandes distances. C'est par exemple le cas des poussières de sable du désert du Sahara (en Afrique), qui sont transportées par les vents jusqu'en Europe. Ces polluants naturels sont peu dangereux car ils ne restent pas très longtemps dans l'atmosphère.

III. 3. 2 Polluants dus aux activités humaines

Les principaux polluants que les hommes rejettent dans l'atmosphère sont:

Le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃) et des particules en suspension. Ces polluants proviennent de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), des industries (usines métallurgiques et sidérurgiques, incinérateurs de déchets, raffineries de pétrole, etc.) et des transports routiers.

Cette pollution a commencé avec l'ère industrielle, au 19^{ème} siècle, elle est présente surtout en zones urbaines et entraîne de graves problèmes de santé chez les êtres humains, la pollution est plus forte les jours où la température est élevée (forte chaleur) et lorsqu'il n'y a pas de vent.

III. 4 Sources de pollution

La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées sur les isolations de lignes électriques peuvent être regroupées selon leur origine et classées comme suit :

III. 4. 1 Pollution naturelle

Cette pollution peut être marine, désertique ou autre, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les vents.

a- Pollution marine

Dans les installations en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux même, ou par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolation [40].

b- Pollution désertique

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sables déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs une couche de pollution contenant des sels.

Une fois humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolation [41].

c- Autre type de Pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolation. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement; c'est le contournement sous pluie [42].

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage, favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolations, est contrarié par le phénomène de ruissellement.

III. 4. 2 Pollution industrielle

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité de raffineries, de cimenteries, de complexes sidérurgiques ou même aux abords des centrales thermiques. Pour les régions exemptes des fumées, cette pollution peut être d'origine domestique (appareils de chauffage polluants, véhicules automobiles, ...) ou agricole (engrais). Les isolations se recouvrent des poussières faiblement conductrices, mais hygroscopique (absorbe l'humidité).

A la présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des surfaces isolantes et le contournement peut parfois survenir [42].

III. 4. 3 Pollution domestique

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées, comme exemple les pollutions marine et industrielle lorsque les installations électriques sont situées en bord de mer.

III. 5 Facteurs climatiques d'influence de la pollution

Parmi les facteurs météorologiques essentiels d'influence des dépôts polluants et par conséquent de la tenue électrique des isolations on distingue:

a- Vent

Le vent joue un double rôle. Il assure d'une part le transport et la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces isolantes, d'autre part il peut se comporter comme agent d'auto nettoyage lorsque sa vitesse est élevée [43]

b- Pluie

Les fortes pluies permettent en général le nettoyage des surfaces isolantes polluées, ce pendant, les fines pluies peuvent les mouiller, ce qui augmente le risque de leur contournement [44, 45].

c- Humidité

L'humidification est considérée comme un obstacle car elle influe négativement sur la tenue électrique des isolations puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés à leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue [44].

d- Température

Contrairement à l'humidité, l'élévation de la température favorise l'assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité et par conséquent la tenue des isolations contaminées devient plus important. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution [44].

III. 6 Répartition de pollution sur les barrières isolantes

Deux différents modes de distribution de pollution sur la surface d'une barrière isolante, à savoir les répartitions uniforme et non uniforme de dépôts polluants (Fig. III. 1), ont été définis dans la littérature [15]:

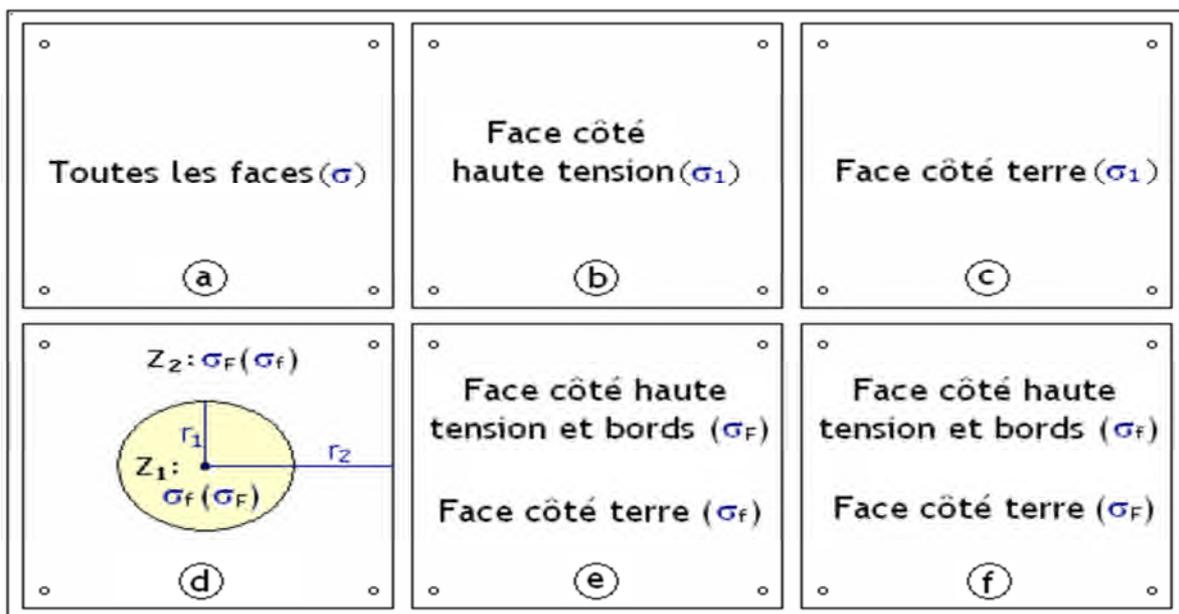


Fig. III. 1: Variantes d'uniformité et de non uniformité de distribution de pollution sur une barrière isolante [15]

- 1) La barrière est dite uniformément polluée, lorsqu'un dépôt polluant de conductivité électrique quelconque est appliqué de manière uniforme sur toutes les six faces de celle-ci selon la variante 1a (**Fig. III. 1a**);
- 2) Pour ce qui est de la distribution de pollution non uniforme sur la barrière, plusieurs variantes ont été proposées:
 - Dans la variante 1b, la surface de la barrière en face de l'électrode sous haute tension est polluée, les autres sont maintenues propres et sèches;
 - La variante 1c est caractérisée par le fait que la surface de l'écran en face de l'électrode mise à la terre est polluée, les autres sont gardées propres et sèches;
 - Dans la variante 1d, la surface de la barrière en face de la haute tension est subdivisée en deux zones circulaires variables et différemment polluées $z_1 (\sigma_F)$, $z_2 (\sigma_F)$ ou l'inverse, les autres faces sont maintenues propres et sèches;
 - La variante 1e est caractérisée par le fait que la surface vis-à-vis de la haute tension et les bords sont fortement pollués ($\sigma_F = 14 \mu S$), celle en face de la terre faiblement polluée de conductivité plus faible et variable;
 - La variante 1f correspond exactement à l'inverse de la variante 4e.

III. 7 Effet de la pollution sur les équipements électriques

Les irrégularités dans la distribution des dépôts polluants sur la surface des isolateurs conduisent évidemment à une diminution des performances des isolations sous pollution. Ce problème a toujours entraîné et engendre encore des défauts d'isolation au niveau de ces réseaux électriques, il en résulte parfois des défaillances des équipements, des installations des consommateurs d'énergie électrique, une diminution de la fiabilité des réseaux électriques ainsi qu'un manque à gagner pour les exploitants de ces structures électriques.

Des statistiques établies par les exploitants de réseaux électrique algérien ont montré qu'environ 60 % des incidents électriques enregistrés sur ces structures électriques sont dus à l'industrialisation de l'Algérie et à l'inexistante d'information à l'échelle national sur le niveau de pollution des différentes régions traversées par le réseau électrique de la Sonelgaz et le manque de moyens de lutte contre la pollution.

III. 8 Principales méthodes d'évaluation de la sévérité de la pollution d'un site [39]

Le phénomène de contournement des surfaces isolantes polluées constitue un problème majeur pour les installations électriques, qu'on doit éliminer. Pour cela l'évolution de la sévérité de pollution d'un site et le calcul de la probabilité du contournement s'impose, afin

de parvenir à des résultats fiables, chacune des phases de contournement citées précédemment doit être prise en compte.

Les principales méthodes d'évaluation de la sévérité de pollution des sites sont les suivantes:

- Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE) ;
- Conductivité superficielle.

Comme on peut aussi évaluer la sévérité d'un site par la conductivité des dépôts de pollution c'est-à-dire en se référant à la constitution de la couche de poussière (sel soluble et d'acide dilué, etc.). Elle est définie par la conductivité superficielle des couches polluantes mais peut aussi être exprimée en termes de salinité équivalente.

III. 8. 1 Densité de dépôt de sel équivalente (DDSE) [39]

Il s'agit de dépôt équivalent, en milligramme de NaCl /cm² de la surface de l'isolant, dont la conductivité électrique est égale à celle du dépôt réel, dissous dans le même volume d'eau. Pour calcul la DDSE, il faut prélever des échantillons du dépôt polluant présent à la surface des isolants sélectionnés et les dissoudre dans une quantité d'eau donnée. On peut alors déterminer la DDSE en fonction de la conductivité de la solution obtenue, de la surface de l'isolateur, du volume d'eau utilisé et de sa température.

III. 8. 2 Dispositif de mesure de conductivité superficielle à l'aide d'une sonde mobile

Description du dispositif et du procédé de mesure [39]



Fig. III. 2: Dispositif de surveillance de la sévérité de pollution SLM 10 (a: Sonde à électrodes planes, b: Sonde à électrodes linéaires)

La méthode est basée sur la mesure de la conductivité superficielle à l'aide d'un dispositif de surveillance Allemand SLM 10 (sonde mobile). Ce dernier est constitué d'une sonde et d'un appareil de mesure (**Fig. III. 2**).

La sonde est composée essentiellement:

1. de la tête qui est constituée de deux électrodes;
2. du poignet;
3. du câble de liaison entre la sonde et l'appareil de mesure.

Il existe plusieurs types de sondes qui se distinguent par l'humidification de la pollution et la géométrie des électrodes, Il existe par exemple, la sonde à électrodes planes et la sonde à électrodes linéaires.

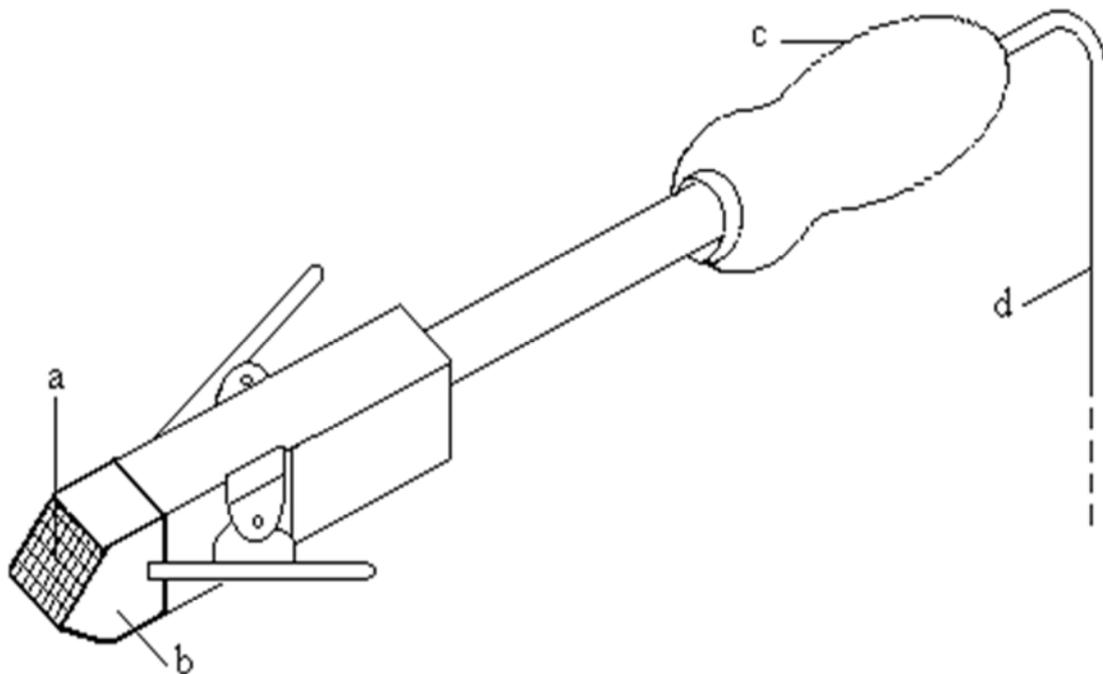


Fig. III. 3: Sonde à électrodes planes avec papier absorbant

- a: papier absorbant, c: poignée de la sonde,
 b: électrodes planes, d: câble de connexion au conductimètre

Dans le cas où on utilise une sonde à électrodes planes (**Fig. III. 3**). Avant d'effectuer les mesures sur une surface polluée de la barrière il faut:

- fixer une bande absorbante (papier PH) de dimensions (a = 10 mm: distance inter-électrode; b = 10 mm: largeur des électrodes) sur la tête de la sonde ;

- avant chaque essai la bande absorbante doit être trempée dans de l'eau distillée dont la conductivité volumique doit être inférieure ou égale à 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le nettoyage et l'humidification de la bande absorbante nécessitent la quantité d'un litre d'eau distillée;
- Après chaque nettoyage la tête de la sonde doit être secouée pour éliminer les gouttelettes d'eau distillée non absorbées par le papier;
- vérifié que la conductivité superficielle propre de la bande absorbante σ_p ne dépasse pas 2 μS ;
- poser légèrement la tête de la sonde sur un endroit choisi au préalable, sur la couche de pollution de la barrière étudiée, de telle sorte que la surface de la bande ($a \times b$) soit en bon contact avec la surface équivalente correspondante de la barrière polluée;
- s'assurer que l'eau absorbée par la bande ne se propage pas au delà de la surface de contact sur la barrière isolante pendant que le dépôt polluant se trouvant en dessous de la surface du papier absorbant se dépose sur celle-ci. L'eau distillée passe de la bande absorbante vers la pollution, de telle sorte que la conductivité équivalente de la couche de pollution, résulte des conductivités de la pollution humidifiée et de la bande polluée.

La conductivité superficielle mesurée est donnée par la relation suivante:

$$\sigma_e = \sigma_r - \sigma_p \quad (\mu\text{S}/\text{cm}) \quad \text{(III. 1)}$$

Où :

σ_r est la conductivité superficielle réelle donnée par la formule (III. 1);

σ_p est la conductivité propre de la bande absorbante ;

III. 9 Classification des niveaux de pollution atmosphérique extérieure [39]

La répartition des différentes classes de sévérité de pollution des sites extérieurs permet d'évaluer l'isolement des lignes de transport ces dernières se répartissent en quatre classes qui sont les suivantes:

III. 9. 1 Pollution légère (première classe) [39]

- Zone sans industrie et avec une faible densité de maisons équipées d'installation de chauffage;
- Zone avec une faible densité d'industries ou de maisons à des vents ou des pluies;
- Toutes les régions agricoles.

Avec une condition que toutes ces régions doivent être situées loin de la mer (10 à 20 km) ou à haute altitude et ne doivent en aucun cas être exposées aux vents de la mer.

III. 9. 2 Pollution moyenne (deuxième classe) [39]

Les régions à pollution moyenne sont:

- Les zones avec industries ne produisant pas de fumée polluante, et celles ayant une densité moyenne de maisons équipées de chauffage;
- Les zones avec forte densité de maisons ou d'industries, mais soumises à des vents fréquents et propres ou à des pluies;
- Les zones exposées au vent de la mer, mais pas trop proches de la côte (distantes d'au moins 1 km).

III. 9. 3 Pollution forte (troisième classe) [39]

- Zone à forte densité d'industries et banlieues, de grandes villes avec forte densité d'appareils de chauffage polluants;
- Zones proches de la mer, ou celles exposées à des vents relativement forts venant de la mer.

III. 9. 4 Pollution très forte (quatrième classe) [39]

- Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais;
- Zones très proches de la côte et exposées à des vents forts polluants venant de la mer.

III. 10 Classification des sévérités de pollution intérieure

Le niveau de pollution des milieux intérieurs d'exploitation des barrières diélectriques est très faible vis-à-vis de celui qui règne en atmosphère extérieure. Les résultats d'estimation de la sévérité du degré de pollution de ce genre de lieux ont montré que dans des conditions climatiques les plus sévères celui-ci peut atteindre la valeur de 10 μ S [46 - 48].

III. 11 Méthodes de simulation de la pollution

Bien que de nombreuses méthodes d'essais aient été imaginées pour simuler avec plus ou moins de précision des conditions naturelles particulières, aucune procédure d'essais ne peut à elle seule reproduire rigoureusement toutes les contraintes naturelles qui peuvent conduire à l'amorçage, même d'un site donné. Dans ce qui suit nous donnerons un aperçu sur de différentes méthodes de simulation.

III. 11. 1 Essais sous pollution naturelle [39]

Cette méthode permet d'analyser la variation de sévérité d'un isolant d'un site choisi, sur une période bien déterminée, en installant dans des sites pollués des stations qui subissent la même pollution que les différentes chaînes d'installations ou colonnes de différentes

dimensions. Les isolants ainsi soumis à une même tension et une même contrainte sont jugés en fonction des temps au contournement, ainsi qu'en se basant sur la conductivité superficielle et le courant de fuite. Le choix final sera les isolants qui ont tenu en faveur de ceux qui ont été contournés durant le temps d'étude. Cette procédure d'essai est la plus normalement adoptée pour des résultats fiables. Il en est de même un inconvénient majeur, vu que dans la nature, la formation d'une couche de pollution se fait sous forme d'accumulation progressive et lente de dépôts. Des années sont donc nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances des isolants essayés sur site. Cet inconvénient fait que les chercheurs se penchent vers des laboratoires en essayant de reproduire des conditions de pollution naturelle, qui sont plus rapides, plus faciles et moins coûteuses.

III. 11. 2 Essais sous pollution artificielle [39]

De nombreuses méthodes sont utilisées dans ce genre d'essais dans le but d'aboutir à des résultats convaincants et significatifs, donc ces différentes méthodes d'essais peuvent être classées en trois catégories:

- La méthode du brouillard propre ou de la couche solide;
- La méthode de la pollution liquide;
- La méthode du brouillard salin.

Mais dans des cas très rares on utilise le sel ordinaire (NaCl) comme étant une matière soluble à la présence d'eau à la surface d'un isolant pour que le liquide électrolytique se forme. Pas contre dans d'autres cas il est utilisé comme matière insoluble déposée à la surface des isolants et joue le rôle de liant.

III. 11. 2. 1 Pollution liquide [39]

Cette méthode est connue sous le nom de méthode méthyle cellulose et s'apparente à la méthode du brouillard propre. Dans ce cas le kaolin peut être remplacé par le méthyle cellulose qui est appliquée à son tour sur la surface de l'isolateur avant l'essai. La pollution n'est pas asséchée avant l'essai et la tension est appliquée après quelques minutes d'égouttage. Dans cette méthode la couche de pollution n'est pas donc humidifiée en cours d'essai, les courants de fuite assèchent la pollution et la probabilité de contournement décroît rapidement.

III. 11. 2. 2 Brouillard salin [39]

Le brouillard salin utilise une solution saline simple qui représente assez bien la pollution marine, qui normalement contient une matière insoluble.

On peut la considérer valable également pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle tels que la cendre de fuel et le ciment (ce genre de couche peut contenir des quantités d'eau relativement importantes).

Dans cette méthode, pour définir la sévérité de la pollution, on fait varier le taux de salinité qui est caractérisé soit par le poids du sel contenu dans un litre d'eau en g/l, soit par la mesure de la résistivité ou la densité de la solution saline. Selon la classification des sites pollués, les valeurs de salinité appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160 kg/m³.

Dans la méthode du brouillard salin la production du brouillard est spécifiée d'une manière suffisamment détaillée pour assurer la reproductibilité des caractéristiques du brouillard, qui est plutôt humide.

Dans cet essai, il est bien de noter qu'il y a certainement, un ruissellement d'eau considérable à partir des ailettes des isolateurs, ce qui explique qu'aucun moyen n'est employé pour recouvrir la surface uniformément ce qui veut dire que cette méthode ne donne pas une conductivité uniforme.

La validité de cette méthode a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières (Btighton-G.B ; Martigne, France -S.Catarina-Italie).

III. 11. 2. 3 Couche solide [39]

Cette couche est composée d'un matériau solide contenant des ingrédients ioniques. La terre diatomée (le kieselguhr) est souvent choisie comme matériau solide et le chlorure de sodium (NaCl) comme ingrédient ionique. Cette couche devient conductrice par humidification à travers un brouillard produit par un générateur de vapeur. Cette technique « kieselguhr-brouillard de vapeur » est en accord avec les spécifications de la CEI 38.

Dans certains cas, la couche solide est composée d'une peinture semi-conductrice, cette dernière simule mieux les dépôts de pollution industrielle, tels que les cendres de carburant. La validité de cette méthode a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières.

La méthode de brouillard salin permet d'obtenir, par rapport aux méthodes de couche solide, une bonne reproductibilité des essais. Elle est d'une grande facilité de mise en œuvre. Cette méthode est la seule qui assure, au cours des essais, un renouvellement de couche.

Tableau. III. 1:Equivalence entre pollution naturelle et méthode de pollution artificielle [49]

Niveau de pollution		Pollution artificielle : sévérité équivalente		
		Brouillard salin Salinité g /l	Couche solide Densité de NaCl équivalente mg/cm ³	Couche liquide Conductivité µS
I	Léger	0 < 7	0,05 à 0,1	5 à 10
II	Moyen	7 à 20	0,1 à 0,2	10 à 15
III	Fort	20 à 50	0,2 à 0,6	15 à 30
IV	Très fort	112 à 225	0,6 à 1,1	0 à 50

III. 12 Techniques de lutte contre la pollution [39]

Vu la sévérité de pollution des sites, la variation de celle-ci à travers le temps et l'extension des zones industrielles et urbaines, font que l'isolement des postes ou des lignes reste toujours insuffisant.

Alors des méthodes de lutte contre ces phénomènes peuvent être envisagées, par exemple le changement des isolateurs ; le coût étant élevé on préfère limiter ou même essayer de réduire le surplus de pollution.

III. 13 Conclusion

La mesure de la sévérité de pollution pour la détermination des niveaux d'isolement pose des problèmes communs à toutes les méthodes décrites dans ce chapitre.

Le problème le plus important est probablement le temps car il faut prendre en considération le temps nécessaire à la formation d'une couche superficielle. La pollution se dépose par suite de phénomènes aérodynamiques tandis qu'elle s'élimine par la pluie et le vent. Ainsi, il y a une évolution continuelle du dépôt et de sa répartition.

Comme les contournements ne peuvent avoir lieu que dans les cas extrêmes, de dépôts et d'humidification, les enquêtes doivent généralement durer plusieurs années afin de recueillir des informations valables pour obtenir une estimation statistique satisfaisante.

La disponibilité des sources de tension et le coût sont aussi des paramètres importants influant sur le choix d'une méthode qui dépend de la situation locale du site.

Les derniers dispositifs de surveillance conçus comportent une option d'humidification artificielle qui permet d'effectuer des mesures sans attendre que l'humidification naturelle survienne. Ce traitement de données en provenance des dispositifs de surveillance est important et il peut être intéressant d'assortir les mesures de pollution des mesures météorologiques.

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier expérimentalement l'effet du nombre et des dimensions de barrières isolantes polluées, sur la tension de disruption de l'intervalle d'air d'un système à champ électrique non uniforme (pointe - pointe) mis sous tension alternative à fréquence industrielle 50 Hz.

Pour un niveau de pollution très fort de la barrière ($\sigma_s \geq 10 \mu\text{S}$), nous comparerons la performance électrique du système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées à largeur variable insérées dans un intervalle d'air dont la taille varie entre 2 et 16 cm.

Cette étude sera appuyée par une visualisation comparative de l'évolution spatiale du phénomène électrique dans l'espace interélectrode du système avec barrières fortement uniformément contaminées.

IV. 2 Dispositif expérimental et techniques de mesure

IV. 2. 1 Circuit de mesure et de visualisation

La mesure de la performance du système avec barrière et la visualisation du phénomène électrique évoluant dans l'espace inter électrode de celui-ci peuvent être réalisées à l'aide du schéma électrique illustré par la figure (Fig. IV. 1).

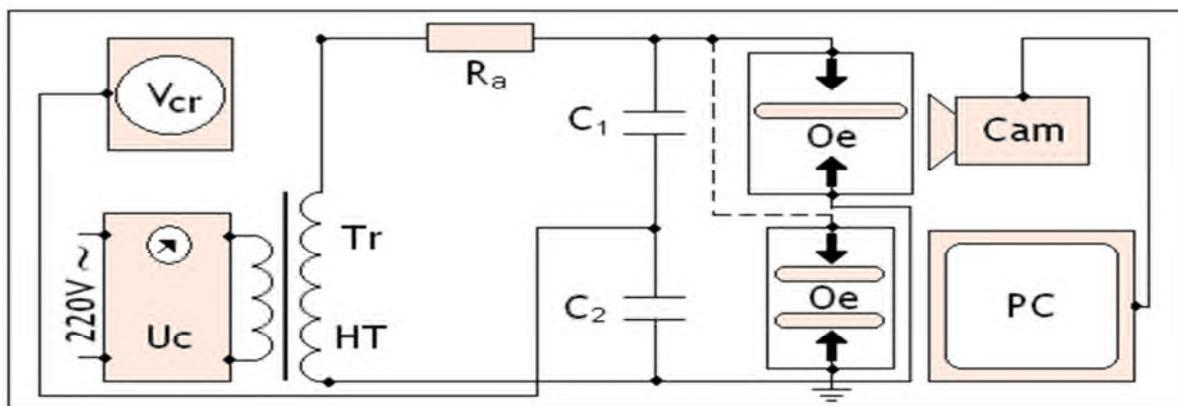


Fig. IV. 1 : Circuit de mesure électrique et de visualisation de la décharge

Le circuit de mesure de la tension de disruption du système considéré est composé d'un transformateur (Tr) qui peut délivrer à son secondaire une tension alternative maximale de 135 kV, dont la variation temporelle de sa rampe peut être obtenue automatiquement à l'aide de l'appareil de commande manuelle ou automatique SG, un voltmètre de crête V_{cr} (DC/AC) à affichage numérique, une résistance de protection R et un diviseur de tension capacitif C_1/C_2 auquel est connecté notre objet d'essai O_e qui n'est tout autre que le système d'électrodes pointe - barrières - pointe. Le circuit de visualisation est constitué d'un Caméscope (Cam)

pour l'enregistrement des différentes phases de la décharge électrique se développant dans l'espace interélectrode du système et d'un PC pour une meilleure observation et une analyse de celle-ci.

IV. 2. 2 Modèle expérimental

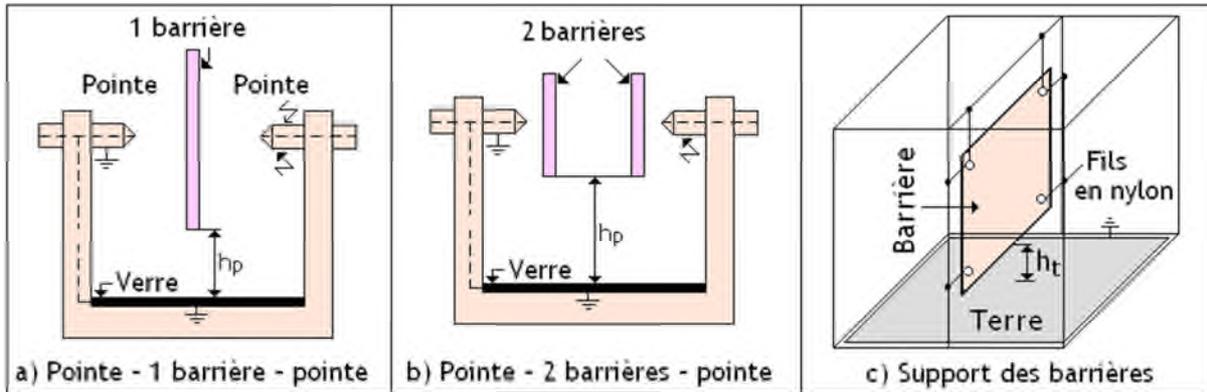


Fig. IV. 2: Modèle expérimental pointe - pointe avec une ou deux barrières

Le modèle expérimental est illustré par la figure **IV. 2**. Celui-ci est composé de deux tiges pointues et d'une ou deux barrières isolantes. Les deux électrodes sont vissées dans deux bras en bois lesquels sont encastrés sur les deux faces opposées d'un support en bois en forme de U ayant 44 cm de hauteur et 33 cm de base (**Fig. IV. 2a**). Chacune des deux électrodes est constituée d'une tige cylindrique en bronze de 20 mm de diamètre et de 150 mm de longueur. Celle-ci est terminée par une pointe conique en bronze ayant un angle de 60° et de 0,73 mm de rayon de courbure. La distance dans l'air entre ces deux électrodes de base varie entre 2 et 16 cm.

Les barrières isolantes utilisées dans notre cas sont en verre, de forme carrée de 6 mm d'épaisseur et de largeur variable (10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm). Une autre barrière en verre de 20 cm de largeur et de 10 mm d'épaisseur a été utilisée pour la mise en évidence de l'effet de son épaisseur sur la performance électrique du système. Sa grandeur est caractérisée par l_b . Une électrode métallique circulaire de 15 cm de diamètre et 1,5 cm d'épaisseur et deux autres de forme carrée de 40 et 50 cm de côté et de 3 mm d'épaisseur ont été utilisées à titre de référence.

La fixation des barrières sur un support en bois cubique de 50 cm de côté et son maintien perpendiculaire aux deux pointes est réalisée au moyen de plusieurs fils en nylon attachés au support (**Fig. IV. 2c**). Les deux supports sont séparables et celui en forme de U peut être

introduit à l'intérieur du cube afin de pouvoir varier aisément et simultanément la distance interélectrode d . Ce dispositif est à 1 m du sol, sur une table en bois métallisée et reliée à la terre. Une paroi isolante solide en verre d'une épaisseur de 1 cm est placée sur la table afin de remplacer la hauteur d'isolement dans l'air nécessaire, tout en gardant la même performance électrique.

IV. 2. 3 Composition de la solution polluante

La solution polluante est composée d'un mélange d'eau distillée ou de robinet, selon la conductivité volumique souhaitée, de 40 g de kaolin par litre d'eau pour l'épaississement de la couche et de chlorure de sodium dont la proportion est déterminée selon la conductivité volumique désirée de la solution (**Fig. IV. 3**). La mesure de la conductivité superficielle de la barrière isolante contaminée est effectuée au moyen du conductimètre à sonde mobile. La conductivité volumique utilisée dans notre étude est égale à 15 mS/cm, qui correspondent à la valeur de conductivité superficielle de 11,5 μ S.



Fig. IV. 3:Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre)

IV. 2. 4 Procédé d'application de la pollution

Un mode de distribution de la pollution sur la surface de la barrière isolante, à savoir la répartition uniforme (tous les côtés), a été utilisé. L'application de la couche de pollution sur la barrière est réalisée à l'aide d'une éponge maintenue toujours propre et sur laquelle est apportée au moyen d'une seringue, une quantité de pollution constante de 2 ml et cela après avoir bien remué celle-ci avant la prise, pour pouvoir évidemment la garder homogène tout au long des essais.

La mise sous tension d'essai du système d'électrodes considéré est effectuée immédiatement après l'application de la pollution de la barrière pour éviter l'assèchement naturel de celle-ci. Avant chaque nouvel essai, la barrière est nettoyée et rincée à l'eau puis séchée à l'aide du papier mouchoir.

IV. 2. 5 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques [50]

La tension de contournement des isolateurs électriques de haute tension est strictement liée aux conditions atmosphériques nominales, dont on trouve la température ambiante, la pression et l'humidité de l'air environnant. La valeur de la tension de contournement ramenée aux conditions normales de température θ_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 ($\theta_0 = 20$ °C, $P_0 = 100$ kPa et $H_0 = 11$ g/m), est donnée par la relation suivante:

$$U = \frac{K_h}{K_d} U_m \quad (\text{IV. 1})$$

Avec:

U_m : tension de contournement mesurée à la température θ , à la pression P et à l'humidité H ;

U : tension de contournement ramenée aux conditions normales de température θ_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 ;

K_d : facteur de correction relatif à la température θ et à la pression P ;

$$K_d = \frac{P}{100} \frac{(273 + 20)}{(273 + \theta)} = \frac{2,93P}{(273 + \theta)} \quad (\text{IV. 2})$$

Avec: P en kPa, et θ en C°

K_h : facteur de correction relatif à l'humidité;

Pour déterminer le facteur de correction K_h , relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative H_r (%) vers l'humidité absolue H (g/m³), est nécessaire, car K_h est donné en fonction de

cette dernière. L'abaque de la figure IV. 4, donne la transformation de l'humidité relative en humidité absolue, en fonction de la température. Pour déduire K_h , la valeur de l'humidité absolue (Fig. IV. 4) est reportée sur l'abaque de la figure IV. 5.

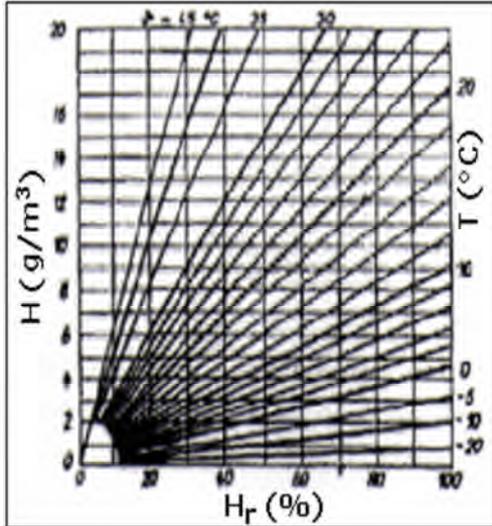


Fig. IV. 4: $H = f(H_r, T)$

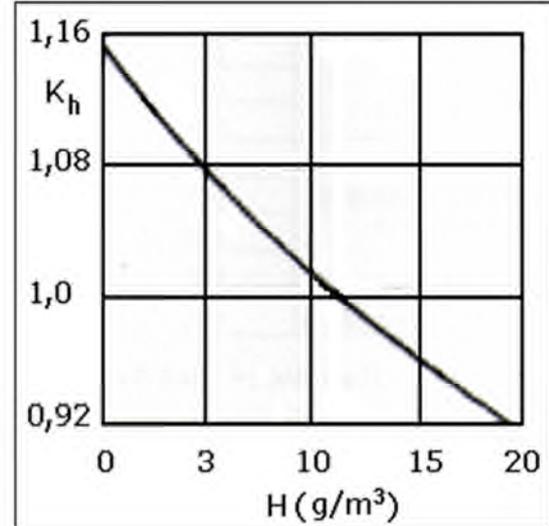


Fig. IV. 5: $K_h = f(H)$

❖ Exemple de calcul

Soient $\theta = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 100,6 \text{ kPa}$, $H = 43 \%$, $l = 10 \text{ cm}$, $a/d = 0 \%$. En utilisant les formules de corrections et les abaques précédentes, on trouve: $K_h/K_d = 0,093$, $U_m = 36,895 \text{ kV}$, $U = 34,46 \text{ kV}$. Les autres résultats trouvés dans nos essais ont été corrigés de la même manière.

IV. 3 Résultats et discussions

IV. 3. 1 Disruption d'un intervalle d'air à champ non uniforme

La tension disruptive d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme est illustrée par la figure IV. 6. Il en résulte que pour une taille donnée de cet espace d'air, la tension de disruption du système pointe - plan croît avec la diminution du diamètre de l'électrode à la terre. Ceci peut être expliqué par le fait qu'avec la réduction de la taille du plan, l'effet du bord de celui-ci rentre en jeu, ce qui entraîne l'attraction de la décharge électrique vers le bord du plan à la terre. Il est souligné que la performance du système pointe - pointe est plus faible que celle de pointe - plan où le diamètre de ce dernier est à sa plus faible valeur ($D_p = 15 \text{ cm}$). Dans ce qui suit, le plan de 15 cm de diamètre sera pris comme référence pour des raisons de la faiblesse de la taille des équipements électriques dans lesquels l'insertion des barrières de protection est nécessaire.

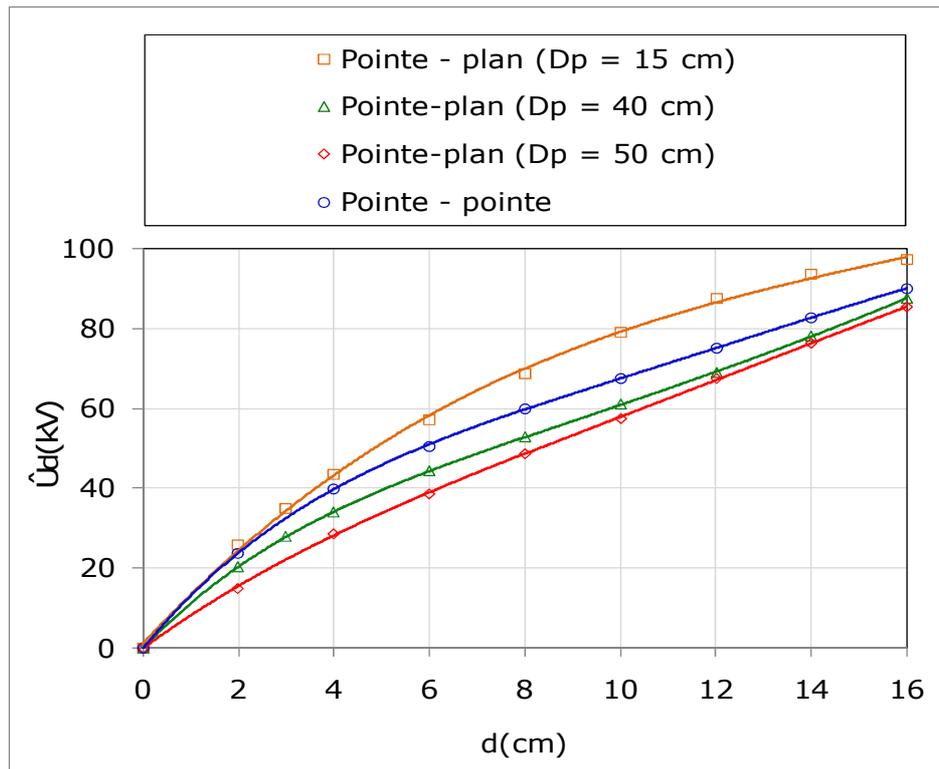


Fig. IV. 6: Tension disruptive en fonction de la distance interélectrode des systèmes pointe - pointe et pointe - plan à diamètre du plan variable

IV. 3. 2 Amorçage d'un intervalle d'air pointe - pointe fixe avec une ou deux barrières

L'efficacité d'un intervalle d'air quelconque a été définie dans la littérature [16] comme étant le rapport des tensions disruptives d'un espace d'air de celui-ci avec et sans barrière. Pour une longueur d'un intervalle d'air pointe - pointe égal à 5 cm, l'allure de l'efficacité d'un système pointe - pointe en fonction de la largeur l_b et la position a/d relative de la barrière propre par rapport à l'électrode sous haute tension est illustrée par la figure IV. 7 [16].

Il est à souligner que le système avec barrière propre est de loin le plus rigide que celui sans celle-ci, quelle que soit la largeur de celle-ci. Il est à remarquer essentiellement que l'efficacité de la barrière dans l'intervalle d'air du système pointe - écran - pointe est maximale soit à l'approche de la barrière de l'électrode haute tension ($a/d = 20\%$) ou de l'électrode terre ($a/d = 80\%$). Il découle aussi de la même figure que l'efficacité du système croît avec l'élévation de la largeur de l'écran isolant.

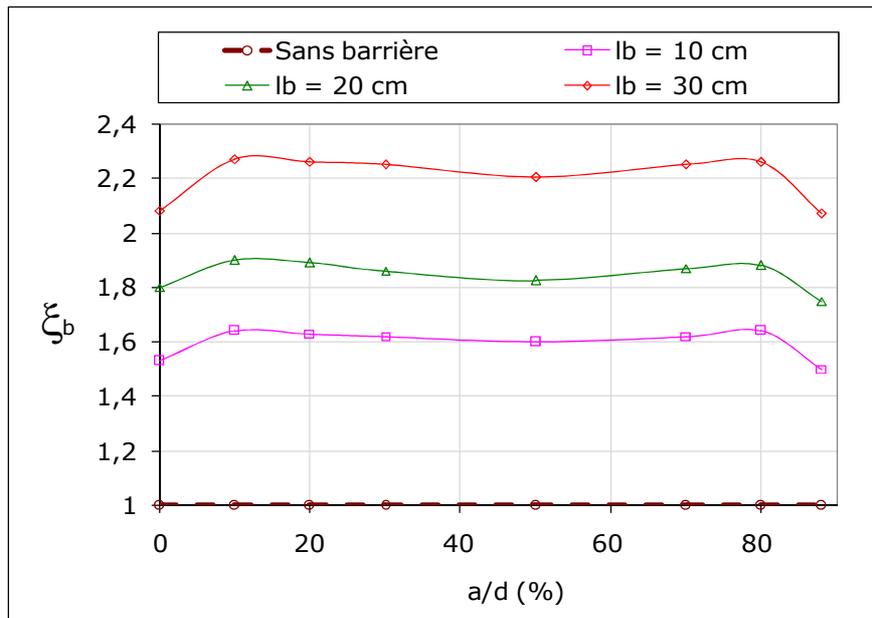


Fig. IV. 7: Efficacité d'un système à barrière propre et sèche en fonction de la position relative et la largeur d'une seule barrière de protection

L'allure de l'efficacité du système avec deux barrières propres de même largeur variable, dont l'une est mise en contact avec la pointe sous tension et l'autre est éloignée de la première d'une distance a_{bb} est illustrée par la figure IV. 8 [16].

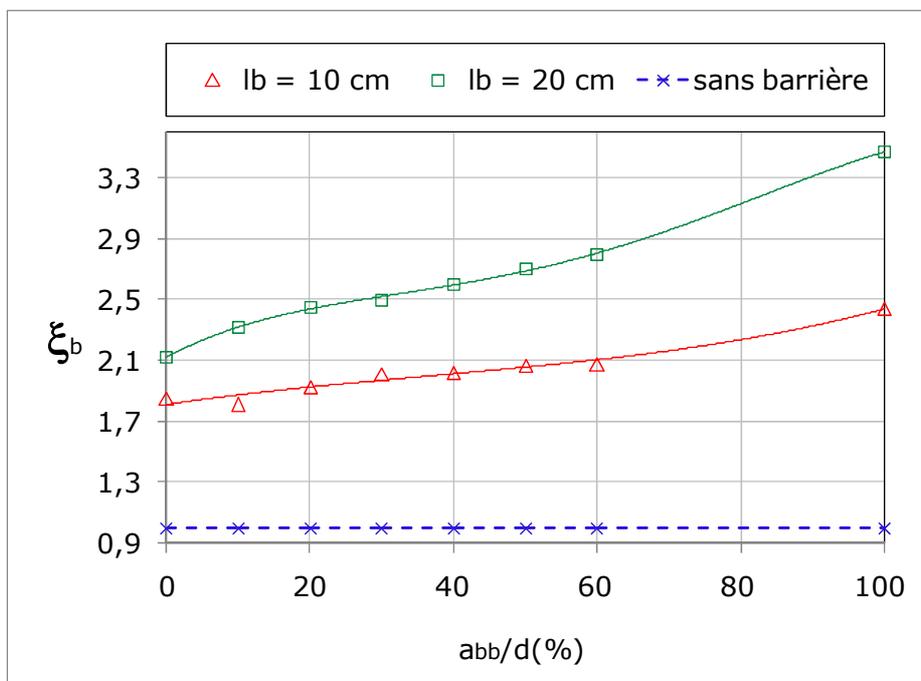


Fig. IV. 8: Efficacité du système à deux barrières propres et sèches dont l'une est en contact avec la pointe sous tension en fonction de leur largeur et de la position entre elles ($d = 5$ cm)

Il en résulte que l'efficacité d'un tel système croît avec la largeur de la barrière. Sa valeur maximale est atteinte lorsque la deuxième barrière est en contact avec l'électrode mise à la terre. Elle est de 2,4 pour une largeur de la barrière égale à 10 cm. Celle-ci prend la valeur de 3,4 pour une largeur de l'écran égale à 20 cm.

La figure IV. 9 donne la caractéristique liant la tension maximale de disruption de l'espace du système pointe - pointe en fonction du nombre de barrières de protection fortement polluées. Il en résulte un écart de performance électrique du système croissant avec l'augmentation de la largeur de la barrière polluée. Pour $l_b = 35$ cm, celui-ci est évalué à 65 %. Il est à constater que ces résultats ont été obtenus pour une longueur de l'intervalle d'air fixe et égal à 5 cm. L'objectif de notre travail consiste en la vérification de ces résultats pour une longueur quelconque de l'espace d'air interélectrode et dans des conditions de pollution très sévères.

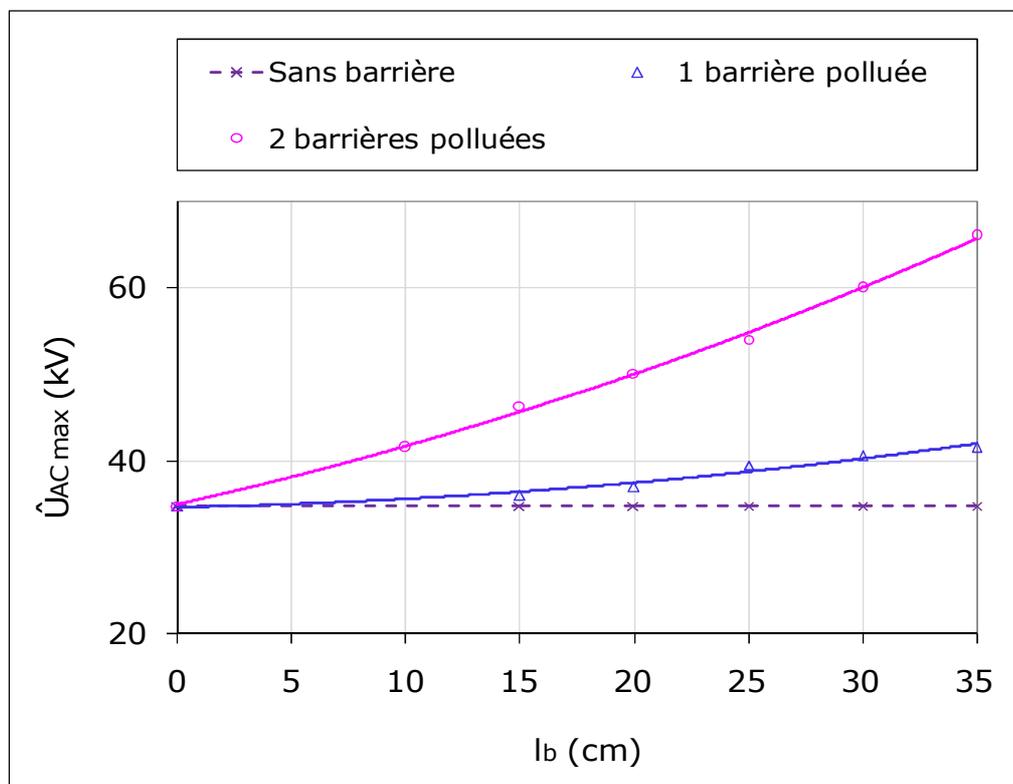


Fig. IV. 9: $\hat{U}_{ACmax} = f(l_b)$ d'un système pointe - pointe avec barrières sous atmosphère polluée

IV. 3. 3 Disruption d'un espace d'air pointe - pointe variable protégé par une ou deux barrières polluées

L'allure de la tension disruptive de la configuration de base pointe - pointe en fonction de la distance interélectrode, la taille et du nombre de barrières de protection est illustrée par les figures IV. 10, 11, 12, 13, 14 et 15.

Il ressort des figures IV. 10 et 11 que pour les tailles des barrières égales à 10 et 15 cm et pour des distances de l'intervalle d'air allant de 4 à 16 cm, la protection de la configuration pointe - pointe par une ou deux barrières n'est pas du tout acceptable, puisque le comportement électrique de celles-ci, dans des conditions de pollutions très sévères, est équivalent à un système pointe - plan possédant une tension disruptive la plus faible possible. Cela signifie que les tailles données aux barrières dans ce cas sont très insuffisante pour apporter une protection nécessaire. Par contre dans l'intervalle d'air variant entre 1 et 4 cm, nous constatons une petite amélioration de la rigidité du système de base pointe - pointe, lorsque celui-ci est protégé par deux barrières polluées.

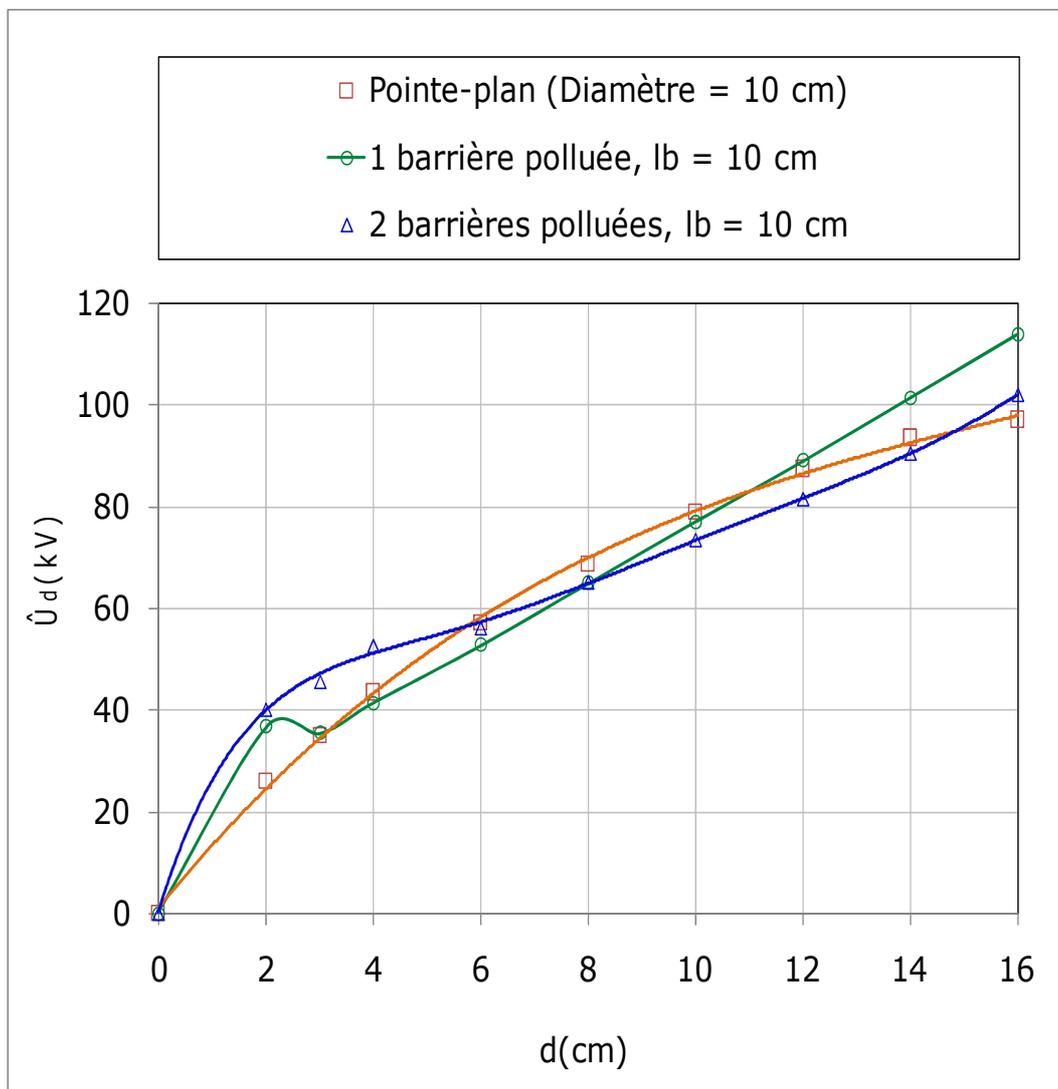


Fig. IV. 10: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 10 cm

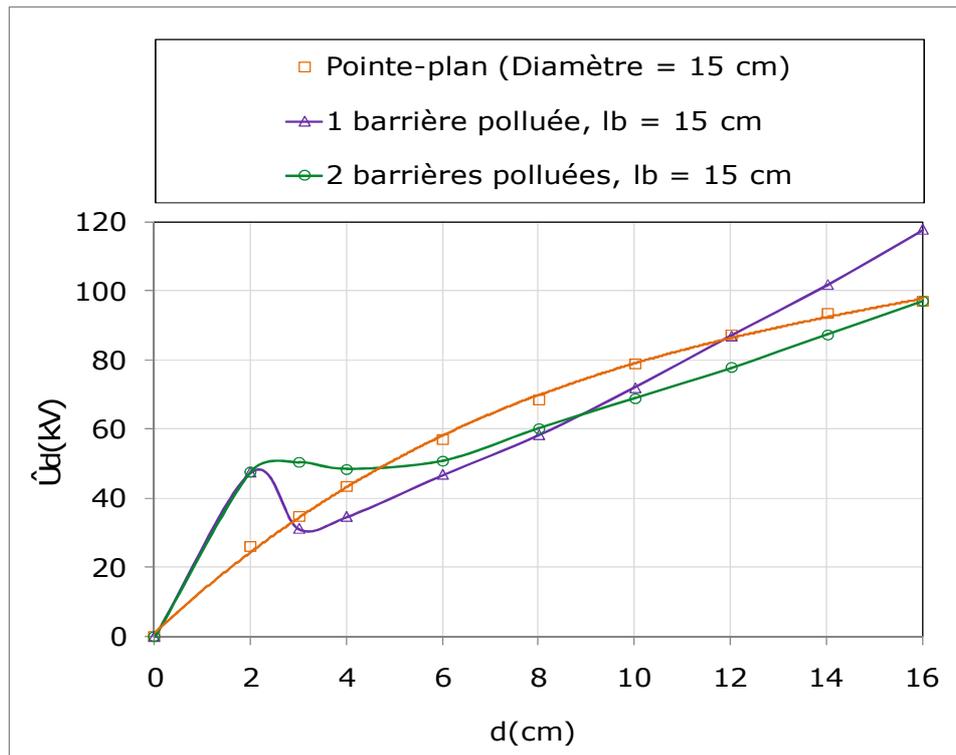


Fig. IV. 11: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 15 cm

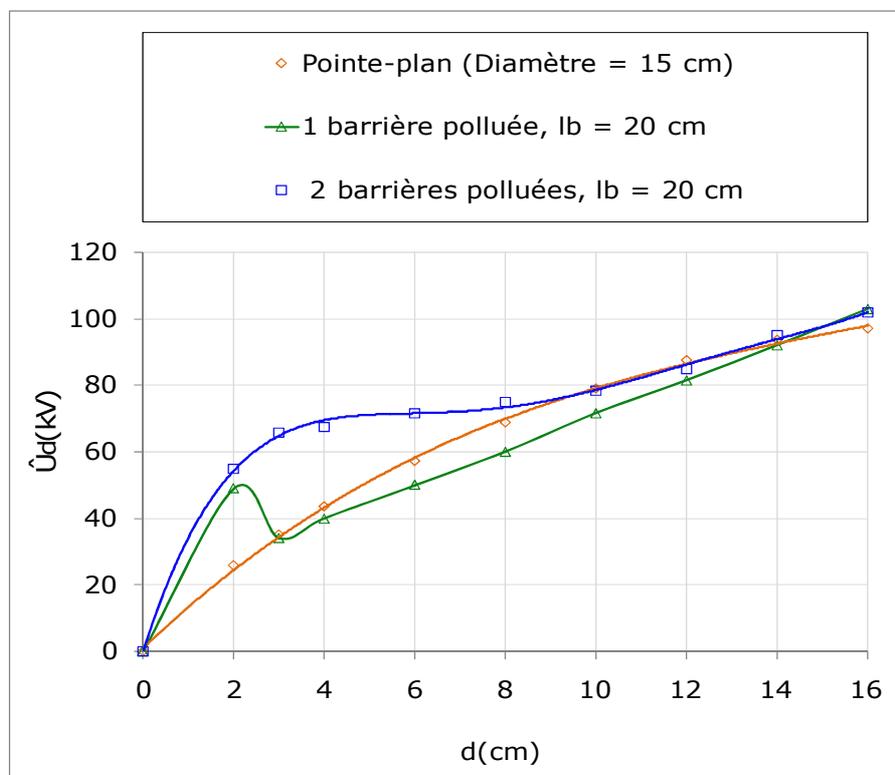


Fig. IV. 12: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 20 cm

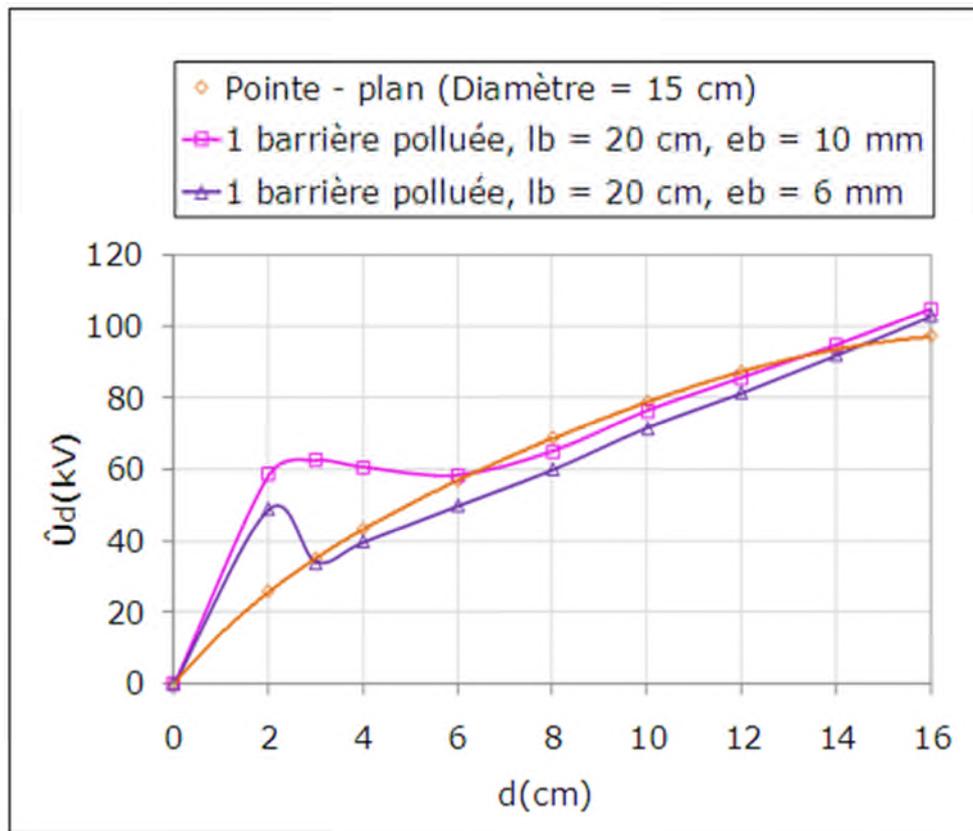


Fig. IV. 13: $\hat{U}_d = f(d)$ pour un système pointe - pointe protégé par une barrière polluée de même largeur ($l_b = 20$ cm) et à épaisseur différente (6 mm ou 10 mm)

Il découle de la figure **IV. 12** que l'insertion dans un intervalle d'air pointe - pointe d'une barrière de 20 cm de largeur sous une atmosphère fortement contaminée, n'entraîne en aucun cas une amélioration de la performance du dit système quelle que soit la taille de l'intervalle d'air du système allant de 3 à 16 cm. Au contraire sa présence est défavorable, car celle-ci ramène la tension disruptive du système pointe - une barrière polluée - pointe à la valeur de celle obtenue pour une configuration pointe - plan sans barrière (**Fig. IV. 12**). Par contre la seule et faible amélioration qui puisse être apportée ne peut venir que par le biais de l'introduction d'une deuxième barrière sous atmosphère polluée, mais seulement pour des intervalles d'air compris entre 1 et 5 cm. Il est à souligner qu'en augmentant l'épaisseur d'une seule barrière de protection de 6 à 10 mm, une faible amélioration de la performance du système pointe - pointe est décelée dans l'espace d'air allant de 1 à 4 cm (**Fig. IV. 13**). Ce faible écart de performance du système est pratiquement proche de celui offert par deux barrières d'épaisseur $e_b = 6$ mm.

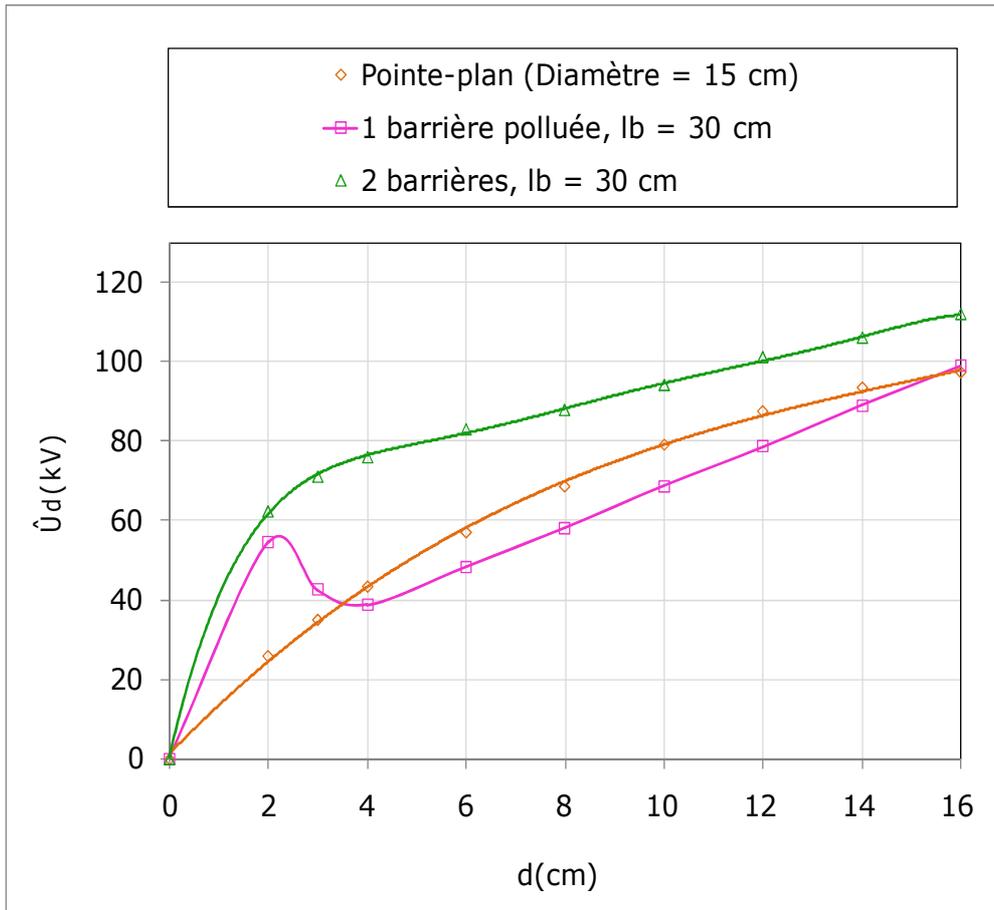


Fig. IV. 14: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 30 cm

Il découle des figures IV. 14 et 15 que l'insertion dans le système de base pointe - pointe protégés par une ou deux barrières de 30 ou 40 cm de taille sous une atmosphère fortement contaminée, peut entraîner une amélioration de 152,4 % de la performance du dit système uniquement dans l' intervalle d'air de 1 à 3 cm pour une barrière de 40 cm et de 178 % dans le cas de deux barrières de 40 cm de largeur. Dans le reste de l'intervalle, c'est-à-dire de 3 à 16 cm, l'amélioration maximale possible est de l'ordre de 178 %, lorsque la protection du système est assurée par deux barrières de 40 cm de largeur. Dans l'intervalle d'air compris entre 3 et 16 cm, La performance du système pointe - pointe avec une barrière de taille égale à 30 ou 40 cm est pratiquement la même que celle d'une configuration pointe - plan sans barrière. Cela veut dire en d'autres termes que la protection du système suscité est très défavorable. Par conséquent l'introduction d'une deuxième barrière de protection dans le système est impérative. Comme il a été démontré dans les travaux antérieurs [16] l'équivalence électrique entre deux barrières isolantes fortement polluées de 20 cm de largeur à un système d'électrodes plan - plan, il suffit donc de vérifier cette équivalence électrique

pour des largeurs de 40 cm, pour pouvoir imaginer une modélisation du phénomène de disruption d'un intervalle d'air à champ uniforme et de taille variant entre 3 et 16 cm.

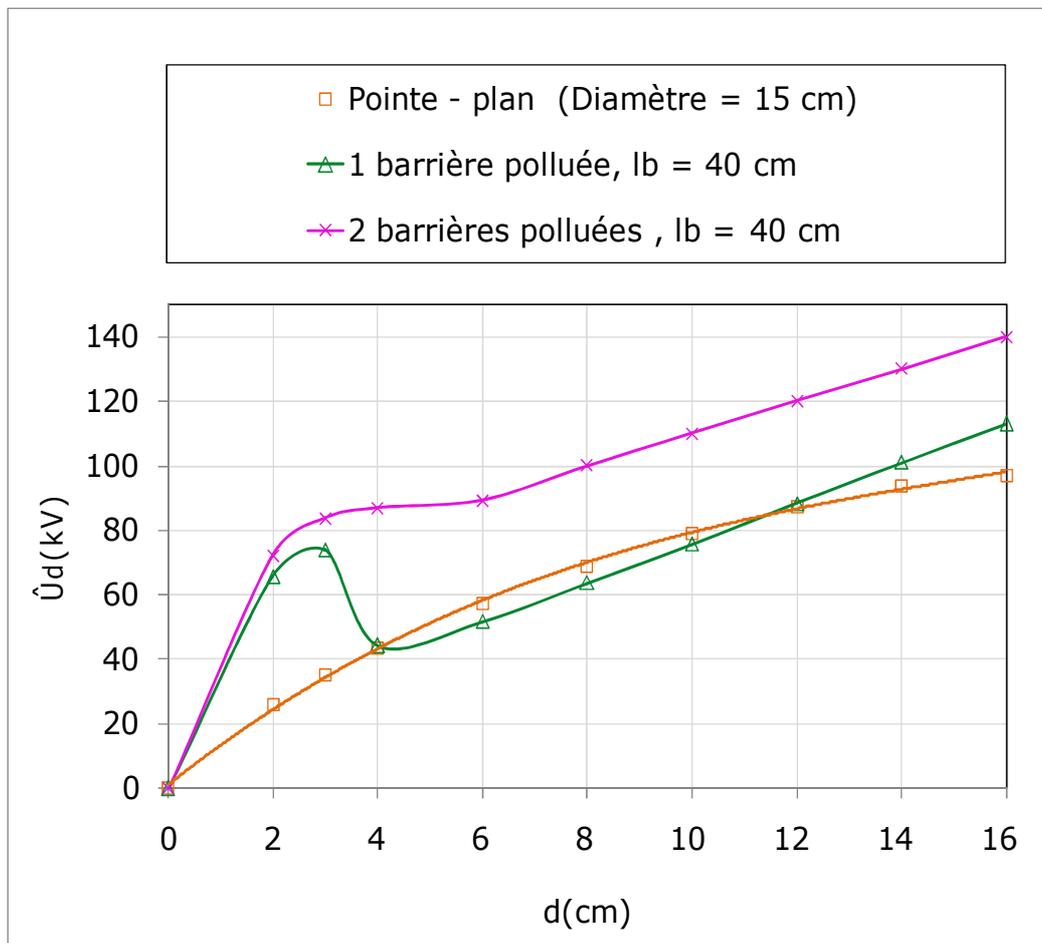


Fig. IV. 15: $\hat{U}_d = f(d, n_b)$ pour un système pointe - pointe protégé par une ou deux barrières polluées de taille égale à 40 cm

IV. 3. 4 Visualisation de la décharge électrique dans l'intervalle d'air pointe - pointe avec barrière uniformément polluée

Il ressort de la visualisation de l'évolution de la décharge électrique dans le cas d'une barrière uniformément et fortement polluée mise en contact avec la pointe sous tension alternative d'une configuration pointe - pointe que la disruption d'un tel espace d'air est régi pratiquement par une seule décharge émanant de la pointe mise à la terre et évoluant dans l'air jusqu'au centre de la barrière fortement contaminée (**Fig. IV. 16**). Comme celle-ci est équivalente à une barrière métallique, la décharge ne glisse plus sur sa surface. Quant à celle issue de la pointe sous tension, elle est réduite à un point lumineux qui ne glisse pas sur la face conductrice en regard de la pointe sous tension. La liaison entre ces deux décharges est établie grâce aux lignes de courant reliant les têtes des deux décharges.

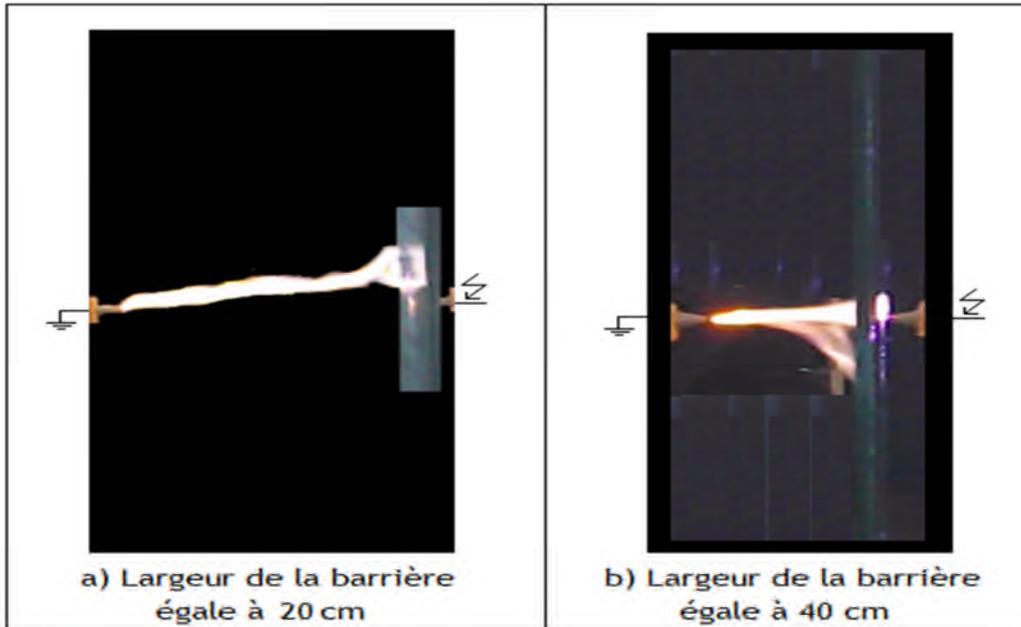


Fig. IV. 16: Evolution de la décharge dans le cas d'un système pointe - pointe isolé par une barrière isolante fortement polluée

IV. 3. 5 Caractère de la décharge électrique disruptive d'un intervalle d'air à pointe - pointe avec une barrière isolante fortement polluée

L'établissement dans notre cas du caractère de la décharge disruptive d'un intervalle d'air pointe - pointe avec une barrière fortement polluée et en contact avec la pointe mise à la terre nécessite l'inspiration de la méthode des pentes de la caractéristique de la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe - plan ($\hat{U}_d = f(d)$) en fonction de sa longueur [51]. Cette méthode consiste à comparer les pentes de cette caractéristique aux gradients de potentiel dans les streamers et le leader. Les valeurs du gradient de potentiel dans les streamers s'étendent respectivement pour les positifs entre 4,5 kV/cm et 7,5 kV/cm et pour les négatifs entre 10 kV/cm et 15 kV/cm. Celles du leader positif ou négatif varient de 0,1 à 1,5 kV/cm. Le traçage de ces pentes sur les figures **IV. 17** et **IV. 18** donnant les caractéristiques de la tension disruptive d'un intervalle d'air pointe - pointe avec une barrière fortement polluée de largeur égale respectivement à 10 cm (**Fig. IV. 17**) et 40 cm (**Fig. IV. 18**) en fonction de sa taille nous permettant de tirer des conclusions sur la nature de la décharge évoluant dans ce type d'intervalle. Il en résulte que dans l'intervalle d'air allant de 0 jusqu'à 2 cm, la caractéristique présente une pente de valeur supérieure à 15 kV/cm, ce qui correspond à une décharge électrique de type proche plutôt des streamers négatifs. Pour une distance d comprise entre 4 et 16 cm, la caractéristique présente une pente de l'ordre de 6,2 kV/cm. Cette valeur correspond à une décharge de type streamers positifs. Dans le cas d'une barrière fortement

polluée de 40 cm de largeur, il est à signaler que pour $0 \text{ cm} < d \leq 3 \text{ cm}$ la pente de la caractéristique est de l'ordre de 25 kV/cm. A ce gradient de potentiel correspond une décharge électrique de type couronne. Pour $3 \text{ cm} < d \leq 16 \text{ cm}$, la pente de la caractéristique est égale à 6,2 kV/cm, ce qui lui correspond une décharge électrique de type streamers positifs.

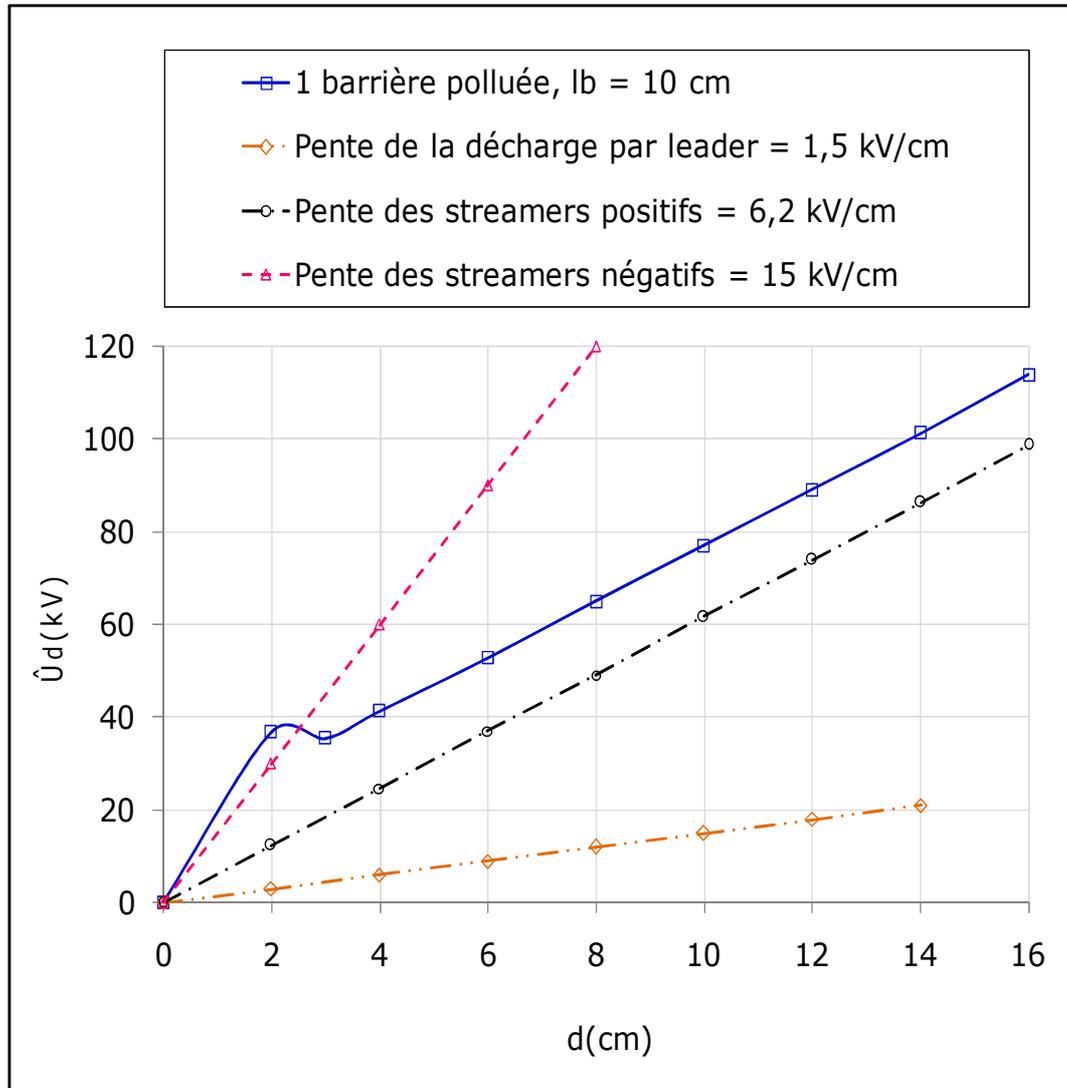


Fig. IV. 17: $\hat{U}_d = f(d, l_b)$ d'une barrière diélectrique de 10 cm sous atmosphère polluée

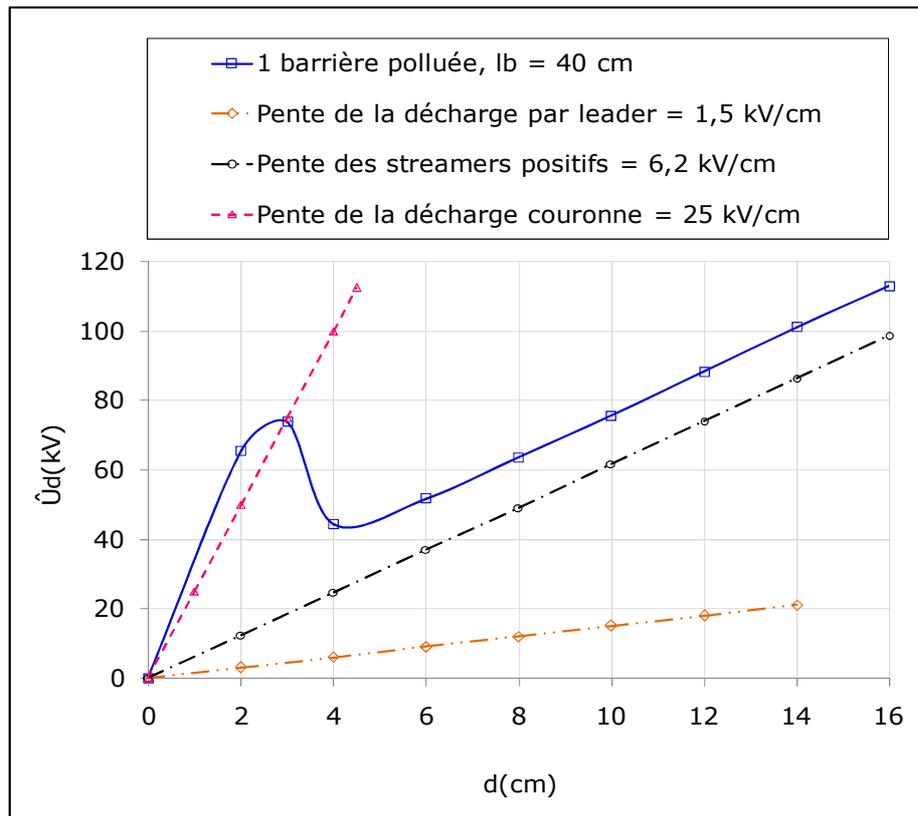


Fig. IV. 18: $\hat{U}_d = f(d, l_b)$ d'une barrière diélectrique de 40 cm sous atmosphère polluée

IV. 4 Conclusion

L'étude de la modélisation de la disruption d'un intervalle d'air pointe - pointe avec barrière sous une atmosphère fortement polluée et tension alternative a mené aux résultats essentiels suivants:

- La tension de disruption du système pointe - plan croît avec la diminution du diamètre de l'électrode à la terre ;
- La performance du système pointe - pointe est plus faible que celle de la pointe - plan où le diamètre de ce dernier est à sa plus faible valeur ($D_p = 15$ cm) ;
- Pour des intervalles d'air de longueur supérieure ou égale à 4 cm et inférieure à 16 cm, la protection du système pointe - pointe par une barrière isolante de taille comprise entre 10 et 40 cm et mise sous conditions de pollution très sévères s'avère très défavorable, car la tension disruptive d'un tel système est réduite à celle d'une pointe - plan, du fait du comportement électrique de la barrière isolante très fortement contaminée équivalent à celui d'une barrière métallique ;
- La disruption de l'espace d'air pointe - pointe avec une barrière uniformément et très fortement polluée et mise en contact avec la pointe sous tension alternative est régi pratiquement par une seule décharge, généralement de type streamers positifs,

émanant de la pointe mise à la terre et évoluant dans l'air jusqu'au centre de la barrière fortement contaminée sans glissement sur les faces de celle-ci. La liaison de la décharge à l'autre pointe est assurée pratiquement par les lignes de courant connectant la tête de la décharge à l'autre pointe ;

- Pour assurer une protection efficace de l'intervalle d'air suscité, l'introduction d'une deuxième barrière en contact avec la deuxième pointe est impérative. La taille de celle-ci doit être supérieure ou égale 40 cm. L'apport de cette barrière entraîne l'uniformisation du champ électrique régnant entre les deux pointes de base et le nouveau système de deux barrières collées aux pointes sous conditions de pollution très sévères est pratiquement équivalent à une configuration plan - plan à champ uniforme. La modélisation de la disruption d'un tel intervalle d'air devient possible.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de notre étude expérimentale est une contribution à la modélisation de la disruption d'un intervalle d'air pointe - pointe avec barrières sous une atmosphère fortement polluée et tension alternative.

Les principaux résultats émanant de notre étude sont résumés comme suit:

- La tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système d'électrodes pointe - plan avec barrière isolante propre augmente avec la décroissance du diamètre du plan mis à la terre.
- Pour une taille donnée d'un espace d'air, la performance du système pointe - pointe est plus défavorable que celle de la pointe - plan où le diamètre de ce dernier est à sa plus faible valeur ($D_p = 15 \text{ cm}$);
- La protection du système pointe - pointe par une barrière isolante fortement contaminée insérée dans un espace d'air de longueur comprise entre 4 et 16 cm est très défavorable car le comportement électrique de celle-ci, dans des conditions de pollutions très sévères, est équivalent à un système point - plan conducteur;
- La disruption d'un espace d'air pointe - pointe avec une barrière fortement contaminée et mise en contact avec l'électrode haute tension est régie pratiquement par une seule décharge, généralement de type streamers positifs, émanant de la pointe mise à la terre et évoluant dans l'air jusqu'au centre de la barrière comme si celle-ci se comporte comme une barrière métallique, reliant ainsi la tête de la décharge à l'autre pointe grâce aux lignes de courant traversant la couche de pollution très fortement conductrice recouvrant la barrière. Donc le glissement de cette décharge sur les faces de la barrière est absent dans les conditions de pollution très sévères;
- Sous conditions de pollution très sévères, l'insertion de deux barrières de taille supérieure ou égale 40 cm dans un intervalle d'air de base pointe - pointe, conduit à une performance électrique du système pratiquement égale à celle d'une configuration plan - plan à champ uniforme. En d'autres termes, cela signifie que la protection efficace du système pointe - pointe est amplement suffisante sous deux barrières même sous conditions de pollution très défavorables. Donc l'introduction d'une deuxième barrière isolante dans le dit système est impérative. Une fois l'équivalence entre deux barrières fortement contaminées et deux électrodes planes, du point de vue performance électrique, est prouvée, il est possible ensuite d'envisager la modélisation de la disruption d'un tel intervalle d'air.

Bibliographie

- [1] **A. Roth**, «Hochspannungstechnik». Berlin, 1927, pp. 118.
- [2] **E. Marx**, «Der elektrische Durchschlag von Luft-inhomogenen Feld». Arch. Elek. Bd. 24. pp.61, 1930.
- [3] **E. Marx**, «Air dielectric strength in non uniform fields». E.T. Z. H 33, pp.1161, 1930.
- [4] **H. Roser**, «Dielectric strength screen in air». E. T. Z. H17, Bd.53, pp.411, 1932.
- [5] **H. Roser**, «Schirme zur Erhöhung der Durchschlagspannung in Luft». E. T. Z. H17, Bd53, 1932, pp.411.
- [6] **N.F.Wolochtchenko**, «Problèmes relatifs au mécanisme de l'effet de barrière». En Russe. Elekritchstwo, n°6, 194, pp. 61. 1947
- [7] **J. Pilling**, «Dielectric barrier in uniform field». Elektrie 23, H11, pp.463, 1969.
- [8] **M. Awad, H. Bohme**, «Durchlagspannung inhomogener Funkenstrecken mit verschmutzten Barrieren». Elektrie 31, H1, 1977, pp.35.
- [9] **A. Boubakeur**, «Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe - plan». Thèse de Doctorat, E.P. 1979
- [10] **A. Beroual**, «Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in point - plane arrangements». Département de génie électrique, école nationale polytechnique, Algérie, Décembre 1991.
- [11] **F. V. Topalis**, «Barrier effect in small and medium air gaps». National Technical University of Athens (Greece), August 1991.
- [12] **S. M. Lebedev, D. P. Agoris, I. Vitellas, Yu. P. Pokholkov**, «Study of the polarization role in the breakdown of air gap with barrier». 12th International Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore, pp. 298-301, India 2001.
- [13] **R. Boudissa, S. Mouhoubi et A. Haddad**, «Performance des écrans sous tension alternative et continue». 7^{ème} conférence nationale sur la haute tension (CNHT 2009), Sidi Bel Abbés, Algérie 2009.
- [14] **H. Mekbel, M. Allaoua**, «Etude de comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative». PEF 2004, U.A.M. Bejaïa.
- [15] **H. Madi, R. Boudissa**, «Effet du mode de distribution de pollution sur la performance d'une barrière isolante contaminée sous tension alternative». 2^{ème} Journée internationale d'électrotechnique de maintenance et de compatibilité électromagnétique papier n° HT-12, Oran 2010, Algérie.
- [16] **T. Belhoul, R. Boudissa**, «Influence du nombre d'écrans pollués sur l'amorçage d'un espace d'air à champ non uniforme sous tension alternative». 2^{ème} Journée internationale

d'électrotechnique de maintenance et de compatibilité électromagnétique, papier n° HT-13, Oran 2010, Algérie.

[17] **L. Slimanou, R. Boudissa**, «Etude de l'effet de l'épaisseur d'un écran propre et/ou pollué sur la tenue électrique d'un système à champ non uniforme sous tension alternative». 2^{ème} Journée internationale d'électrotechnique de maintenance et de compatibilité Electromagnétique papier n° HT-12, Oran 2010, Algérie.

[18] **S. Iouknane**, « Effet de la pollution sur l'efficacité d'un système à écran sous tension continue positive». Mémoire fin d'études d'ingénieur soutenu à l'Université A. Mira Bejaïa 2011.

[19] **R. Boudissa, N. Harid, R. Bärsch**, «Effect of surface condition and isolation mode on the efficiency of a barrier inserted in non uniform electric field under AC voltage». 17th International Symposium on High Voltage engineering, paper n° E-042, Hannover, Germany 2011.

[20] **S. Mouhoubi, A. Boubakeur, R. Boudissa**, «Influence d'un écran isolant sur la rigidité diélectrique et le champ électrique d'un intervalle d'air pointe-plan sous tension alternative». 8^{ème} conférence nationale sur la haute tension, Tiaret 2011, Algérie.

[21] **S. Slimani, R. Boudissa, S. Merabet**, «effet du nombre d'écrans et l'état de leur surface sur la tenue électrique d'un système à champ non uniforme sous tension continue positive». 2^{ème} Conférence Internationale sur la maintenance, la gestion, la logistique et l'Electrotechnique, Oran 2012, Algérie.

[22] **F. Mauseh, J. S. Jorstad**, «Streamer Inception and Propagation for Air Insulated Rod-Plane Gaps with Barriers». IEEE, 978 - 1 - 4673 - 1252, 2012.

[23] **S. Mansouri**, «Efficacité d'un système à champ non uniforme à barrière en silicone revêtue de gouttes d'eau sous tension alternative». Mémoire fin d'études d'ingénieur soutenu à l'Université de A. Mira Bejaïa, 2012.

[24] **R. Boudissa, A. Bayadi, R. Bärsch**, «Performance des écrans hydrophobes et hydrophiles sous tension alternative». 9^{ème} Conférences Nationale sur la haute tension, Ghardaïa 2013, Algérie.

[25] **M. H. Ramesh, R. F. Summer, S. Singh, Y. V. Serdyuk, S. M. Gubanski and S. Kumara**, «Application of streamer criteria for calculations of flashover voltages of gaseous insulation with solid dielectric barrier». 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, Korea, August 2013.

- [26] **F. Guerbas, M. Zitouni, A. Boubakeur, A. Beroual**, «Determination of the capacitance of long transformer oil gaps with insulating barriers». 18th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2013), Seoul, Korea, 2013.
- [27] **M. Aguet et M. Lanoz**, «Vocabulaire Electrotechnique International, Dispositifs électriques et magnétiques» In «Haute Tension». Pub. CEI, No. 50 (151), Genève, 1978.
- [28] **CEI, No. 93**, «Méthode recommandée pour la mesure des résistivités transversales et superficielles d'un matériau isolant électrique ». Genève, 1958.
- [29] **CEI, No. 60167**, «Méthode d'essai pour la détermination de la résistance des isolants solides ». Genève, 1964.
- [30] **CEI, No. 243**, «Méthode d'essai recommandée pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériaux isolant solides aux fréquences industrielles ». Genève, 1963.
- [31] **M. Nemamcha**, «Claquage des isolantes hautes tensions». 2001.
- [32] **A. Chabloz**, «Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité» In M. Aguet et M. Lanoz, «Haute Tension».1986.
- [33] **R. Boudissa**, «Technique d'isolation». Cours Master II, 2015, Université de Bejaia, Algérie.
- [34] **J. Phalippou**, «verre : aspects théorique». Technique de l'ingénieur, référence AF3600, Montpellier, juillet ,2001.
- [35] **X. Ducouret**, «Lignes aériennes: matériels isolateurs». Technique de l'ingénieur, référence D 4423, Paris 2006
- [36] **J. P. Mercier**, «Polymérisation des monomères vinyliques, Procédés et matériaux nouveaux». Première édition Presses Polytechnique Romandes, Suisse, 1983.
- [37] **R. Boudissa**, «performance des écrans sous tension alternative et continue». CNHT 2009, Sidi Bel Abbés, 2009, Algérie
- [38] **A. Mekhaldi**, «Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique». Thèse de Magister, Génie électrique, ENP 1990.
- [39] **F. Amir et KH. Namaoui**, « Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative ». Mémoire d'ingénieur, UAM, Juin 2004.
- [40] **A. Mekhaldi**, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz ». Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre1999.
- [41] **D. Namane**, « Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz ». Thèse de Magister, Ecole Nationale

Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Février 1998.

[42] **M. Tegar**, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des décharges Electrique sur des Isolateurs Installé en Régions Polluées». Thèse de Magister Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juillet 1993.

[43] **Z. Sahli**, «Etude de la non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels sous tension continue». Thèse de Magister, Département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2003.

[44] http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro_isolateur.html.

[45] **P. S. Ghosh, N. Chatterjee**, «Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage». IEEE Trans. On Dielect. and Elect. Insul. vol. 2, N°. 1, pp. 128-136, February 1995.

[46] **IEC 62271-304**, «Technical Specification of design classes for indoor enclosed switchgear and control gear from 1 kV and up to and including 52 kV to be used in severe climatic conditions». High Voltage Switchgear and Control gear-PART 304, 2008.

[47] **R. Baersch**, «Elektrisches Verhalten von polymeren Isolierstoffen unter Freiluft- und erschwerten klimatischen Innenraumbedingungen». RCC-Fachtagung Tagungsband S. 29-47, Deutschland, 2006.

[48] **G. Päsold, R. Baersch, J. C. Mauroux, T. Schoenemann**, «Elektrisches Verhalten von polymeren Isolierstoffoberflächen unter erschwerten klimatischen Innenraumbedingungen». ETG - Fachbericht 112, S. 27-34, VDE-Verlag 2008.

[49] **Georges Le Roy, Cloude Gary, Bernard Hutzier, Jacques Lalot, Christien Dubanton**, «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions». P 298. Paris, Eyrolles, Juillet 1984.

[50] **W. Mosch, E. Lemke, M. Eberhardt**, «Einführung in die Hochspannungstechnik: Luftisolierung ». VEB Kongress- und Werbedruck, Oberlungwitz, Dresden, RFA, 1984.

[51] **A. Küchler**, « Hochspannungstechnik grundlagen Technologie Anwendungen », 3.new bearbeitete Auflage, Springers, London New York, 2009