



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

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

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA -BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
En vue de l'obtention du Diplôme de  
**MASTER EN ELECTROTECHNIQUE**  
Option : Technique de haute tension  
Présenté par :

M<sup>elle</sup> BOUATIA Nawal et M<sup>r</sup> BENOUARET Nabil

Sous le thème

\*\*\*\*\*  
**RECHERCHE DE L'EQUIVALENCE DE PERFORMANCE  
ELECTRIQUE ENTRE DEUX CONFIGURATIONS PLAN – PLAN  
ET POINTE – POINTE AVEC DEUX BARRIERES POLLUEES  
SOUS TENSION ALTERNATIVE**  
\*\*\*\*\*

Dirigé par : Pr. BOUDISSA Rabah (Algeria)

Et Pr . K.D. HAIM (Germany)

Soutenu publiquement le 26/06/2016 devant le jury composé de :

M<sup>elle</sup> N. Rouha  
M<sup>r</sup> M. S. Herzine  
M<sup>r</sup> R. Boudissa  
Mr K. D. Haim

M. C. B  
Doctorant  
Professeur  
Professeur

U. A. M. Béjaïa  
U. A. M. Béjaïa  
U. A. M. Béjaïa  
U. A. P. Zittau

Présidente  
Examineur  
Rapporteur  
Co - Rapporteur

*La démarche scientifique n'utilise pas le verbe croire ;  
La science se contente de proposer des modèles explicatifs provisoires de la réalité ;  
Et elle est prête à les modifier dès qu'une information nouvelle apporte une contradiction.*  
*Albert Jacquard*

# Remerciements

Ce travail a été effectué au laboratoire de Haute Tension sous la direction de Messieurs Pr. R. Boudissa et Pr. K. D. Haim.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu au Pr. Boudissa Rabah, pour ses précieux conseils, son soutien et son optimisme à tout. Nos remerciements lui sont surtout adressés pour son suivi continu, son entière disponibilité et sa forte contribution à l'accomplissement de ce travail, sans oublier Pr. K. D. Haim pour son soutien indéfectible.

On tient également à remercier Melle N. Rouha et Mr M. S. Herzine qui acceptent de juger ce travail.

Sans oublier les membres de l'équipe 2 du Laboratoire de recherche en Génie électrique de Bejaia (LGEBéjaia).

# *Sommaire*

I.1 Introduction générale .....	1
---------------------------------	---

## CHAPITRE I

### SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LA PERFORMANCE ELECTRIQUE DES BARRIERES ISOLANTES

I. 1 Introduction.....	3
I. 2 Investigations antérieures sur la performance électrique des barrières isolante de protection d'un intervalle d'air a champ électrique non uniforme .....	3
C. P. Steinmetz, 1920.....	3
E. Marx, 1930 .....	3
H. Roser, 1930-32 .....	4
N. F. Wolochtchenko, 1947 .....	4
J. Pilling, 1968-69 .....	4
M. Awad, 1975 - 77 .....	5
A. Boubakeur, 1979 .....	5
A. Beroual, 1991 .....	7
F.V. Topalis, 1991 .....	7
S. M. Lebedev et Co, 2001 .....	7
R. Boudissa, 2009.....	8
H. Madi, 2010.....	8
T. Belhoul, 2010.....	10
S. Iouknane, 2011 .....	11

S. Slimani, 2012 .....	11
S. Mansouri, 2012 .....	12
N. Yahiaoui et Co, 2013 .....	13
I. 3 Conclusion .....	14

## **CHAPITRE II**

### ISOLATION POUR BARRIERES ET DECHARGE ELECTRIQUE

II. 1 Introduction .....	16
II. 2 Définitions .....	16
II. 2. 1 Isolant .....	16
II. 2. 2 Diélectrique .....	16
II. 3 Propriétés diélectriques des isolants .....	16
II. 3. 1 Rigidité diélectrique .....	17
II.3.2 Permittivité .....	18
II.3.3 Angle de pertes et facteur de dissipation .....	18
II.3.4 Résistivité et résistance d'isolement .....	19
II. 3.4.1 Résistance en tension continue .....	19
II. 3. 4. 2 Résistance d'isolement .....	20
II.4 Différents matériaux isolants .....	20
II. 4. 1 Isolants gazeux .....	20
II. 4. 2 Isolants liquides .....	20
II. 4. 3 Isolants solides.....	21
II. 5. Verre .....	21

II. 5. 1. Verres trempés .....	22
II. 5. 2 Verres recuits .....	22
II. 5. 3 Fibres de verre .....	22
II. 6 Décharge dans l'intervalle d'air protégé par une barrière isolante.....	22
II. 6. 1 Décharge de type streamers .....	23
II. 6. 2 Décharges de type leader .....	24
II. 7 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses .....	24
II. 7. 1 Amorçage de l'air par avalanche primaire.....	25
II. 7. 2 Claquage de l'air par streamers .....	25
II. 7. 3 Disruption de l'air par leader.....	26
II. 8 Décharge électrique de surface .....	26
II. 8. 1 Décharges glissantes aux interfaces air/solide.....	28
II. 8. 2 Paramètres influençant les décharges de surface.....	28
II. 8. 2. 1 Polarité de la tension appliquée .....	28
II. 8. 2. 2 Nature et épaisseur du solide isolant sur la forme des décharges glissantes .....	29
II. 8. 2. 3 Nature et épaisseur du solide isolant sur la longueur finale des décharges glissantes.....	30
II. 8. 2. 4 Présence d'une barrière dans l'intervalle d'air interélectrode .....	30
II. 8. 2. 5 Position de la barrière .....	30
II. 8. 2. 6 Epaisseur et permittivité de la barrière .....	31
II. 8. 3 Dégradation de la surface du solide.....	31
II. 8. 4 Similarité de la décharge glissante avec la décharge de foudre.....	31
II. 8 Conclusion .....	31

## CHAPITRE III

### POLLUTION DES BARRIERES ISOLANTES

III. 1 Introduction .....	33
III. 2 Définitions .....	33
III. 2. 1 Pollution .....	33
III. 2. 2 Salinité (Sa) .....	33
III. 2. 3 Couche de pollution .....	33
III. 2. 4 Degré de pollution .....	34
III. 2. 5 Conductance superficielle .....	34
III. 2. 6 Contrainte de contournement .....	34
III. 3 Différents types de polluants .....	34
III. 3. 1 Polluants naturels .....	34
III. 3. 2 Polluants dus aux activités humaines .....	34
III. 4 Sources de pollution .....	35
III. 4. 1 Pollution naturelle .....	35
a- Pollution marine .....	35
b- Pollution désertique .....	35
c- Autre type de pollution naturelle .....	35
III. 4. 2 Pollution industrielle .....	36
III. 4. 3 Pollution mixte .....	36
III. 5 Facteurs climatiques d'influence de la pollution .....	36
a- Vent .....	36
b- Pluie .....	36

c- Humidité.....	36
d- Température .....	37
III. 6 Répartition de pollution sur les barrières isolantes .....	37
III. 7 Effet de la pollution sur les équipements électriques .....	38
III. 8 Principales méthodes d'évaluation de la sévérité de la pollution d'un site .....	38
III. 8. 1 Densité de dépôt de sel équivalente (DDSE) .....	39
III. 8. 2 Dispositif de mesure de conductivité superficielle à l'aide d'une sonde mobile ..	39
III. 9 Classification des niveaux de pollution atmosphérique extérieure .....	41
III. 9. 1 Pollution légère (première classe) .....	41
III. 9. 2 Pollution moyenne (deuxième classe) .....	41
III. 9. 3 Pollution forte (troisième classe) .....	42
III. 9. 4 Pollution très forte (quatrième classe) .....	42
III. 10 Classification des sévérités de pollution intérieure .....	42
III. 11 Méthodes de simulation de la pollution .....	42
III. 11. 1 Essais sous pollution naturelle .....	42
III. 11. 2 Essais sous pollution artificielle .....	43
III. 11. 2. 1 Pollution liquide .....	43
III. 11. 2. 2 Brouillard salin .....	43
III. 11. 2. 3 Couche solide .....	44
III. 12 Techniques de lutte contre la pollution .....	45
III. 13 Conclusion.....	45

## CHAPITRE IV

## PARTIE EXPERIMENTALE

IV.1 Introduction .....	46
IV. 2 Dispositif expérimental et techniques de mesure .....	46
IV. 2. 1 Modèle expérimental.....	46
IV. 2. 2 Circuit de mesure électrique et de visualisation.....	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 variable entre deux plans conducteurs secs ou recouverts de gouttes d'eau .....	50
IV. 3. 2 Disruption d'un intervalle d'air variable entre deux barrières polluées et en contact avec les pointes sous tension et à la terre .....	52
IV. 3. 3 Equivalence électrique entre plan – plan métalliques et pointe – pointe protégée par deux barrières fortement et uniformément polluées.....	54
IV. 3. 4 Claquage d'un espace d'air à champ électrique non uniforme pointe – plan sous atmosphère propre et sèche ou humide .....	56
IV. 3. 5 Equivalence électrique entre un système pointe conductrice – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d'eau et plan – plan métalliques recouverts de gouttes d'eau .....	58
IV. 4 Conclusion .....	59
Conclusion générale .....	61

# *Introduction générale*

### Introduction générale

Le champ d'exploitation des barrières isolantes est très large et touche à de nombreux domaines industriels. Les petits intervalles d'air compris entre les parties actives et métalliques de ces équipements sont équivalents électriquement aux configurations à champ électrique non uniforme, à savoir, pointe - pointe et pointe - plan.

La miniaturisation de ces équipements électriques entraîne automatiquement la réduction de la distance d'isolement entre leurs parties sous tension et celles mises à la terre et par conséquent l'élévation de la contrainte de tension appliquée entre elles. Pour contourner ce problème, on insert une barrière isolante propre et sèche à l'intérieur de l'espace d'air compris entre ces extrémités. Son rôle est d'empêcher tout développement de décharges électriques par allongement de la distance d'isolement du système au moyen du chemin de glissement de celles-ci sur les grandes faces opposées de la barrière plane et/ou par uniformisation du champ électrique régnant entre la barrière et l'électrode plane mise à la terre, surtout lorsque celle-ci est plus épaisse et mise en contact avec l'électrode pointue sous tension.

Sous conditions d'une atmosphère propre et sèche, la performance d'un système à champ électrique non uniforme avec barrière de largeur bien déterminée peut atteindre deux à trois fois celle obtenue sans celle-ci. Cependant, lorsque de telles barrières sont installées dans des sites où règne une importante pollution atmosphérique, leurs surfaces contaminées deviennent alors le siège de dépôts composés d'un mélange de poussières diverses et de sels minéraux. L'humidification de ces dépôts polluants, par variation temporelle des valeurs des grandeurs météorologiques du milieu environnant, provoque la dissolution des sels et la formation de couches électrolytiques conductrices de courant électrique sur les surfaces des barrières contaminées. Par conséquent, des décharges électriques partielles peuvent prendre naissance, se développer et même réussir à court-circuiter l'intervalle d'air protégé et entraîner des coupures d'électricité, l'altération des barrières de protection et la destruction d'autres équipements électriques sensibles.

Les résultats de travaux antérieurs ont démontré que le système pointe – pointe protégé par une seule barrière sous conditions de pollution très sévères est équivalent électriquement à un système pointe – plan auquel il faudra ajouter une deuxième barrière pour relever sa protection à niveau assez fiable par le biais uniformisation du champ électrique régnant sur le dit intervalle d'air.

## Introduction générale

---

Le but visé à travers ce présent travail consiste en la recherche de l'équivalence électrique entre un système pointe – pointe protégé par deux barrières en verre mises en contact avec les deux pointes sous tension et à la terre et un système plan – plan métalliques de même surface sous conditions de pollution très sévères et sous une tension alternative 50 Hz.

Ceci explique la structuration de notre présent mémoire en quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre est dédié à la synthèse des travaux de recherche antérieure sur la performance électrique des barrières isolantes de protection de l'intervalle d'air pointe – pointe sous tension alternative 50 Hz et atmosphère quelconque.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons les différentes propriétés électriques et les divers types d'isolations des barrières utilisées jusqu'à présent dans l'industrie électrique ainsi que les deux caractères de décharges électrique évoluant dans l'intervalle d'air interélectrode et sur la surface des barrières insérées dans l'espace suscité.

Le troisième chapitre est consacré à la pollution en tant que phénomène très néfaste pour les équipements de protection des intervalles d'air à champ électrique non uniforme et des conséquences qui en résultent.

Quant au quatrième chapitre, celui-ci regroupe le protocole expérimental où sont présentés les divers dispositifs et méthodes de mesures adoptés dans notre étude, ainsi que tous les résultats obtenus dans ce sens et leur interprétation.

# Chapitre I

*Synthèse des travaux  
de recherche sur la performance  
électrique des barrières isolantes*

### I Introduction

L'effet des barrières isolantes sur la performance électrique d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme (pointe - plan) a été étudié pour la première fois par Marx et Roser; durant les années 1930.

Au début des travaux, l'effet des barrières dans les gaz est associé à l'uniformisation du champ électrique grâce à une distribution uniforme des charges électriques sur toute la surface de la barrière. Le modèle de Marx – Roser a servi de référence pour la majorité des travaux de plusieurs chercheurs en vue d'expliquer l'effet favorable des barrières dans les diélectriques gazeux mais aussi dans les diélectriques liquides et solides.

Depuis ce temps une multitude de paramètres électrogéométriques de la barrière isolante, exerçant une influence importante sur la performance électrique de l'intervalle d'air protégé par celle-ci, sont rentrés en jeu. Parmi ceux - là, nous pouvons distinguer essentiellement la sévérité du degré de pollution du site d'emploi de cette barrière, le nombre de barrières assurant une meilleure uniformisation du champ électrique régnant dans la configuration suscitée, le type de l'isolation du matériau utilisé comme barrière ainsi que la taille de l'intervalle d'air de la configuration considérée.

Donc à ce jour plusieurs investigations ont été menées dans le sens d'une modélisation du phénomène de disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme sous la protection de barrières isolantes polluées. Dans ce qui suit nous passerons en revue les résultats issus de ce genre d'investigations.

### II Investigations antérieures sur la performance électrique des barrières isolantes de protection d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme

Il découle de l'investigation réalisée par C. P. Steinmetz [1] que l'insertion d'une barrière dans des intervalles relativement petits (< à 30 cm) fait augmenter leur rigidité diélectrique transversale.

L'auteur E. Marx [2] montra que la présence d'une barrière isolante modifie la répartition du champ électrique, et engendre une amélioration notable quand l'écran est placé au voisinage proche de la pointe positive. Quand à la pointe négative, la présence de l'écran est pratiquement sans effet. Sous des impulsions de choc, l'augmentation de la tension disruptive a été obtenue 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].

Dans ce cas, la barrière joue le rôle d'une électrode plane et son potentiel est pratiquement égal au potentiel de la pointe. La chute de tension dans l'espace entre la pointe ionisée et la barrière est négligeable.

H. Roser [4] a été le premier à étudier l'influence des barrières de différentes permittivités sur la tension disruptive aux chocs de foudre, en tension alternative et continue, pour divers systèmes d'électrodes.

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. Volochtchenko [6] 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, Volochtchenko 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 planes 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 [7] 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.

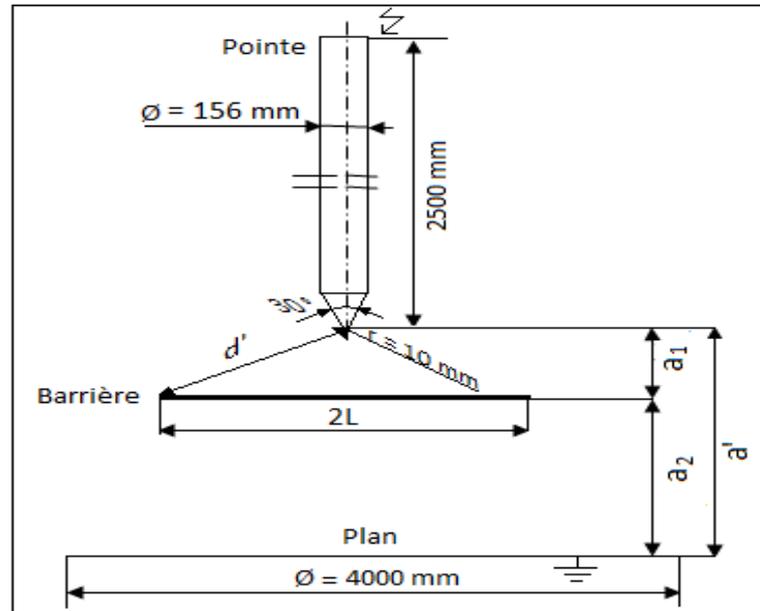
La constante diélectrique et l'épaisseur de la barrière influencent la distribution des porteurs de charges positives et la chute de tension sur la surface de la barrière isolante. Quand la constante diélectrique et l'épaisseur augmentent, la ramification des streamers s'élargit de plus en plus et le 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 de la forme:  $U_d = 10d(kV/cm)$  (d distance entre électrodes en cm). Ce résultat peut être pris en considération en ce qui concerne l'utilisation pratique des barrières.

M. Awad [8] 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 pour un choc de manœuvre d'impulsion (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'élévation 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 [9] 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 (**Fig. 1**). 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  $0,4 \mu\text{S}$  et pour des distances pointe - barrière comprises entre 20 et 100 % de l'intervalle complet.



**Fig. 1:** Arrangement pointe - barrière - plan

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.

Les auteurs A. Beroual et A. Boubakeur [10] ont 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 de manœuvre.

Les conditions de l'existence des décharges électriques autour de la barrière, située du côté de l'électrode pointe, particulièrement autour de 20 % de l'espace d'air, conduit à une augmentation significative de la tension de claquage d'air. Cette augmentation est spécialement due au prolongement du canal de la décharge.

## Chapitre I: Synthèse des travaux de recherche sur la performance électrique des barrières isolantes

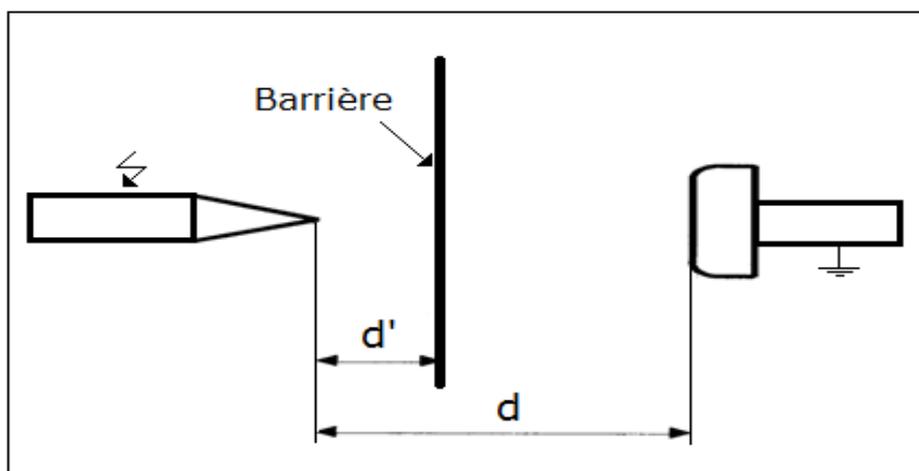
Une barrière polluée sur sa surface à une conductivité supérieure à  $1,6 \mu\text{S}$  est équivalente à une barrière métallique.

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.

Le travail de F.V. Topalis [11] se rapporte au comportement de petits et moyens 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].

Les études expérimentales effectuées par S. M. Lebedev et Co [12], 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. 2).



**Fig. 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)

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.

## Chapitre I: Synthèse des travaux de recherche sur la performance électrique des barrières isolantes

Boudissa [13] a pris un système pointe – barrière - plan (axe vertical de la configuration) pour analyser l'effet du 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:

- 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  $l_b = 25$  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.

Les travaux de recherche effectués par H. Madi et Co [14], 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 - barrière - 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.

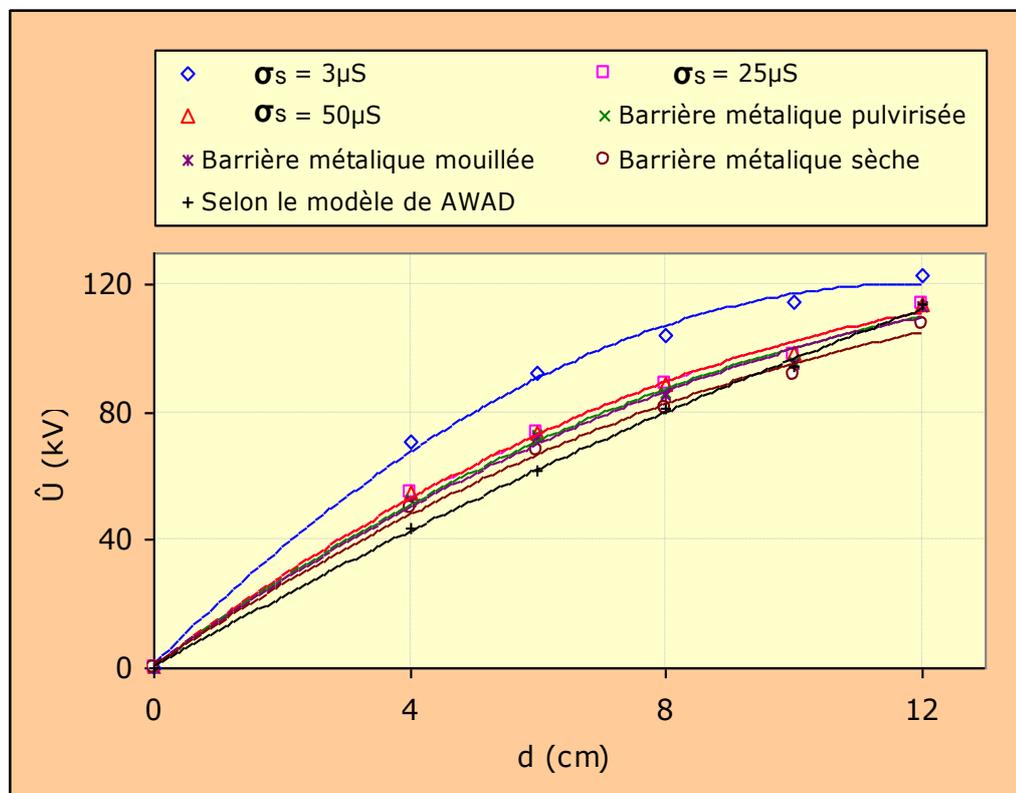


Fig. 3:  $\hat{U}_c = f(d)$  avec  $D_p$  (Diamètre du plan à la terre) = 15 cm et  $\sigma_s$  variable

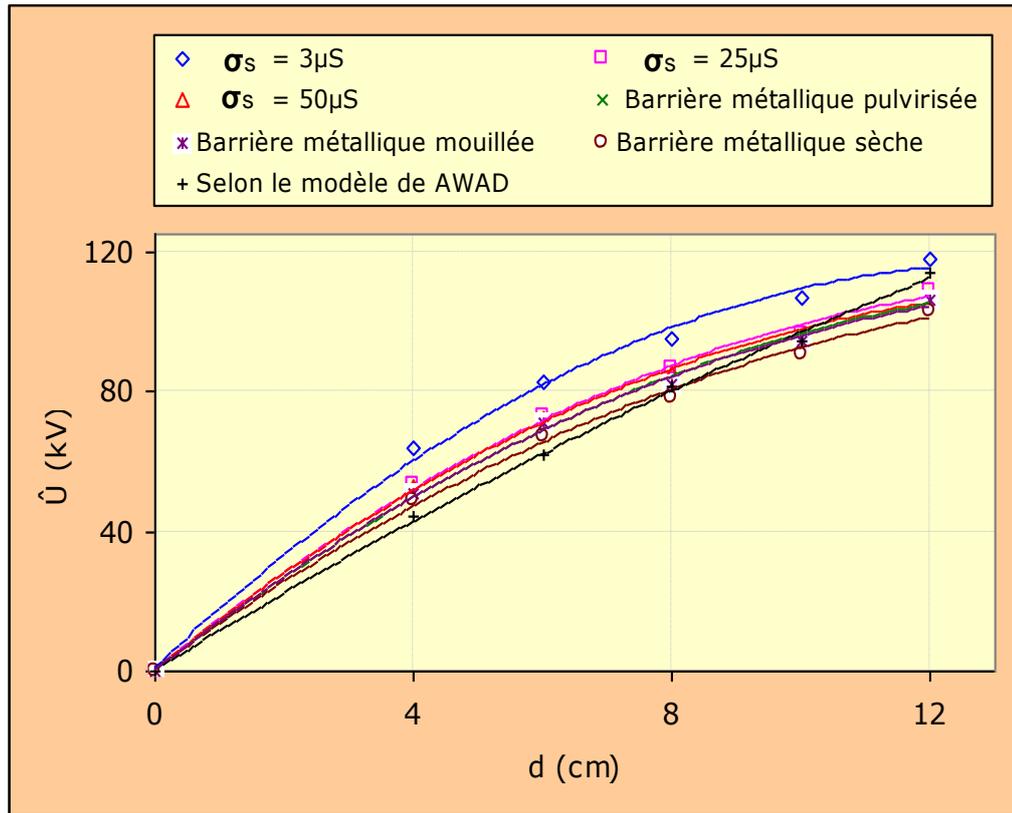


Fig. 4:  $\hat{U}_c = f(d)$  avec  $D_p = 5$  cm et  $\sigma_s$  variable

Les figures 3 et 4, obtenues par ces auteurs, 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 ( $\sigma_s = 3$  à  $50 \mu S$ ) pour enfin se rapprocher pratiquement de celle du système, acquise avec une barrière métallique aspergée de gouttes d'eau, quels que soient la distance interélectrode et le diamètre du plan ( $D_p$ ) à la terre. Ceci permet de 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 du système (pointe - plan) avec une barrière de largeur égale à 40 cm, déterminée selon le modèle de Awad [8], conformément à la formule 1, 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 streamers alors que dans le

cas de barrières isolantes polluées, la décharge évoluant dans l'espace d'air du système est de type leader.

$$\hat{U}_d = E_{st} \left( \frac{d}{2} - \frac{e}{2} \right) + E_d \eta_G \eta_s \left( \frac{d}{2} - \frac{e}{2} \right) = (E_{st} + E_d \eta_G \eta_s) \left( \frac{d}{2} - \frac{e}{2} \right) \quad (\text{I. 1})$$

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);

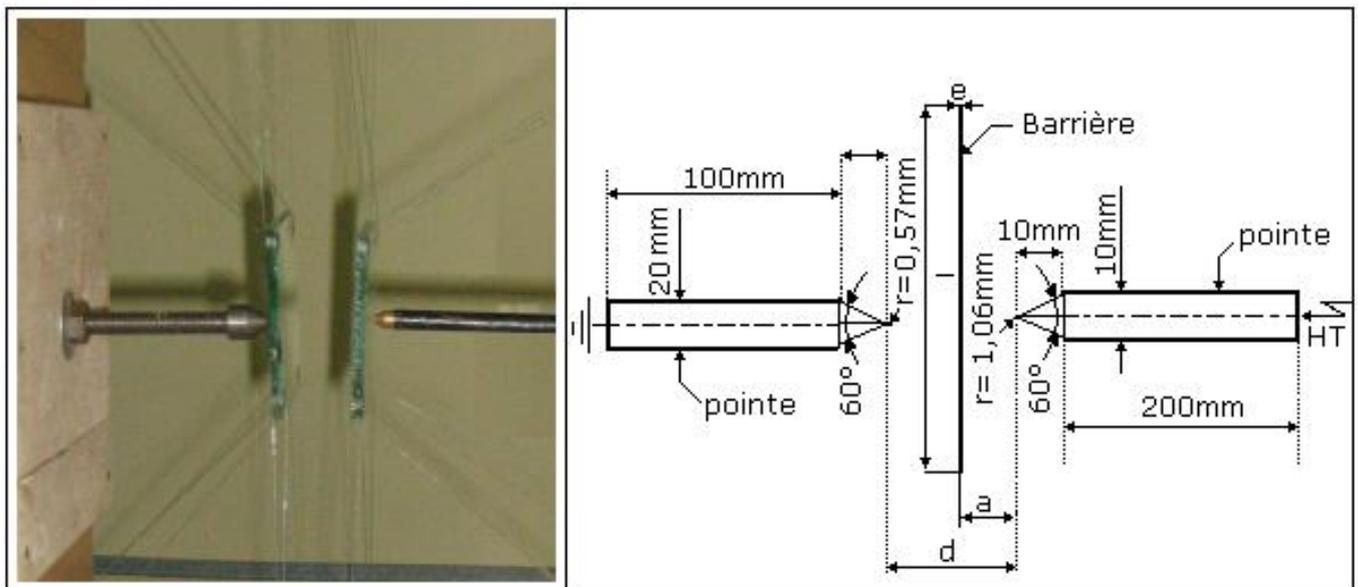
$d$ : distance dans l'air entre les électrodes pointe - plan (cm);

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

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

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

Les investigations réalisées par T. Belhoul et Co [15], 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. 5**).



a) Photo du modèle

b) Caractéristiques du modèle

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

## Chapitre I: Synthèse des travaux de recherche sur la performance électrique des barrières isolantes

---

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.

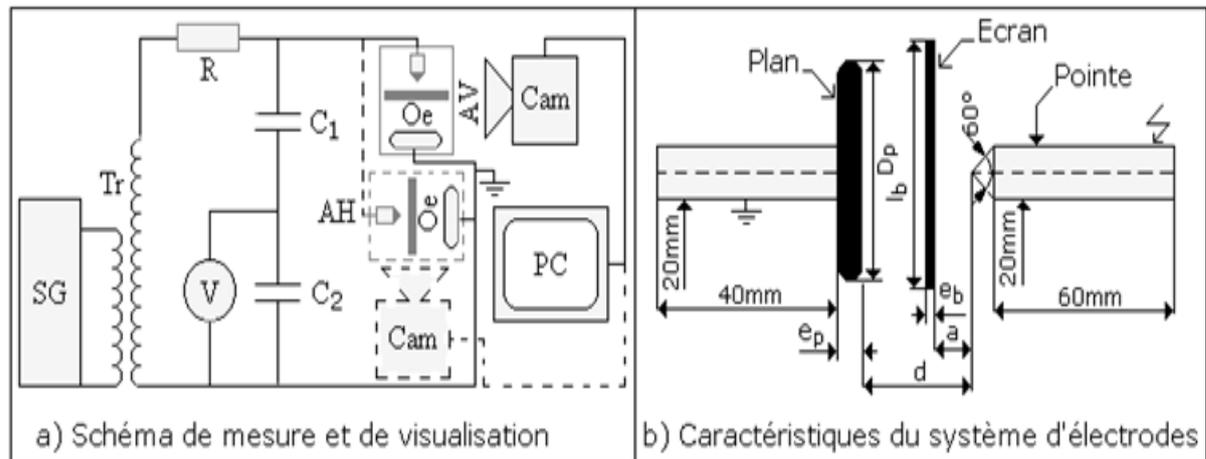
Dans l'étude expérimentale effectuée par S. Iouknane [16], celle-ci s'est intéressée à l'effet de l'isolement de la barrière par rapport à la paroi de base du dispositif contenant celle-ci sur la tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système pointe - plan mis sous tension alternative. Celle-ci 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.

Le but visé à travers les investigations réalisées par S. Slimani [17], 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.

L'objectif recherché à travers l'expérimentation menée par S. Mansouri [18], 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. 6).



**Fig. 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:

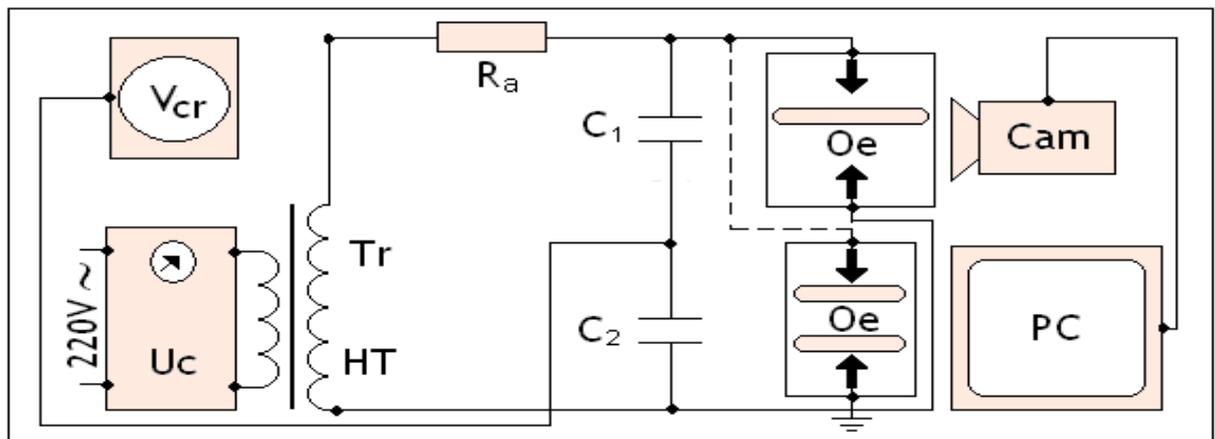
- La rigidité du système avec barrière diminue en fonction de la position de l'écran par rapport à l'électrode sous tension, quelles que soient la nature de l'isolation utilisée et ses orientations par rapport à l'axe du système de base;
- Sous atmosphère propre et sèche, la performance de l'isolation 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;

## Chapitre I: Synthèse des travaux de recherche sur la performance électrique des barrières isolantes

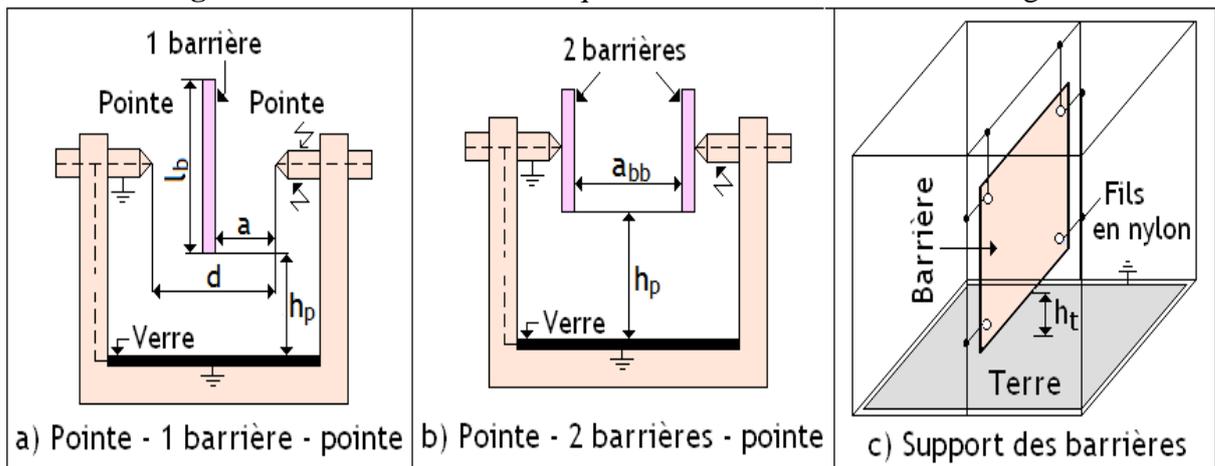
- Que l'écran soit vertical ou en position horizontale au dessus de l'électrode sous haute tension, le système d'insertion de l'écran en silicone recouvert de gouttes d'eau est plus rigide que celui à écran en verre hydrophile et/ou l'arrangement à barrière conductrice.

L'objectif recherché à travers l'expérimentation menée par N. Yahiaoui et Co [19] consiste en la quantification de la performance électrique d'un intervalle d'air pointe - pointe variable sous la protection d'une barrière en verre très fortement polluée et contrainte sous tension alternative.

La mesure de la performance du système avec barrière et la visualisation du phénomène électrique, évoluant dans l'espace interélectrode de celui - ci, peuvent être réalisées à l'aide du schéma électrique illustré par la figure 7 et le modèle expérimental est illustré par la figure 8.



**Fig. 7:** Circuit de mesure électrique et de visualisation de la décharge



**Fig. 8:** Modèle expérimental pointe - pointe avec une ou deux barrières

Les résultats d'une telle étude sont résumés comme suit:

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 suscitée, l'introduction d'une deuxième barrière en contact avec la deuxième pointe a été proposée. 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 avec deux barrières collées aux pointes sous conditions de pollution très sévères devient pratiquement équivalent à une configuration plan - plan à champ uniforme. Selon l'auteur la modélisation de la disruption d'un tel intervalle d'air devient alors possible.

### III Conclusion

Il ressort de cette synthèse que l'insertion d'une barrière isolante dans un intervalle d'air à champ électrique non uniforme peut engendrer une amélioration de sa performance électrique d'un ordre de grandeur de 2 à 3 fois plus élevée que celle obtenue sans celle-ci sous conditions d'atmosphère propre et sèche. Par contre dans le cas d'une atmosphère polluée et humidifiée, son efficacité est estimée au maximum à 1,3. Une telle chute a été expliquée dans ce cas de figure par l'équivalence électrique établie entre une configuration pointe - pointe sous l'effet d'une protection par une seule barrière contaminée en contact avec l'une des pointes et une géométrie pointe - plan.

Cette synthèse montre aussi que l'ajout d'une deuxième barrière dans un espace d'air pointe - pointe, déjà protégé par une seule barrière, peut augmenter l'efficacité du même système jusqu'à une valeur limite égale à 4. Cette augmentation est justifiée par l'amélioration de l'uniformisation du champ électrique régnant dans l'intervalle d'air délimité par la configuration pointe - barrière en contact avec la deuxième pointe mise soit sous tension ou à la terre. Par contre, sous conditions de pollution très sévères celle-ci voit malheureusement sa valeur minimale tendre vers 2.

Quant à la modélisation du phénomène de disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme, l'infime quantité de résultats de recherche issus de cette analyse, montre qu'il y a eu vraiment peu d'intérêt qui a été accordé par des chercheurs à ce domaine d'investigations, la preuve, pratiquement un seul modèle mathématique de disruption d'un espace d'air pointe - plan protégé par une barrière sous conditions de pollution légère a été proposé. Ce modèle a été conçu sur la base des résultats expérimentaux des essais effectués au sein d'un laboratoire par le même chercheur. Celui-ci a été vérifié et validé par d'autres chercheurs au moyen des essais réalisés sous conditions d'expérimentation différentes.

Cependant, pour la géométrie pointe - pointe, lorsqu'elle est protégée par une seule barrière, certains chercheurs ont prouvé que, sous conditions de pollution très sévères, celle - ci est électriquement équivalente à la configuration pointe – plan qu'il faudra impérativement protéger de nouveau. Ceci justifie l'idée de notre travail qui consiste en l'introduction d'une deuxième barrière dans l'intervalle d'air pointe – barrière polluée – pointe, afin de relever de nouveau la performance du système, de faire un choix judicieux des dimensions des barrières afin de lui trouver une équivalence électrique avec une configuration plan – plan en vue d'une modélisation du phénomène de sa disruption dans ces conditions défavorables pour un meilleur isolement de ce système.

## *Chapitre II*

# *Isolation pour barrières et décharge électrique*

## II. 1 Introduction

Les structures isolantes mixtes gaz/solide sont présentes dans de nombreux appareillages à haute et moyenne tension comme les transformateurs et condensateurs de puissance, les disjoncteurs et les câbles ainsi que dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique (isolateurs de support et de traversée). La connaissance des propriétés électriques des matériaux pour les concepteurs des systèmes électriques ou autres est impérative. En effet, la considération des propriétés électriques est souvent très importante, particulièrement lors du choix des matériaux pour la conception d'un système donné. Le comportement électrique, pour un grand nombre de matériaux, est varié selon l'application et l'environnement de travail auquel il est destiné. Certains matériaux doivent être de très bons conducteurs par contre d'autres, doivent être de très bons isolants. Il existe une grande variété d'isolants solides, liquides et gazeux. On s'intéresse de plus près à des solides qui font l'objet de barrière diélectrique dans le cas de notre travail, en étudiant 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 s'intéressera aux décharges électriques dans les gaz car nos barrières sont placées généralement dans des espaces d'air entre les différentes configurations à champ électrique non uniforme pour l'uniformisation du champ et empêcher tout développement de décharges électriques par allongement de la distance d'isolement du système au moyen du chemin de glissement de celles-ci sur les grandes faces des barrières.

## II. 2 Définitions

### II. 2. 1 Isolant [20]

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 [20]

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparés 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 [21 - 23]

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

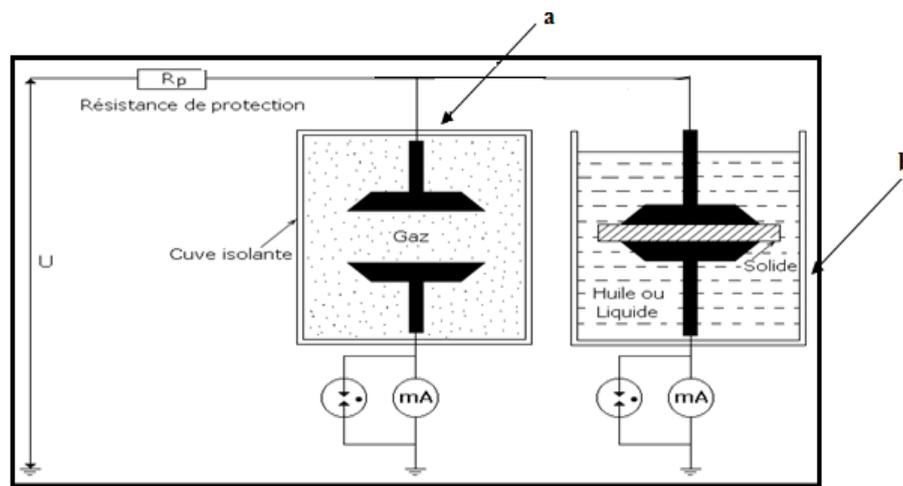
- la première comprend les propriétés essentielles qui sont:

- Rigidité diélectrique  $E$  ;
- Permittivité relative  $\epsilon_r$  ;
- Facteur de pertes diélectriques  $\text{tg}\delta$  ;

- La seconde famille réunit des caractéristiques plus directement liées à l'emploi de l'isolant dans une catégorie de matériels déterminée, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau au cours de son service (Température, fréquence, ...).

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

### II. 3. 1 Rigidité diélectrique



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

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  $d$  (**Fig. II. 1**)  $E_d = \hat{U}_d / d$ , (V/m), avec  $\hat{U}_d$ : tension de crête et  $d$ : la distance interélectrode.

### II.3.2 Permittivité

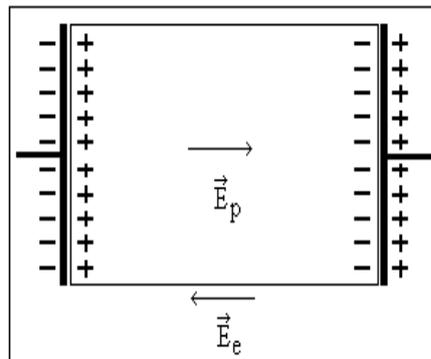
Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre  $E_p$  à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique ( $E_e$ ) extérieur appliqué (**Fig.II.2**). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

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  $\epsilon_a$  est le produit de la permittivité relative par la constante électrique du vide:

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \tag{II.2}$$

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



**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:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \tag{II.3}$$

Où  $\epsilon_r'$  est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que  $\epsilon_r$  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

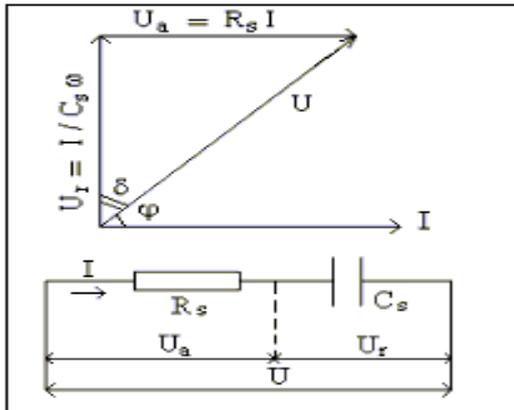
Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (**Fig. II.3. 4**).

Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle  $\varphi < \pi/2$ . Son complément  $\delta$  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:

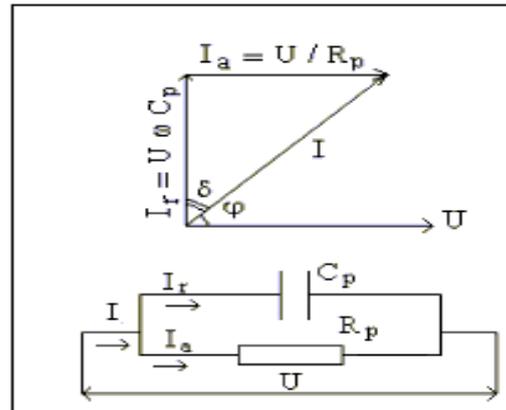
$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_r = U_a / U_r = P_a / P_r \tag{II.5}$$

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.



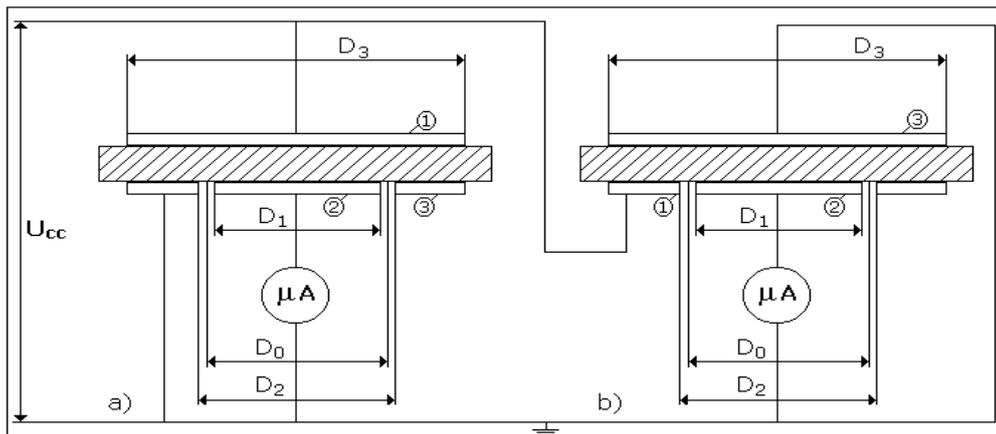
**Fig.II. 3:** Circuit électrique équivalent série



**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  $\rho_{tcc}$  et superficielle  $\rho_{scc}$

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

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

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

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

$P : \pi D_0$  (Périmètre moyen)

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

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

$R_V$  : Résistance de volume

$R_S$  : Résistance superficielle

$\rho_{\text{tec}}$ : la résistivité transversale mesurée en courant continue ;

$\rho_{\text{sec}}$  : 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 [24, 25]

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 [26]

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.

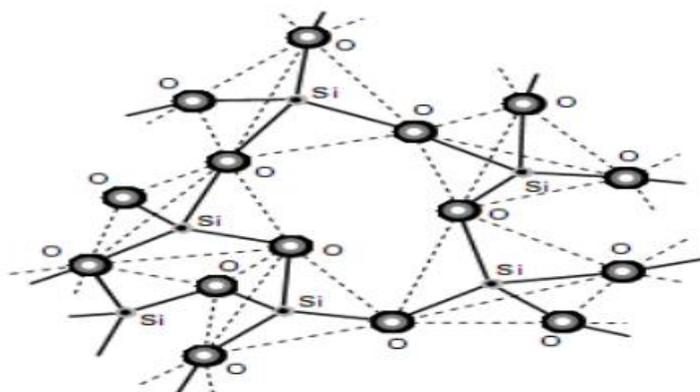
### II. 4. 3 Isolants solides [25]

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 polyvinyliques, 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 [25]

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  $\text{SiO}_2$ ) et de fondants (**Fig II. 6**).



**Fig. II. 6:** Représentation schématique de la structure du verre de silice [36]

Les isolateurs en verre sont, 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 [28]

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 brusque 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 défektivité de l'isolateur.

### II. 5. 2 Verres recuits [28]

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 [27]

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 est:  $\epsilon_r = 8,16$  ;
- Son facteur de dissipation (ou de pertes) est:  $\text{tg } \delta = 4,354 \cdot 10^{-2}$ .

## II. 6 Décharge électrique 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 instantanée 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 [30]

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/ $\mu$ s.

## II. 6. 2 Décharges de type leader [30]

La tenue diélectrique des grands intervalles d'air diminue avec la distance interélectrode. Si le champ électrique moyen à l'amorçage est encore de 4,5 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 interélectrode 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 interélectrode.

## II. 7 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses [30]

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;

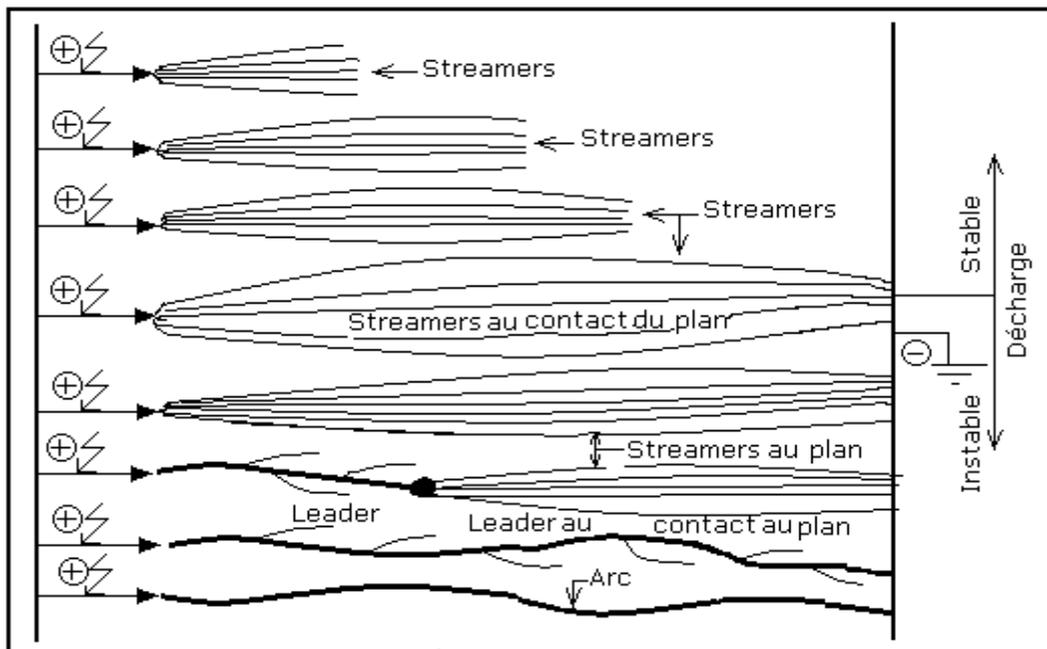
-Intérêt technique (dimensionnement des isolations externes).

### 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  $\mu s$ , les avalanches électroniques créées dans l'intervalle d'air interélectrode atteignent leur taille critique de telle sorte que les streamers prennent naissance dans l'espace d'air et progressent vers les électrodes. Si le champ résultant dépasse celui des streamers ( $E_{S+} = 4$  à 5 kV/cm), les streamers se multiplient et peuvent se propager jusqu'à contact du plan mis à la terre (**Fig. II .7**), à ce moment-là, du fait de la contribution de l'électrode à la terre phénomène.

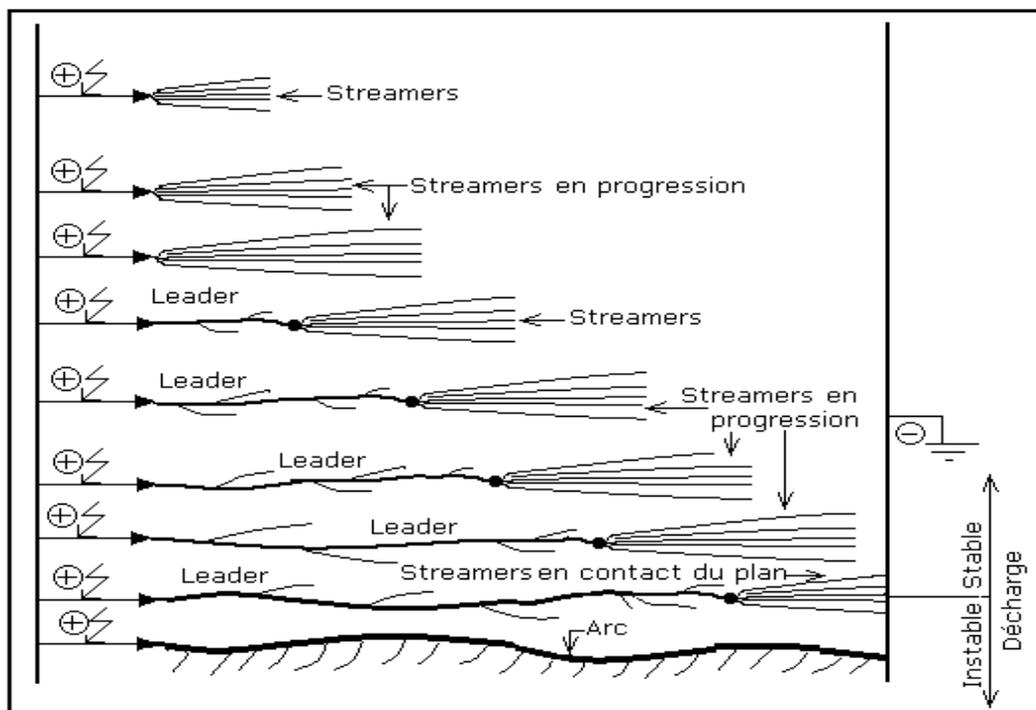


**Fig. II. 7:**Décharge par Streamers ( $d \leq 1m$ )

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.

### 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.

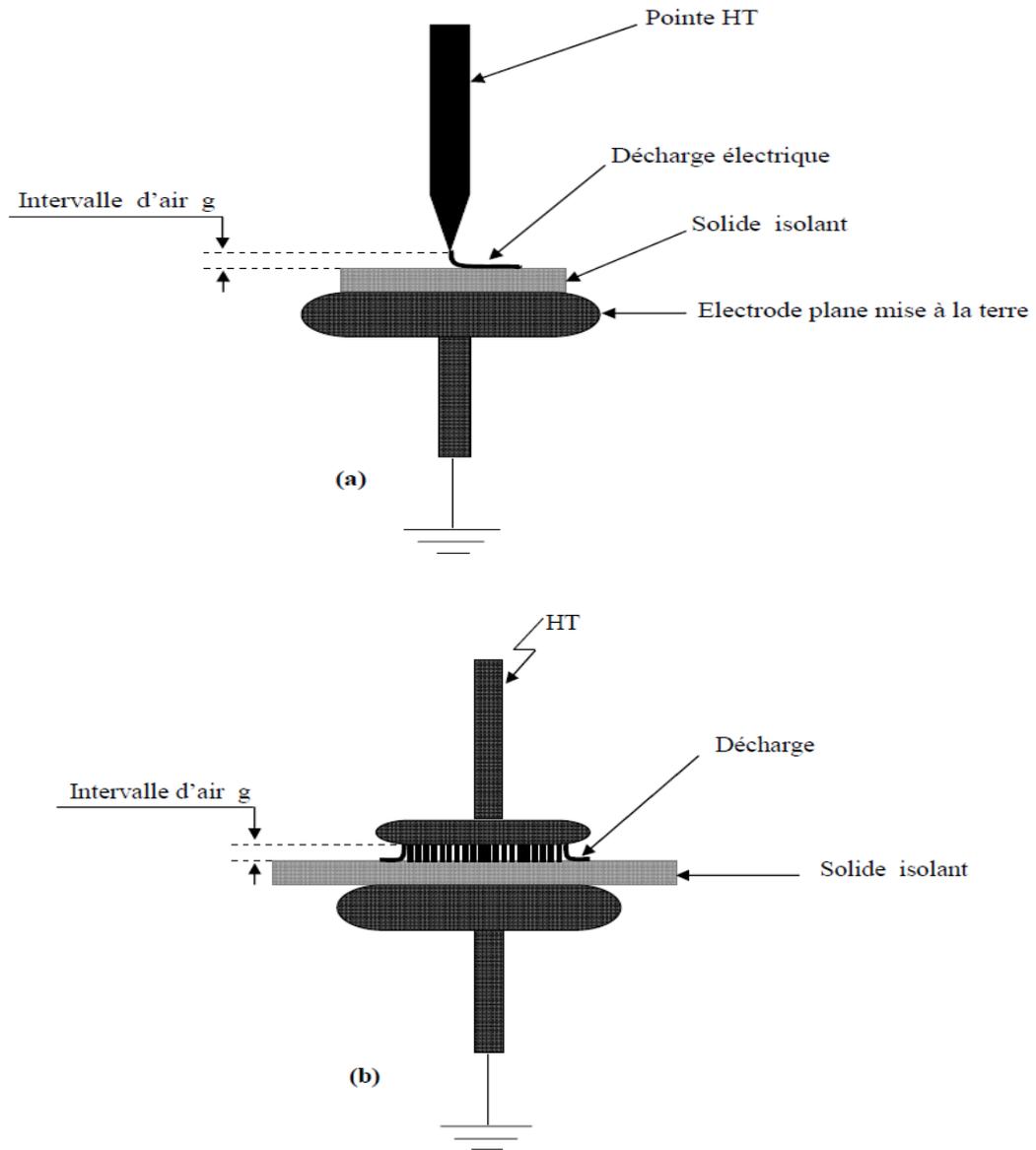


**Fig. II. 8:** Décharge par leader

## II. 8. Décharge électrique de surface

La décharge électrique de surface désigne une décharge qui se produit en contact avec la surface d'un diélectrique solide placé dans un fluide isolant. On peut distinguer deux catégories de décharges se produisant à la surface d'un solide isolant :

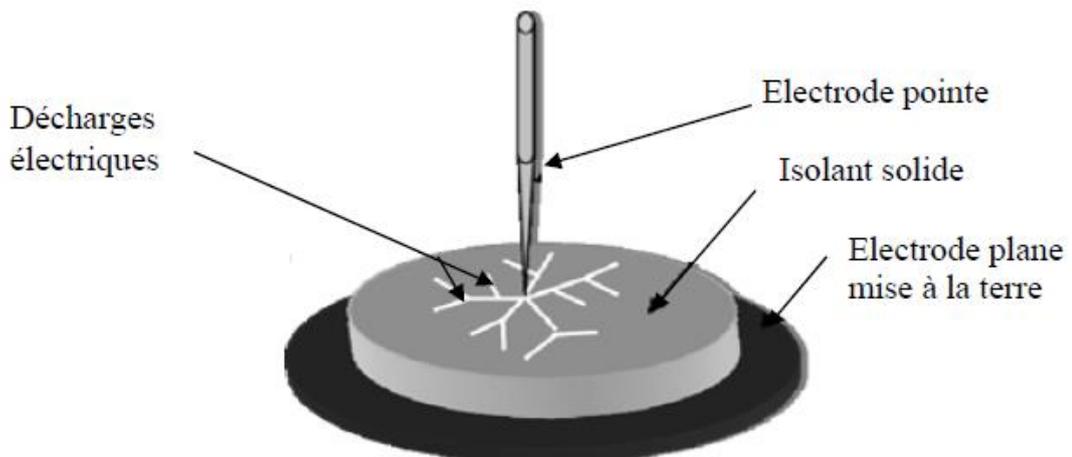
Les décharges à barrière diélectrique (**Fig II.9**) où les isolants gazeux et solide sont généralement en série entre les deux électrodes, la décharge se développe d'abord dans le volume du gaz avant qu'elle se propage sur la surface du solide.



**Fig II.9.** Décharge à barrière diélectrique

a) Système pointe-plan

b) Système plan-plan



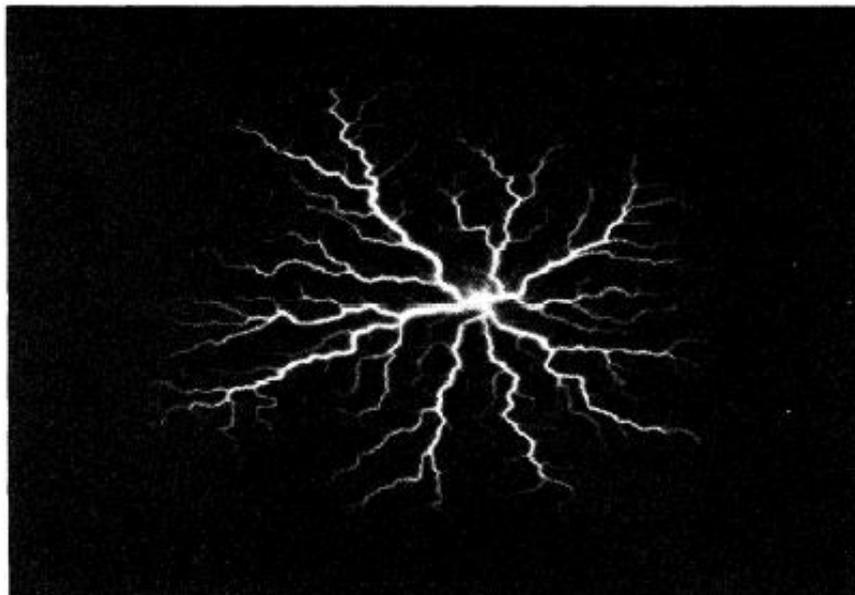
**Fig II.10 :** Système à décharges glissantes

Les décharges glissantes où les deux électrodes sont en contact avec la surface du diélectrique solide. La décharge électrique prend naissance et se développe dans le gaz en restant en contact avec la surface du solide isolant sur laquelle elle se propage (**Fig. II. 10**).

### II.8.1. Décharges glissantes aux interfaces air/solide

Lorsque l'épaisseur du solide est assez grande pour empêcher une perforation en volume ou lorsque ce dernier est utilisé comme barrière dans un intervalle d'air, des décharges peuvent se propager sur la surface du diélectrique solide et le contourner. En se propageant, ces décharges peuvent creuser la surface du solide et laisser des traces telles des canaux ramifiés de faible diamètre appelées dans la forme globale " figures de Lichtenberg ".

Ces figures prennent toujours naissance du côté de l'électrode acérée [31].



**Fig.II.11.** Figure de Lichtenberg observée sur une interface verre/SF<sub>6</sub> pour une impulsion de tension de 30 kVx1μs sous une pression de 0,3 MPa [32]

### II.8.2. Paramètres influençant les décharges de surface

#### II.8.2.1. Polarité de la tension appliquée

D'une façon générale et indépendamment de la nature et de l'épaisseur du solide, deux types de décharges peuvent être observées selon la polarité de la pointe: [33]

- Les décharges surfacique émanat d'une pointe négative, se distinguent par des branches rectilignes (**Fig II.12a**). Elles sont constituées d'un tronc principal du quel émanent des ramifications arborescentes. Les extrémités des branches et leurs ramifications forment un contour plus ou moins circulaire, centré sur la pointe. Les branches de la décharge négative,

appelés aussi « streamers », sont plus lumineuses à leurs bases qu'à leur extrémités où on remarque la présence de points lumineux, témoins d'une intense activité d'ionisation.

- Les décharges générées à partir d'une pointe positive ont une forme différente des décharges négatives (**Fig II. 12b**). Les branches de la décharge ont une structure sinueuse et ramifiée et les ramifications se terminent par des points très lumineux en forme de bourgeon à leurs extrémités. Notons la présence de branches ayant la forme de filaments faiblement lumineux, émanant des points lumineux ou « bourgeons ». Le contour formé par l'extrémité des branches prend une forme aléatoire à la différence des décharges négatives qui ont un aspect quasi circulaire.

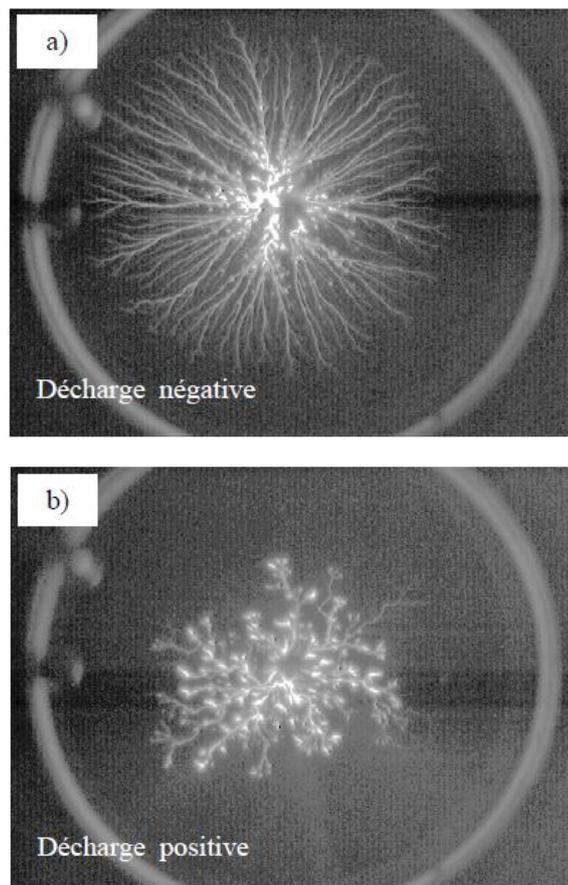


Fig . II.12: Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 KV (valeur crête) pour les deux polarités : (a) polarité négative, (b) polarité positive.[33]

### II.8.2.2. Nature et épaisseur du solide isolant sur la forme des décharges glissantes

Kebbabi [33] a montré que indépendamment de la longueur finale des décharges, la forme des décharges glissantes sous tension impulsionnelle négative dépend fortement de la nature et de l'épaisseur du solide isolant, comme le montre la figure II.13. L'aspect général change selon le matériau utilisé et la densité totale de branches dépend fortement de l'épaisseur du solide isolant.

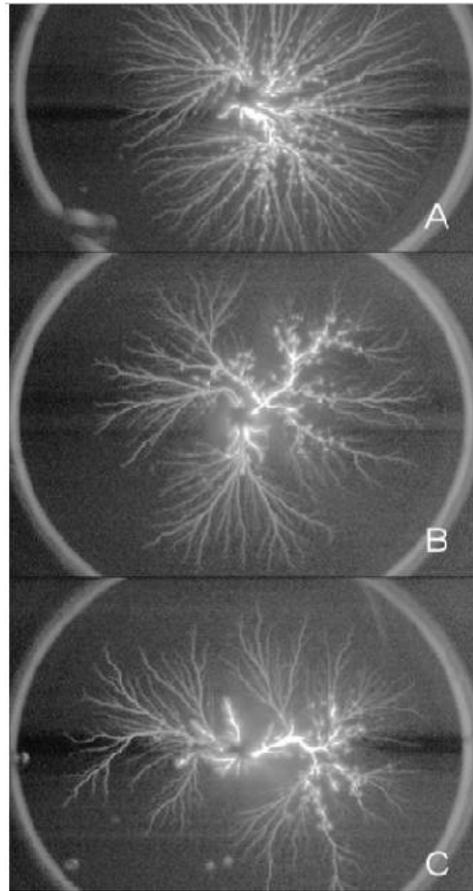


Figure II.13 : Photographies des décharges glissantes obtenues sous tension impulsionnelle négative, avec des échantillons en bakélite de différentes épaisseurs : ( A) 2 mm,  $U_{\text{crête}} = 44$  kV, (B) 10 mm  $U_{\text{crête}} = 53$  kV et (C) 20 mm,  $U_{\text{crête}} = 58$  Kv

### II.8.2.3 . Nature et épaisseur du solide isolant sur la longueur finale des décharges glissantes

Les streamers qui prennent naissance au voisinage immédiat de la pointe, se propagent radialement sur la surface du solide et s'arrêtent à une certaine distance de la pointe qu'on appelle longueur final  $L_f$ . Cette dernière dépend de l'amplitude de la tension appliquée, de l'épaisseur et de la nature du solide isolant. L'évaluation de  $L_f$  des décharges glissantes est effectuée par la mesure de la distance entre la pointe et le contour circulaire formé par l'extrémité des branches formant la décharge.

### II.8.2.4. Présence d'une barrière dans l'intervalle d'air interélectrode

L'introduction d'un solide diélectrique dans l'espace inter électrode permet, dans le cas d'un champ divergent, d'améliorer la tenue diélectrique du système. La barrière est d'autant plus efficace qu'elle est proche de l'électrode acérée (c'est-à-dire celle dont le rayon de courbure est le plus faible).

### II.8.2.5. Position de la barrière

La position optimale de la barrière, dans un système d'électrodes pointe – plan, se trouve entre 0 et 20% de la distance interélectrode. La position optimale exacte a été déterminée expérimentalement en fonction de la géométrie des électrodes par A. Beroual et al [10].

### II.8.2.6. Epaisseur et permittivité de la barrière

La permittivité et l'épaisseur de la barrière ont une influence sur la distribution des porteurs de charges positifs et sur la tension à la surface de la barrière. Quand ces deux paramètres ont des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme.

Le courant diminue de façon quasi-linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur de la barrière isolante pour les deux polarités, mais la diminution est moins importante pour les impulsions négatives [34].

### II.8.3. Dégradation de la surface du solide

La répétition d'essais engendre la dégradation de la surface du solide isolant et la perte partielle de ses propriétés diélectriques. Ainsi, pour une tension donnée, les décharges observées sur un échantillon soumis à des contraintes répétitives, ont une longueur finale relativement élevée comparée à celles générées sur des échantillons neufs. La multiplication des décharges sur le même échantillon, conduit inmanquablement au contournement de ce dernier à des amplitudes de tension relativement basses. Toutefois, la dégradation de surface dépend fortement de la rigidité diélectrique du solide isolant, du nombre de décharges et de l'amplitude de la tension.

### II.8.4. Similarité de la décharge glissante avec la décharge de foudre

Le claquage diélectrique dans les gaz, les liquides et les solides isolants se manifeste souvent par la propagation de multiples canaux qui forment des arborescences complexes et diversifiés. La foudre et les décharges surfaciques sont les exemples les plus répandus. Leur structure générale montre une grande similitude entre les différents types de décharges. En effet, en plus de cette ressemblance à caractère optique, les deux décharges ont la capacité de se propager sur de longues distances sous l'effet d'un champ électrique faible par rapport au champ disruptif.

Cela suggère que la formation des branches des différents types de décharges peut être gouverné par une loi universelle faiblement sensible aux détails physiques du phénomène. Ce type d'universalité, peut largement simplifier la classification et la description du phénomène de la décharge.

## II. 9 Conclusion

L'isolation des conducteurs électriques utilisée en haute et moyenne tension prend une grande importance dans le domaine industriel. L'étude des caractéristiques des ces isolants nous a permis de constater que :

-Un matériau isolant ne peut être caractérisé que par sa rigidité, sa permittivité diélectrique, son facteur de pertes 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**

### *Pollution des barrières isolantes*

### 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 à haute tension. En effet, les dépôts polluants recouvrant les surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de contournement des barrières isolantes. Ils peuvent dans les cas les plus critiques, conduire facilement à un contournement total de celles-ci, ce qui constitue la situation la plus grave, car conduisant à la mise hors service de l'équipement. 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. Le contournement 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 la rupture de l'intervalle d'air avec barrière sous pollution, plusieurs techniques d'essais ont dû être mises en œuvre.

Vu la performance électrique de l'isolation utilisée pour la barrière de protection, l'effet de perforation de celle-ci est quasiment nul, mais son contournement, est loin d'être évité. Il est essentiellement causé par une surtension se propageant au moyen de la couche conductrice imposée par la pollution environnante et couvrant la surface totale de la barrière.

### III. 2 Définitions [35]

#### 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  $\text{kg/m}^3$ .

#### 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 [36]

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 [36]

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 [36]

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 ( $\text{SO}_2$ ) et le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ). 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 ( $\text{CO}_2$ ), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), l'ozone ( $\text{O}_3$ ) 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<sup>ème</sup> 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 [37].

##### **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 [38].

##### **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 [39].

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 hygroscopiques (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 [39].

#### **III. 4. 3 Pollution mixte**

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 [40].

#### **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 [41, 42].

#### **c- Humidité**

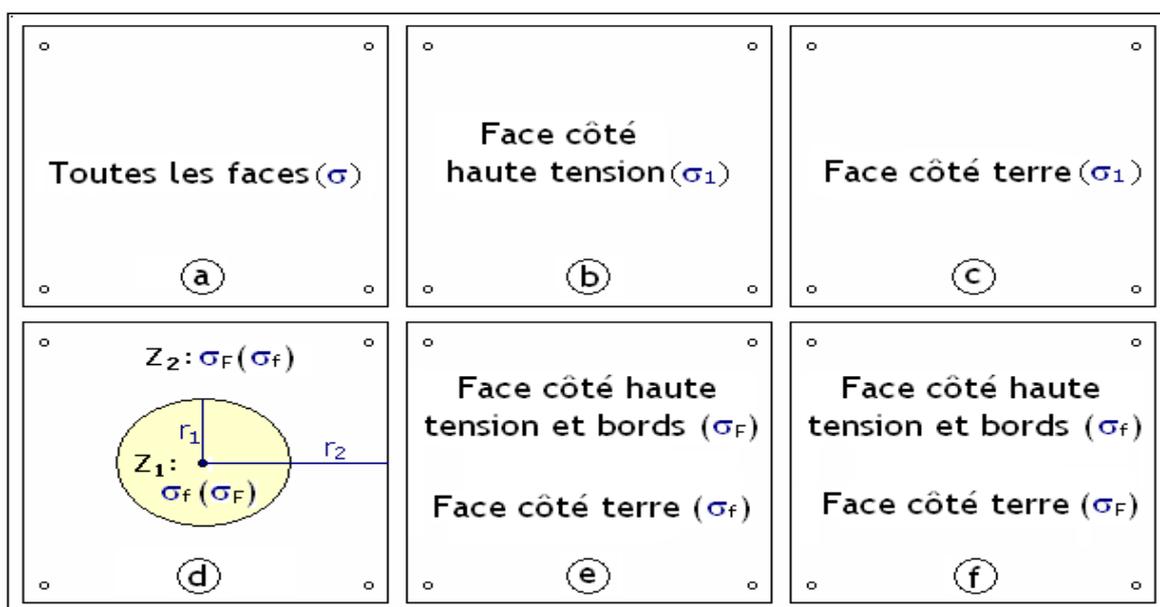
L'humidification est considérée comme un obstacle car elle influe négativement sur la tenue électrique des isolations puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés à leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue [41].

#### 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 importante. 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 [41].

### 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] ( $\sigma_f$  : conductivité faible,  $\sigma_F$  : conductivité forte)

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, 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 une surface isolante 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 du réseau 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 nationale 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 [36]

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 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) [35]

Il s'agit de dépôt équivalent, en milligramme de NaCl /cm<sup>2</sup> 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 le 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.

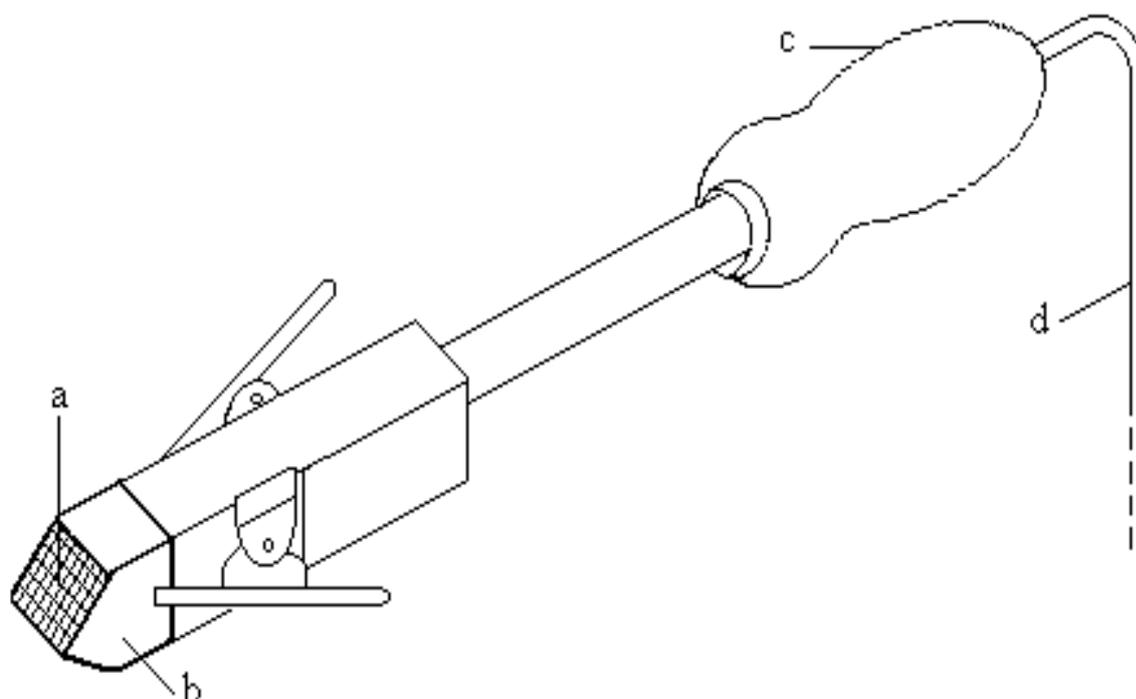
### III. 8. 2 Dispositif de mesure de conductivité superficielle à l'aide d'une sonde mobile

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**).

#### Description du dispositif et du procédé de mesure [36]



**Fig. III. 2:** Dispositif allemand de surveillance de la sévérité de pollution SLM 10 (a: Sonde à électrodes planes, b: 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 interélectrode;  $b = 10$  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;
- vérifier que la conductivité superficielle propre de la bande absorbante  $\sigma_p$  ne dépasse pas  $2 \mu\text{S}$ ;
- 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:

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

Où :

$\sigma_r$  est la conductivité superficielle réelle donnée par la formule **III. 1**;

$\sigma_p$  est la conductivité propre de la bande absorbante.

### III. 9 Classification des niveaux de pollution atmosphérique extérieure [36]

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) [36] ( $\sigma_s = 5$ a $10 \mu\text{S}$ )

- 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) [36] ( $\sigma_s = 10$ a $15 \mu\text{S}$ )

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) [36]** ( $\sigma_s = 15$  a  $30 \mu\text{S}$ )

- 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) [36]** ( $\sigma_s = 30$  a  $50 \mu\text{S}$ )

- 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  $10 \mu\text{S}$  [43 - 45].

**III. 11 Méthodes de simulation de la pollution**

Bien que de nombreuses méthodes d'essais aient été imaginées pour simuler avec plus au 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 [36]**

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 [36]

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 [36]

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 [36]

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/m<sup>3</sup>.

Dans la méthode du brouillard salin la production du brouillard est spécifiée d'une manière suffisamment détaillé 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 [36]

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.

**Tableau. III. 1:**Equivalence entre pollution naturelle et méthode de pollution artificielle [46]

Niveau de pollution		Pollution artificielle : sévérité équivalente		
		Brouillard salin Salinité g /l	Couche solide Densité de NaCl équiva mg/cm <sup>3</sup>	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	30 à 50

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.

### **III. 12 Techniques de lutte contre la pollution [36]**

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 de rechercher l'équivalence électrique existant entre un système pointe – pointe avec deux barrières polluées et un système plan – plan métalliques sous tension alternative à fréquence industrielle 50 Hz, dans un intervalle d'air variant entre 2 et 14 cm.

Pour une distance séparant les deux barrières en verre, en contact avec les pointes sous tension et à la terre et une sévérité du degré de pollution de celle-ci données, la tension disruptive de l'espace d'air inter-barrières variable a été mesurée plusieurs fois (20 mesures) et une valeur moyenne de celle-ci a été déterminée.

Pour les mêmes intervalles d'air, la tension de claquage de l'espace d'air entre le système plan - plan sous atmosphère sèche et/ou les deux plans métalliques recouverts de gouttes d'eau a été aussi déterminée.

Enfin tous ces essais ont été appuyés par la visualisation du phénomène électrique se développant dans l'espace d'air interélectrode des différentes configurations d'électrodes avec barrières sous des conditions de pollution très sévères.

## IV. 2 Dispositif expérimental et techniques de mesure

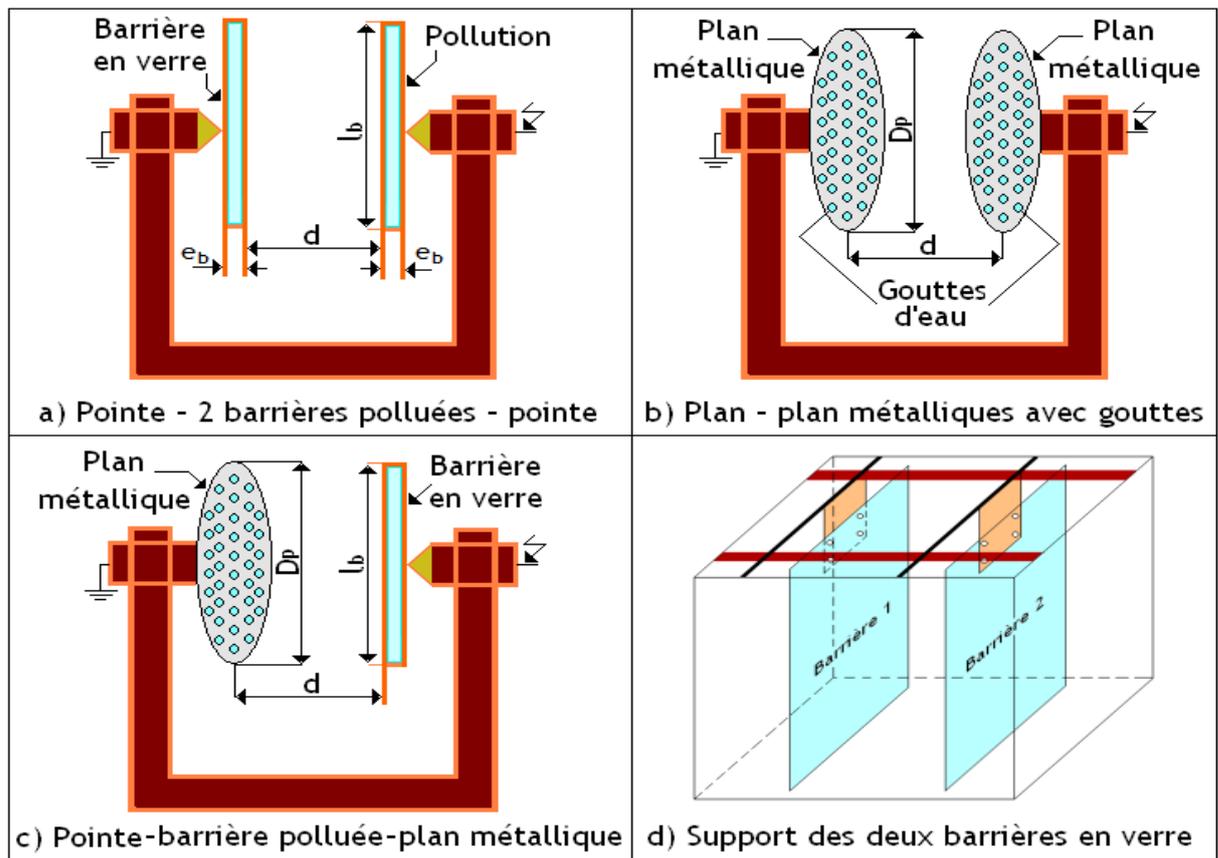
### IV.2.1 Modèle expérimental

Le modèle expérimental est illustré par la figure **IV.1**. Celui-ci est composé d'un support en bois en forme de U, ayant 44 cm de hauteur et 33 cm de longueur, et sur le quel sont encastrés deux bras en bois. Sur ces derniers sont vissées des électrodes pointues (**Fig IV. 1 a**), planes (**Fig IV. 1. b**) ou pointe et plan (**Fig IV. 1. c**). Chacune des deux électrodes pointues est constituée d'une tige cylindrique en bronze de 20 mm de diamètre et 150 mm de longueur. Celle-ci est terminée par une pointe conique en bronze ayant un angle de 60° et de 2.50 mm de rayon de courbure. Elles peuvent être aussi vissées sur les tiges sortant des deux bras du support en U. Les deux électrodes planes circulaires et métalliques ont 40 cm de diamètre et de 6 mm d'épaisseur. La distance dans l'air entre ces deux électrodes de base varie entre 2 et 14 cm.

Les barrières isolantes exploitées dans notre cas sont en verre, de forme carrée de 6 mm d'épaisseur et de 40 cm de largeur.

La fixation de chacune des deux barrières sur un support en bois cubique de 65 cm de côté et leur maintien perpendiculaires aux deux pointes est réalisé au moyen de deux autres supports en bois en forme de T coulissant sur une rail en bois installée sur la paroi supérieure du cube. Les barrières sont attachées à ce support à l'aide de chevilles en plastique (**Fig. IV. 1.d**). Les deux supports suscités

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 ( $d + 2 e_b$ ) et inter-barrières ( $d$ ). Ce dispositif est déposé sur une table en bois métallisée et reliée à la terre. Une paroi isolante en verre d'une épaisseur de 1 cm est placée sur la table afin de renforcer l'isolement du modèle expérimental de la partie métallisée de la table mise à la terre.



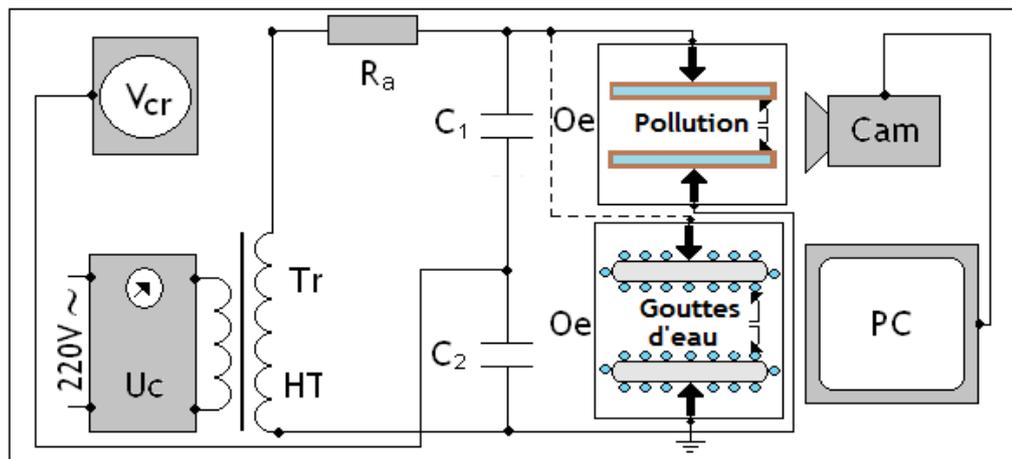
**Fig . IV. 1 :** Modèle expérimental pointe – pointe avec deux barrières contaminées plan – plan avec gouttes d’eau et pointe – plan avec une barrière polluée ( $D_p$ : diamètre du plan métallique circulaire;  $l_b$  : largeur de la barrière en verre;  $e_b$  : son épaisseur)

#### IV. 2. 2 Circuit de mesure électrique et de visualisation

La mesure de la performance du système avec barrières polluées et la visualisation de la décharge électrique évoluant dans l’espace d’air interélectrode de celui-ci peuvent être réalisées à l’aide du schéma électrique illustré par la figure IV. 2.

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 – 2 barrières – pointe ou le système plan – plan métalliques recouverts de gouttes d'eau. 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 d'air interélectrode du système et d'un PC pour une meilleure observation et analyse de celles-ci.



**Fig. IV. 2:** Circuit de mesure de la tension disruptive du système pointe – pointe avec barrières polluées et de visualisation de la décharge électrique

### IV. 2. 3 Composition de la solution polluante

La solution polluante utilisée est composée d'un mélange d'eau de robinet, 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**).



$\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$

$\sigma_v = 50 \text{ mS/cm}$

**Fig. IV. 3:** Appareil de mesure de la conductivité volumique des solutions polluantes (Conductimètre)

La mesure de la conductivité superficielle de la barrière isolante contaminée est effectuée au moyen du conductimètre à sonde mobile. Les conductivités volumiques utilisées dans le cadre de cette étude sont égales à 25 et 50 mS/cm.

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

Concernant l'application de la solution polluante, deux modes de distribution de celle-ci ont été utilisés :

- répartition uniforme de la pollution sur les deux grandes faces des barrières et leurs trois bords.
- répartition non uniforme où seulement la face de la barrière en regard des électrodes sous tension et à la terre et les trois bords ont été contaminés.

La couche de pollution sur les barrières a été appliquée comme suit :

Nous prélevons à l'aide d'une seringue une quantité constante de 3 ml de la solution polluante que nous avons préalablement bien agité et que nous déposons par la suite uniformément sur une éponge propre.

La mise sous tension d'essai du système d'électrodes considéré est effectuée immédiatement après l'application de la pollution sur la surface 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 absorbant. La pollution est déposée à l'aide de l'éponge imbibée de la solution polluante sur la surface de la barrière sous forme de bandes de pollution de 8 cm de taille, disposées en parallèle et reliées les unes aux autres de telle sorte à obtenir une seule couche continue de même épaisseur tout le long de la surface de la barrière en verre.

#### IV. 2. 5 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques [47]

La tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système électrique avec barrière polluée est strictement lié aux conditions atmosphériques nominales, dont on trouve la température ambiante, la pression et l'humidité de l'air environnant. La valeur de la tension disruptive ramenée aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$  ( $\theta_0 = 20$  °C,  $P_0 = 100$  kPa et  $H_0 = 11$  g/m<sup>3</sup>), est donnée par la relation suivante:

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

Avec:

$U_m$ : tension disruptive mesurée à la température  $\theta$ , à la pression  $P$  et à l'humidité  $H$ ;

$U$ : tension disruptive ramenée aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$ .

$K_d$ : facteur de correction relatif à la température  $\theta$  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  $\theta$  en  $^{\circ}\text{C}$

$K_h$ : 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  $H$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), 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.

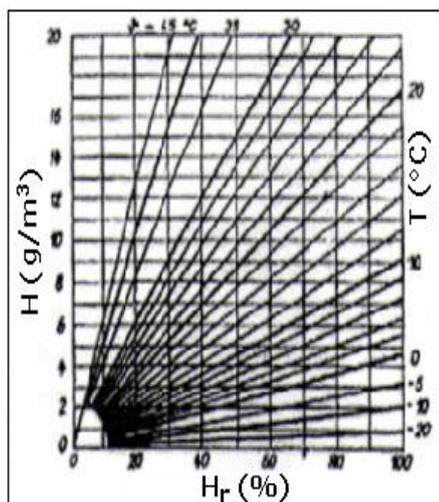


Fig. IV. 4:  $H = f(H_r, T)$

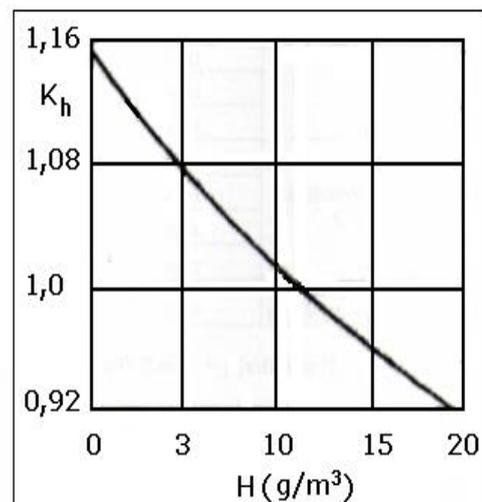


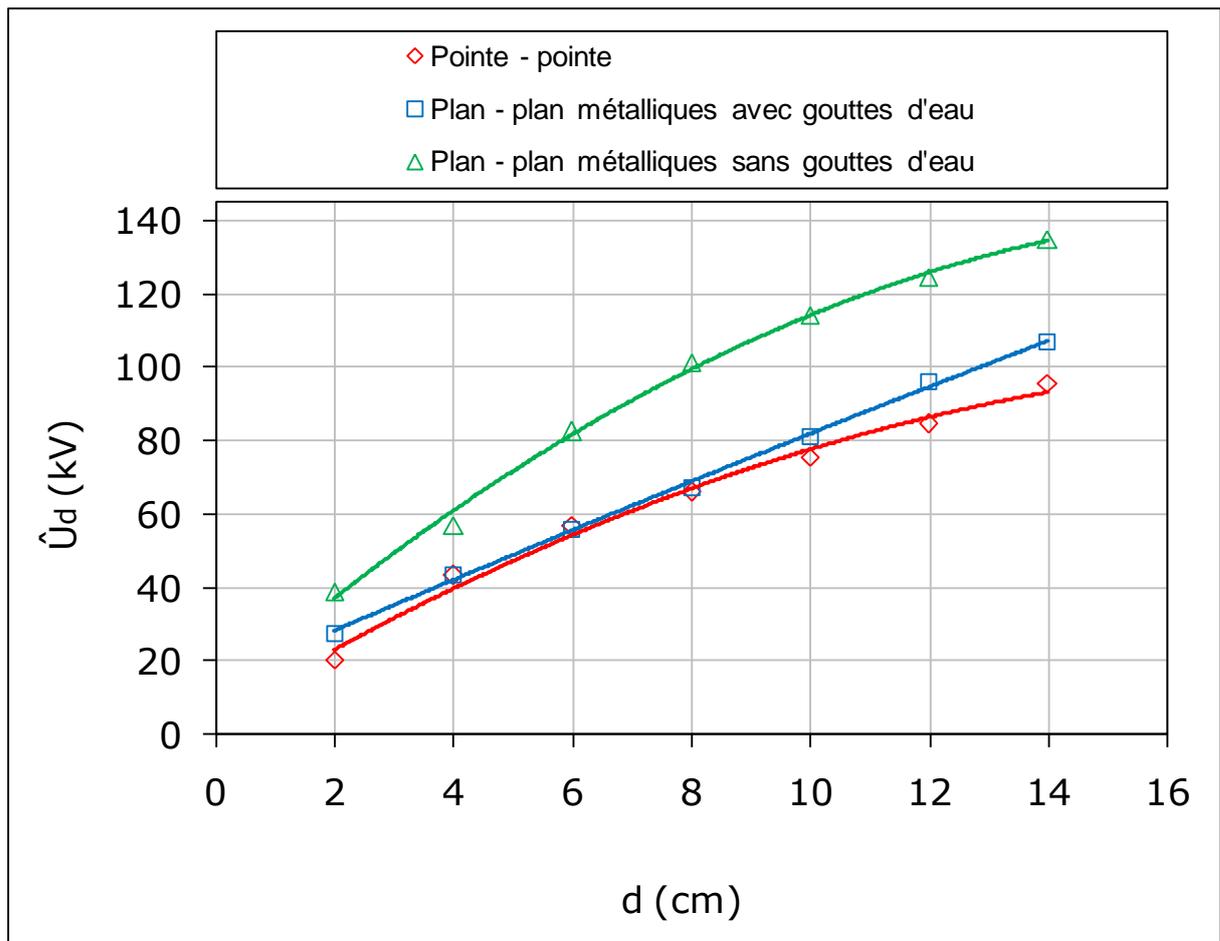
Fig. IV. 5:  $K_h = f(H)$

### IV. 3 Résultats et discussions

#### IV. 3. 1 Disruption d'un intervalle d'air variable entre deux plans conducteurs secs ou recouverts de gouttes d'eau

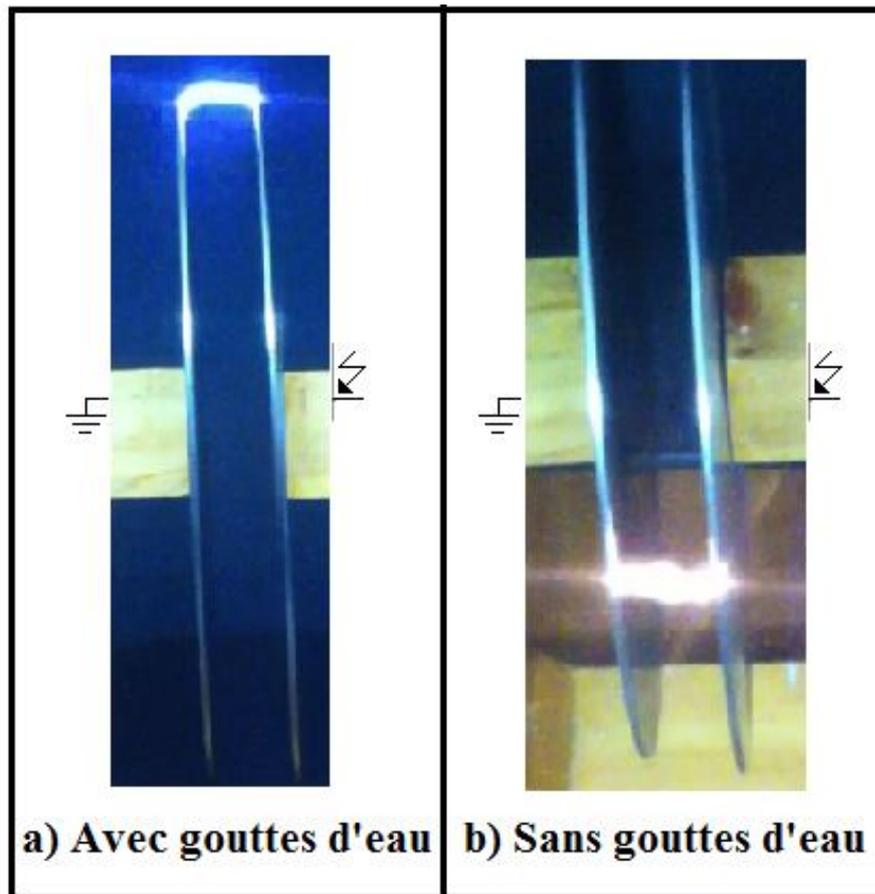
La tension disruptive de l'intervalle d'air du système plan – plan avec ou sans gouttes d'eau est illustrée par la figure IV. 6. Il en résulte que pour une taille donnée de ces électrodes planes et

métalliques de 40 cm de diamètre et pour des intervalles d'air variant entre 2 cm et 14 cm, la tension de disruption de l'espace d'air des systèmes étudié croît en fonction de leur distance interélectrode. De plus la tension de rupture de l'intervalle d'air plan – plan métallique avec gouttes d'eau est largement inférieure à la tension de claquage de celui-ci sans gouttes. Cela peut s'expliquer par le fait que les petites gouttes d'eau prennent la forme de petites saillies et perturbent ainsi le champ électrique régnant dans cet intervalle d'air et la tension d'amorçage de cette configuration est quasi-confondue avec celle du système pointe – pointe déterminée sur ce même espace d'air.



**Fig. IV. 6:** Tension disruptive de l'intervalle d'air des systèmes pointe – pointe métalliques et plan – plan métalliques (avec ou sans gouttes d'eau)

Il ressort de la visualisation (**Fig. IV. 7**) une seule décharge évoluant dans l'air du bord au bord des deux électrodes planes sans gouttes d'eau car c'est à ces endroits que le rayon de courbure est le plus faible. Concernant la configuration plan-plan avec gouttes d'eau nous constatons que la décharge évolue toujours du bord au bord des électrodes planes métalliques mais cette fois-ci des extrémités des gouttes déposées sur les bords dont leur géométrie est équivalente à des petits cônes générés suite à l'accentuation du champ électrique très intense aux bords des électrodes planes métalliques.

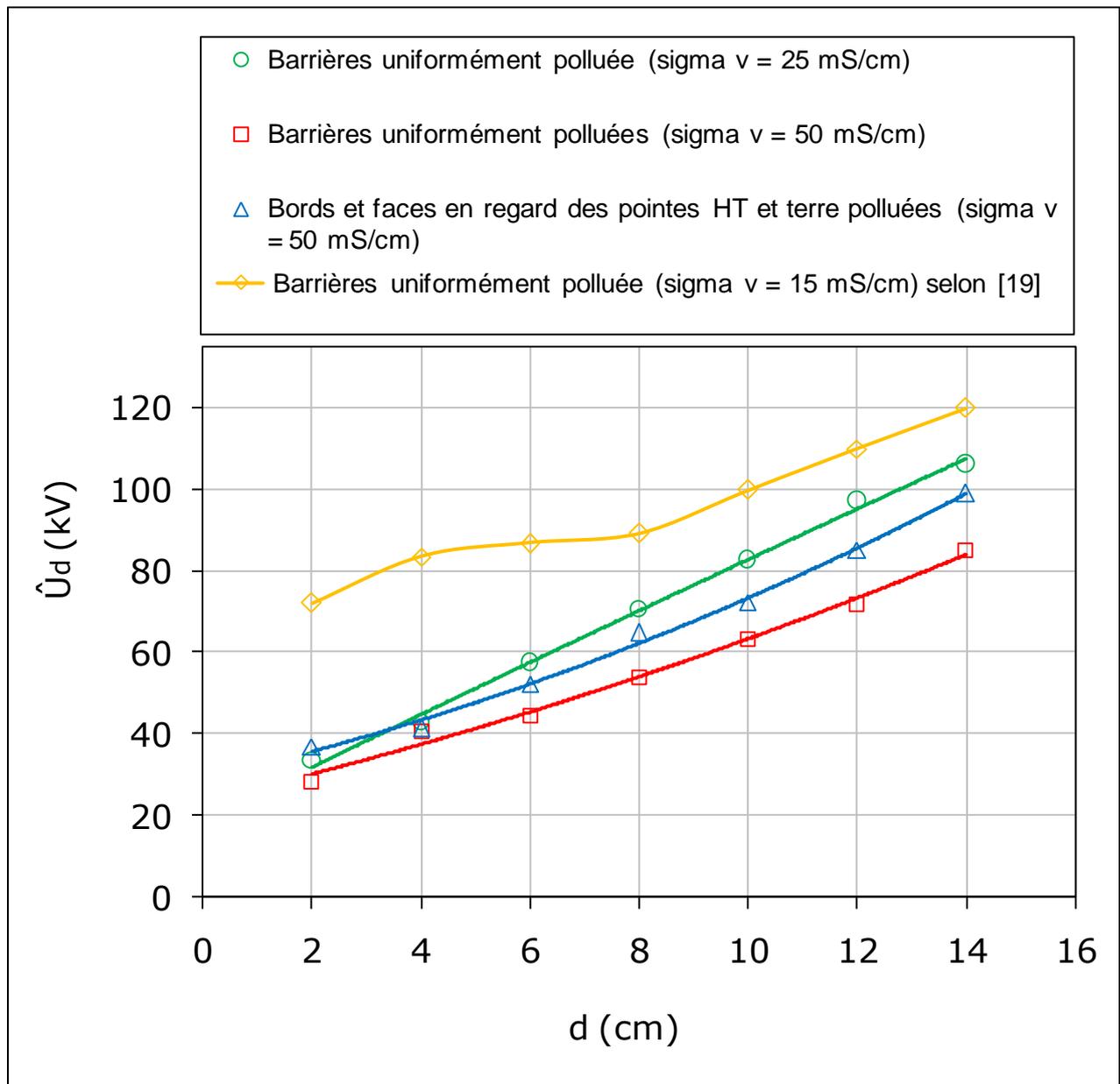


**Fig. IV. 7:** Disruption de l'intervalle d'air plan – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau

#### **IV. 3. 2 Disruption d'un intervalle d'air variable entre deux barrières polluées et en contact avec les pointes sous tension et à la terre**

L'allure de la tension de claquage de l'espace d'air du système avec deux barrières polluées de 40 cm de largeur, dont l'une est mise en contact avec la pointe sous tension et l'autre en contact avec la pointe mise à la terre, en fonction de la distance interélectrode, est illustrée par la figure **IV. 8**.

Il en résulte que la performance électrique d'un tel système croît avec la taille de l'intervalle d'air inter-barrières. Son minimum est atteint pour une valeur égale à 50 mS/cm de la conductivité volumique de la solution polluante, recouvrant uniformément toute la surface des deux barrières. De plus il est à souligner que la tension de rupture diélectrique de l'espace d'air avec barrières contaminées sous pollution uniforme est nettement inférieure à celle obtenue sous pollution non uniforme du fait du comportement des deux barrières uniformément polluées comme des barrières conductrices et de la meilleure uniformisation du champ électrique régnant entre celles-ci.



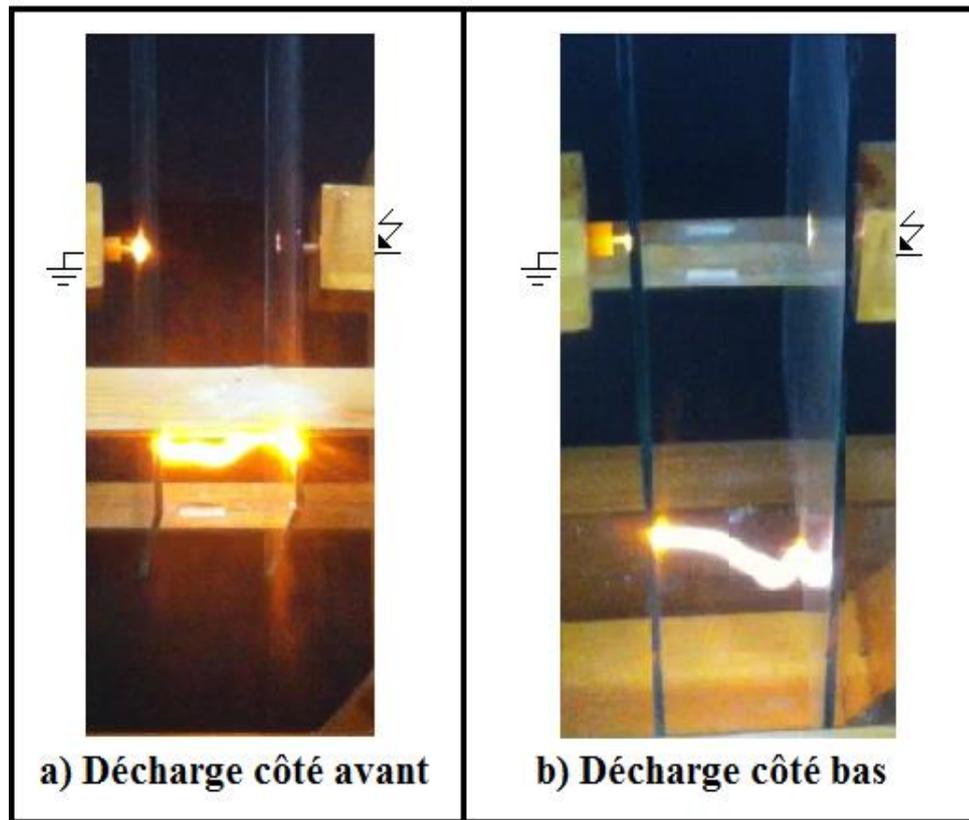
**Fig. IV. 8:** Tension disruptive de l'intervalle d'air des systèmes pointe – 2 barrières polluées –pointe en fonction du mode de distribution de pollution et de la conductivité de celle-ci.

Il ressort de la visualisation (**Fig. IV. 9**) une seule décharge électrique évoluant dans l'air compris entre les bords des deux barrières fortement contaminées.

Nous constatons que la décharge emprunte de façon équitable l'un des trois chemins reliant les deux bords des barrières :

Soient les deux bords du bas des barrières ou ceux situés du côté avant ou bien ceux du côté arrière des deux barrières. Mais ce qu'il faut aussi souligner dans ce cas de figure, c'est l'absence de glissement des deux décharges électriques sur les faces des barrières polluées en regard des deux pointes sous tension et à la terre, vu l'aspect conducteur de la couche de pollution déposée sur la

surface des deux barrières d'où leur équivalence électrique à des électrodes planes métalliques pour une conductivité électrique de cette couche égale à 25 mS/cm.



**Fig. IV. 9:** Chemin de la décharge électrique reliant les bords des deux barrières uniformément et fortement polluées en contact avec les pointes sous tension et à la terre du système ( $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$ ).

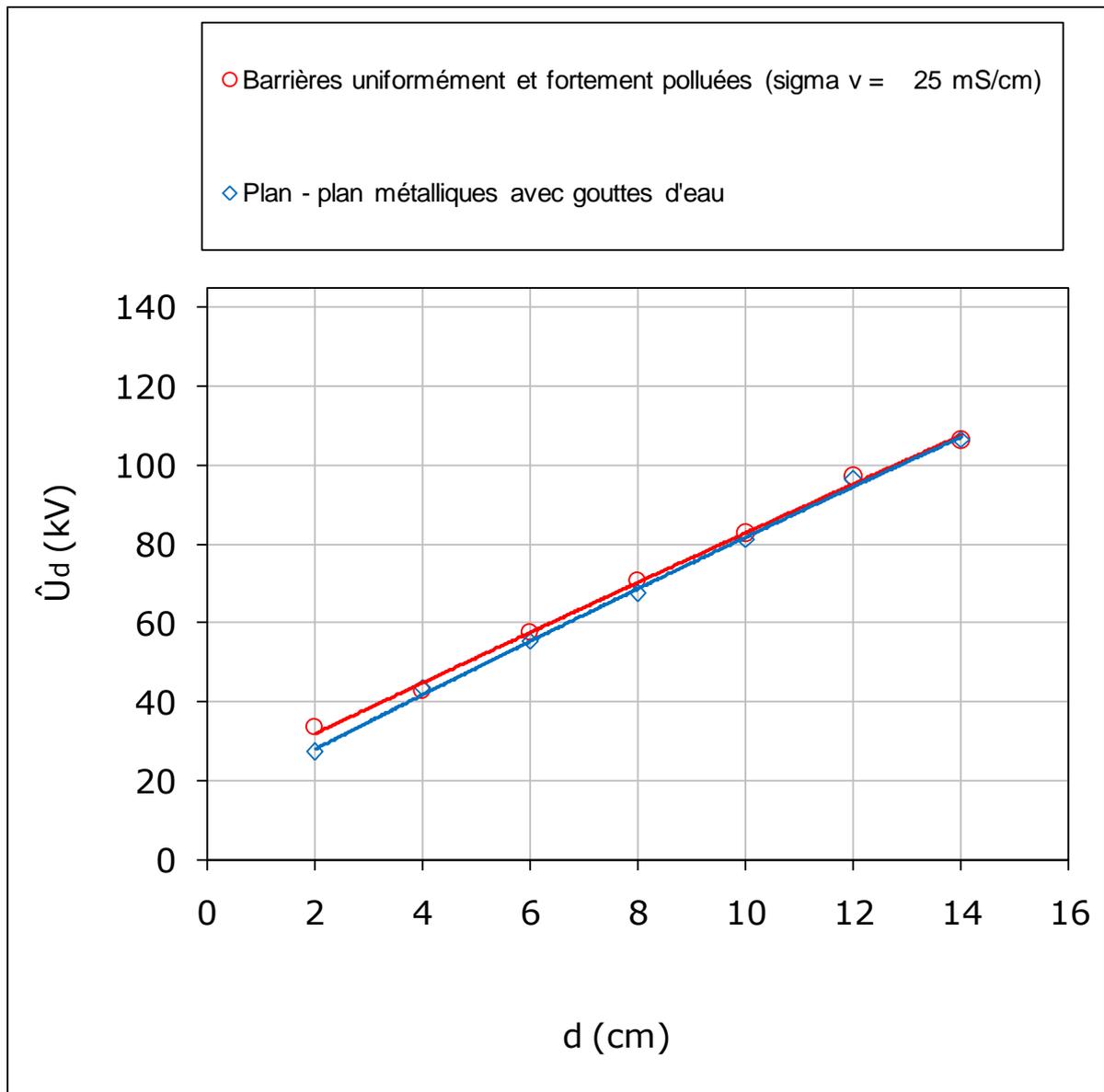
#### IV. 3. 3 Equivalence électrique entre plan – plan métalliques et pointe – pointe protégée par deux barrières fortement et uniformément polluées

L'allure de la tension disruptive de l'espace d'air du système plan – plan avec gouttes d'eau et celui du système pointe - pointe protégé par deux barrières polluées de 40 cm de largeur et mises au contact avec les pointes sous tension et à la terre est illustrée par la figure IV.10.

Il découle de la figure IV. 10 une équivalence électrique entre un système pointe – pointe protégé par deux barrières contaminées uniformément avec un dépôt polluant de conductivité volumique égale à 25 mS/cm et une configuration plan – plan métalliques recouverts de gouttes d'eau de conductivité électrique égale à 1200  $\mu\text{S/cm}$ .

Sur les barrières mises sous condition de pollution humide (eau+sel+kaolin) se déposent des petits grains issus du kaolin insoluble dans l'eau de la solution préparée. Leur effet sur la distorsion du champ électrique régnant entre deux barrières en verre uniformément et fortement polluées est

pratiquement équivalent à celui généré par des gouttelettes d'eau de robinet déposées sur deux plans métalliques de diamètre égal à la largeur des barrières en verre et séparés par une même distance dans l'air que celle séparant les deux barrières isolantes polluées mises sous la même contrainte de tension.

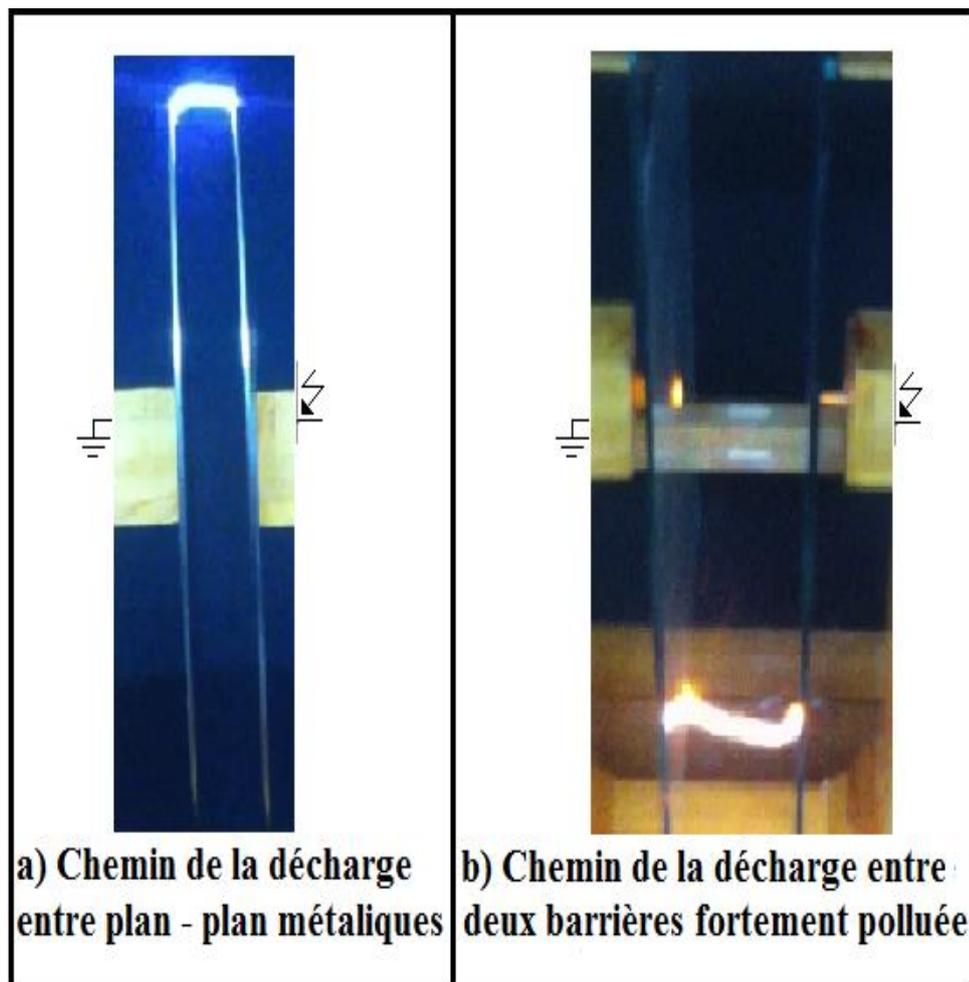


**Fig. IV. 10:** Comparaison de la performance électrique entre un système pointe – pointe protégé par deux barrières uniformément et fortement polluées, et un système plan – plan métalliques avec gouttes d'eau

Il ressort de la visualisation de l'évolution de la décharge électrique dans le cas de deux barrières polluées et mises en contact avec les pointes sous tension et à la terre que la disruption d'un tel espace d'air est régi pratiquement par une seule décharge reliant les bords des deux barrières fortement contaminées comme si celles-ci sont équivalentes à des électrodes métalliques. La

décharge électrique de rupture ne glisse plus sur leur surface. Les décharges électriques issues de la pointe sous tension et celle mise à la terre sont réduites à deux points lumineux qui ne glissent pas sur les faces des barrières. La liaison entre ces deux décharges est établie par le biais des lignes de courant reliant ces dernières.

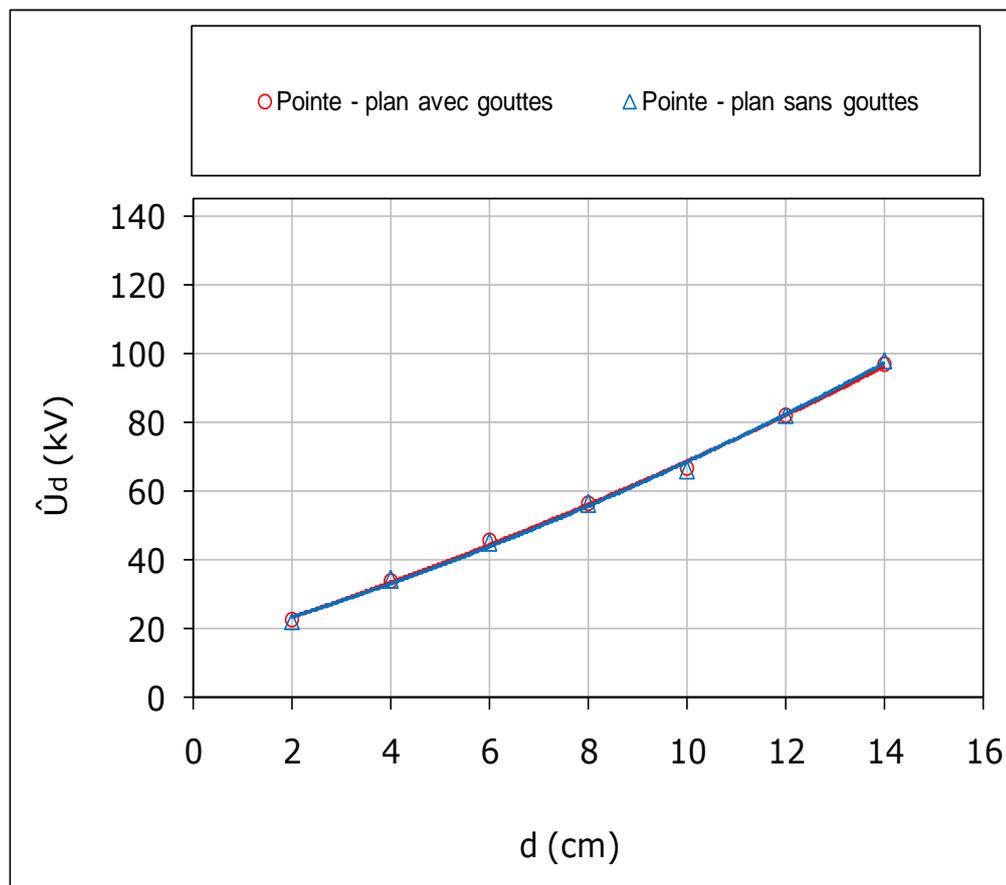
Il est à souligner aussi que le chemin emprunté par la décharge dans le système plan – plan métalliques est le même que celui établi dans un système pointe – pointe protégé par deux barrières polluées.



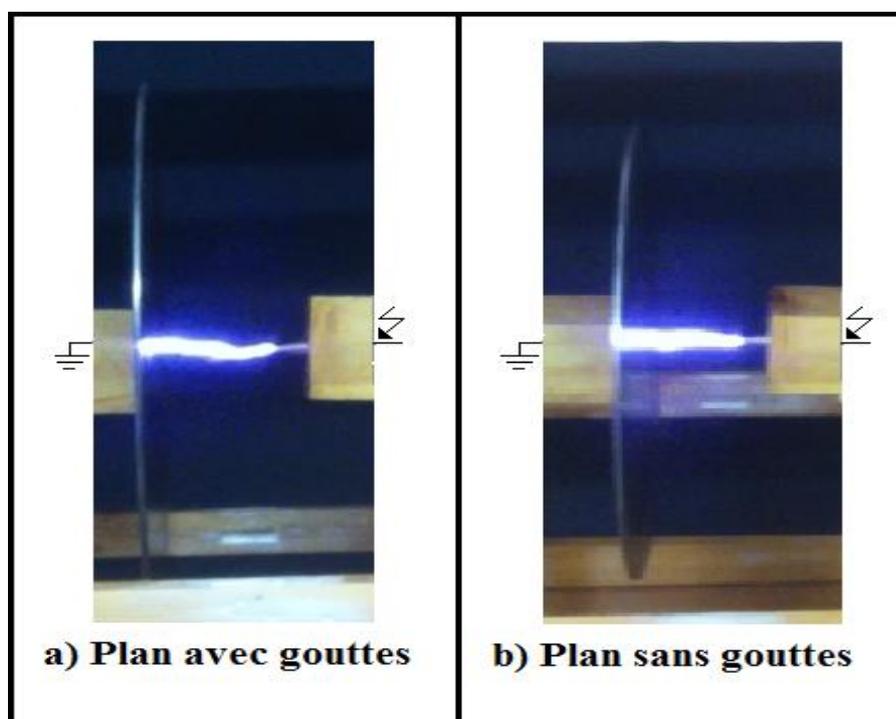
**Fig. IV. 11:** Chemin de la décharge électrique court-circuitant l'intervalle d'air compris entre deux configurations plan – plan métalliques avec gouttes d'eau et pointe -2 barrières uniformément et fortement polluées – pointe

#### IV. 3. 4 Claquage d'un espace d'air à champ électrique non uniforme pointe – plan sous atmosphère propre et sèche ou humide

L'allure de la tension disruptive de l'espace d'air du même système pointe – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau est illustrée par la figure IV.12.



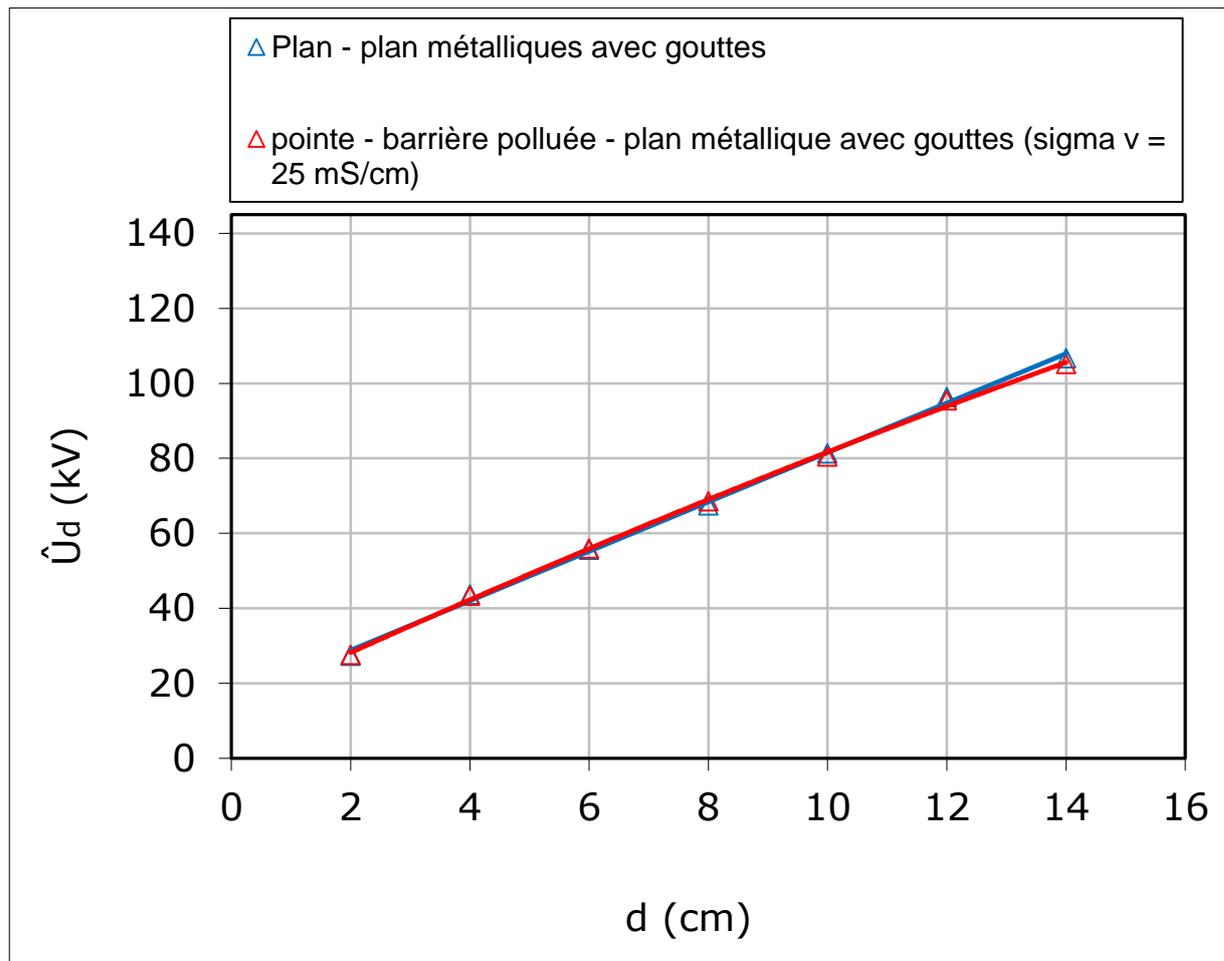
**Fig. IV. 12:** Tension disruptive de l'intervalle d'air du système pointe – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau



**Fig. IV. 13:** Chemin de la décharge électrique dans le cas d'un système pointe – plan métallique avec ou sans gouttes d'eau

### IV. 3. 5 Equivalence électrique entre un système pointe conductrice – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d'eau et plan – plan métalliques recouverts de gouttes d'eau

L'allure de la tension de rupture de l'espace d'air du système plan – plan métalliques avec gouttes et celui du système pointe – plan métallique avec gouttes protégé par une barrière recouverte d'un dépôt polluant de conductivité électrique égale à de 25 mS/cm, est illustrée par la figure IV.14.

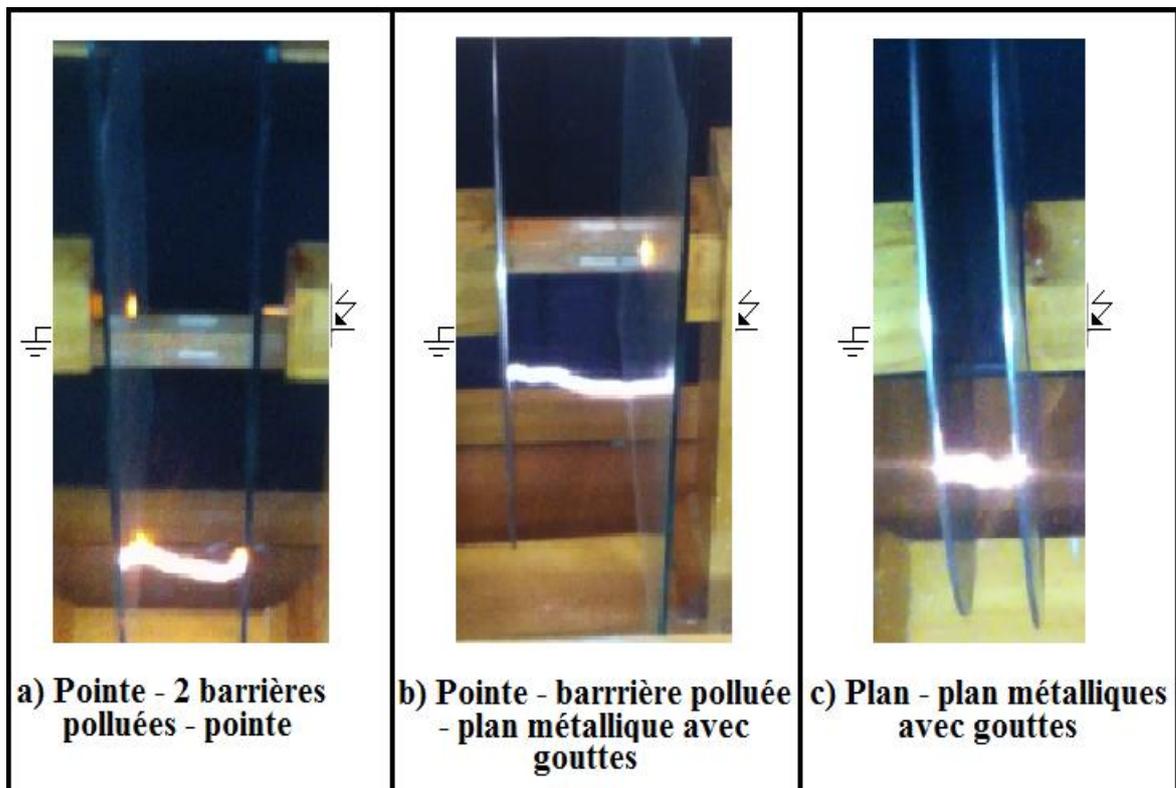


**Fig. IV. 14:** Rupture de l'intervalle d'air du système plan – plan métalliques avec gouttes et pointe – barrière polluée – plan métallique recouvert de gouttes d'eau ( $\sigma_v = 25$  mS/cm)

Il découle de la figure IV. 14 une superposition quasi-parfaite des courbes de performance électrique des deux systèmes plan – plan métalliques recouverts de gouttes d'eau et pointe – plan métallique avec gouttes protégé par une barrière uniformément polluée. Cela s'explique par l'équivalence électrique entre une barrière fortement polluée et un plan métallique recouvert de gouttes d'eau. Ceci trouve sa justification dans le fait que les gouttes d'eau recouvrant le plan métallique prennent la forme de petites saillies et perturbant ainsi le champ électrique y régnant, et la pollution contenant le

kaolin insoluble dans l'eau et des grains de sel de cuisine se traduit par de petits grains entraînant la distorsion du champ électrique régnant dans la configuration suscitée, de la même façon que les gouttes d'eau dans le système plan – plan métalliques avec gouttes.

Il ressort de la visualisation de l'évolution de la décharge électrique dans l'espace d'air de ces trois configurations que la disruption de leur intervalle d'air se manifeste identiquement par une seule décharge, décrivant un chemin pratiquement similaire qui s'effectue du bord au bord des dites électrodes conductrices de ces trois systèmes, d'où l'équivalence de leur performance électrique (**Fig. IV. 14**) dans l'intervalle d'air variant entre 2 et 14 cm.



**Fig. IV. 14:** Evolution de la décharge dans le cas des systèmes pointe-pointe protégé par deux barrières en verre polluées, pointe – barrière en verre polluée – plan métallique avec gouttes et plan – plan métalliques recouvert de gouttes d'eau

#### IV. 4 Conclusion

L'étude de la disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme pointe - pointe avec deux barrières ou pointe – plan protégé par une barrière sous une atmosphère fortement polluée et soumis à une tension alternative 50 Hz a mené aux résultats essentiels suivants:

- Etablissement de l'équivalence de la performance électrique des systèmes pointe - 1 barrière - pointe et pointe - plan.

- L'ajout d'une deuxième barrière au système pointe - 1 barrière - pointe sous atmosphère fortement polluée rend sa performance électrique équivalente à celle d'un plan - plan métalliques sur les quels sont déposées des gouttes d'eau.
- Le système à champ électrique non uniforme pointe - barrière - plan métallique sous une atmosphère fortement polluée et à plan métallique recouvert de gouttes d'eau de robinet qui a une conductivité électrique largement inférieure à celle la barrière polluée se trouve équivalent du point de vue performance électrique au système plan - plan métalliques recouverts de gouttes d'eau de même conductivité.
- Existence d'une possibilité de modélisation de la performance électrique des systèmes pointe - 2 barrières polluées - pointe et pointe - 1 barrière polluée - plan métallique avec gouttes d'eau au moyen de celle du système conventionnel plan - plan métalliques recouverts de gouttes d'eau de robinet de conductivité électrique égale à  $1200 \mu\text{S}/\text{cm}$  dans l'intervalle d'air interélectrode variant entre 2 et 14 cm.

*Conclusion générale*

**Conclusion générale**

L'objectif principal de notre étude expérimentale est la recherche de l'équivalence entre un système pointe – pointe protégé par deux barrières en verre mises en contact avec les deux pointes sous tension et a la terre et un système plan – plan métalliques de même surface sous conditions de pollution très sévères et sous une tension alternative 50 Hz.

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

La tension de rupture de l'intervalle d'air plan – plan métallique avec gouttes d'eau est largement inférieure à la tension de claquage de celui-ci sans gouttes.

La tension de rupture diélectrique de l'espace d'air avec barrières contaminées sous pollution uniforme est nettement inférieure à celle obtenue sous pollution non uniforme.

L'équivalence de la performance électrique entre un système pointe – pointe protégé par deux barrières contaminées uniformément avec un dépôt polluant de conductivité volumique égale à 25 mS/cm et une configuration plan – plan métalliques recouverts de gouttes d'eau de conductivité électrique égale à 1200  $\mu$ S/cm a été établie.

Les gouttes d'eau déposées sur le plan n'exercent aucune influence sur la performance électrique du système pointe – plan métalliques, dans l'intervalle d'air compris entre 2 et 14 cm.

L'équivalence électrique entre une barrière fortement polluée et un plan métallique recouvert de gouttes d'eau a été établie.

L'équivalence de performance électrique des deux systèmes plan – plan métalliques recouverts de gouttes d'eau et pointe – plan métallique avec gouttes protégé par une barrière uniformément polluée a été quantifiée.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

---

- [1] **A. Roth**, «Hochspannungstechnik». Berlin, 1927, p. 118.
- [2] **E. Marx**, «Der elektrische Durchschlag von Luft-inhomogenen Feld». Arch. Elek. Bd. 24. 1930. P. 61.
- [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, p.411.
- [6] **N. F. Wolochtchenko**, «Problèmes relatifs au mécanisme de l'effet de barrière». En Russe. Elekritchestwo, n°6, 194, p. 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, p.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». 12<sup>th</sup> 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<sup>ème</sup> 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». PFE Master 2, 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<sup>ème</sup> Journée internationale d'électrotechnique de maintenance et de compatibilité électromagnétique papier n° HT-12, Oran 2010, Algérie.
- [16] **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.
- [17] **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<sup>ème</sup>

## Bibliographie

---

Conférence Internationale sur la maintenance, la gestion, la logistique et l'Electrotechnique, Oran 2012, Algérie.

[18] **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.

[19] **N. Yahiaoui et N. Zidane**,« 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». Mémoire fin d'études de master soutenu à l'Université de A. Mira Bejaïa, juin 2015.

[20] **M. Aguet et M. Lanoz**, «Vocabulaire Electrotechnique International, Dispositifs électriques et magnétiques» In «Haute Tension». Pub. CEI, No. 50 (151), Genève, 1978.

[21] «méthode recommandées pour la mesure des résistivités transversales et superficielles d'un matériau isolant électrique ». Publ. CEI, No.93, Genève, 1958.

[22] «méthode d'essai pour la détermination de la résistance des isolants solides ». Publ. CEI, No.167, Genève, 1964.

[23] «méthode d'essai recommandées pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériaux isolants solides aux fréquences industrielles ». Publ. CEI, No.243, Genève, 1963.

[24] **M. Nemamcha**, «hautes tensions : Claquage des isolants» livre, OPU, 2001.

[25] **A. Chabloz**, «Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité» In M. Aguet et M. Lanoz, «Haute Tension».1986.

[26] **R. Boudissa**, «Technique d'isolation». Cours Master II, 2015, Université de Bejaia, Algérie.

[27] **J. Phalippou**, «verre : aspects théorique». Technique de l'ingénieur, référence AF3600, Montpellier, juillet ,2001.

[28] **X. Ducouret**, «Lignes aériennes: matériels isolateurs». Technique de l'ingénieur, référence D 4423, Paris 2006

[29] **J. P. Mercier**, «Polymérisation des monomères vinyliques, Procédés et matériaux nouveaux». Première édition Presses Polytechnique Romandes, Suisse, 1983.

[30] **R. Boudissa**,«performance des écrans sous tension alternative et continue». CNHT 2009, Sidi Bel Abbés, 2009, Algérie

[31] **D. Djemai**, «de la propagation des streamers à l'interface liquide/solide sous tension alternative 50 Hz » Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1991.

[32] **L. Niemeyer**, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann, «Fractal dimension of dielectric breakdown", Phys. Rev. Lett., Vol. 33, pp. 1033-1036, 1984.

[33] **L. Kebbabi** « Caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension ». Thèse de Doctorat, école centrale Lyon , 2006.

## Bibliographie

---

- [34] **M. A. Handala, O. Lamrous**, « Etude de courant de préclaquage d'une interface isolante solide/air », 7<sup>ème</sup> CNHT' 2009. Sidi Bel- Abbès, p 40, 19-21 Avril 2009.
- [35] **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.
- [36] **F. Amir et KH. Namaoui**, « Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative ». Mémoire d'ingénieur, UAM, Juin 2004.
- [37] **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, Septembre 1999.
- [38] **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.
- [39] **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.
- [40] **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.
- [41] [http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro\\_isolateur.html](http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro_isolateur.html).
- [42] **P. S. Ghosh, N. Chatterjee**, « Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage ». IEEE Trans. On Diel. and Elect. Insul. vol. 2, N°. 1, pp. 128-136, February 1995.
- [43] **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.
- [44] **R. Baersch**, « Elektrisches Verhalten von polymeren Isolierstoffen unter Freiluft- und erschwerten klimatischen Innenraumbedingungen ». RCC-Fachtagung Tagungsband S. 29-47, Deutschland, 2006.
- [45] **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.
- [46] **Georges Le Roy, Cloude Gary, Bernard Hutzier, Jacques Lalot, Christien Dubanton**, « Les

## Bibliographie

---

propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions». P 298. Paris, Eyrolles, Juillet 1984.

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