

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

***Mémoire de Master deux***  
***en Génie Electrique***  
***Spécialité Electrotechnique***

***Option : Technique de haute tension***



**Etude comparative**  
**de la performance électrique de deux configurations**  
**plan - plan et pointe - barrière isolante – plan sous**  
**tension continue et conditions de pollution très sévères**

***Réalisé par :***

**M<sup>r</sup> HAROUN Khaled**

**M<sup>r</sup> BOUDRAA Djillali**

**Soutenu publiquement devant le jury composé de :**

<b>M<sup>r</sup></b>	<b>RAHMANI</b>	<b>Allaoua</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ. Bejaïa</b>	<b>Président</b>
<b>M<sup>r</sup></b>	<b>HERZINE</b>	<b>Md Seghir</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ. Bejaïa</b>	<b>Examineur</b>
<b>M<sup>r</sup></b>	<b>BOUDISSA</b>	<b>Rabah</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Bejaïa</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M<sup>me</sup></b>	<b>BOUATIA</b>	<b>Nawal</b>	<b>Doctorante</b>	<b>Univ. Bejaïa</b>	<b>Co-Rapporteur</b>

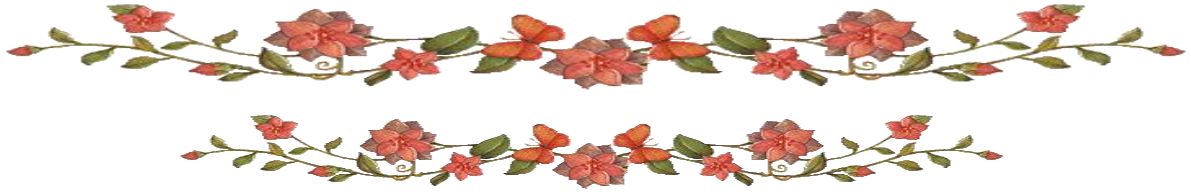
**Année universitaire : 2016 /2017**

## *Remerciement*

*Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme. Arrivé au terme de notre travail, nous tenons à exprimer vivement notre profonde gratitude à notre promoteur **M<sup>r</sup> R. BOUDISSA** et notre Co-promotrice **M<sup>lle</sup> N. BOUATIA**, pour l'aide, le suivi et l'intérêt qu'ils n'ont cessés de nous apporter jusqu'à l'achèvement de notre travail. Nous remercions **M<sup>me</sup> T. BOUGHANI** a généreusement fait profiter de ses connaissances en haute tension et pour son aide et ses conseils utiles.*

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

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



## *Dédicace*

*A ma très chère mère, qui représente pour moi l'exemple du*

*Sacrifice du dévouement, et de l'honnêteté*

*A mon père, symbole de patience et du courage*

*Mes très chères sœurs Kahina et Faiza*

*Mes très chers frères Hocine et Lyazid*

*Aux enfants de ma sœur et son époux*

*A Tous mes Ami (e)s, chez lesquels j'ai trouvé*

*Réconfort et soutien dans les moments les*

*Plus pénibles*

*Que je dédie ce travail*

*B. Djillali*





## **Dédicaces**

*A mes parents, qui représentent pour moi l'exemple du  
Sacrifice, du dévouement, de l'honnêteté et du courage*

*Mes très chères sœurs et ma grand-mère*

*A les familles Latbi, Hamga et zahnati*

*A Tous mes Ami (e)s, chez lesquels j'ai trouvé*

*Réconfort et soutien dans les moments les*

*Plus pénibles (Djillali, Ghilas, Athmane, ... etc*

*Que je dédie ce travail*

*K, Haroun*



# Sommaire

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I**

### **Etat d'art sur la performance électrique des barrières isolantes**

<b>I. 1</b> Introduction .....	3
<b>I. 2</b> Investigations antérieures sur l'équivalence de la performance électrique de deux configurations pointe – barrière isolante – plan et plan – plan sous conditions de pollution très sévères .....	3
<b>I. 2. 1</b> Atmosphère propre .....	3
<b>I. 2. 2</b> Atmosphère polluée .....	12
<b>I. 3</b> Conclusion .....	18

## **Chapitre II**

### **Pollution des barrières isolantes**

<b>II. 1</b> Introduction .....	20
<b>II. 2</b> Définitions .....	20
<b>II. 2. 1</b> Salinité .....	20
<b>II. 2. 2</b> Pollution .....	20
<b>II. 2. 3</b> Degré de pollution .....	21
<b>II. 2. 4</b> Couche de pollution .....	21
<b>II. 2. 5</b> Contrainte de contournement .....	21
<b>II. 2. 6</b> Conductance superficielle .....	21
<b>II. 3</b> Différents types de polluants.....	21
<b>II. 3. 1</b> Polluants dus aux activités humaines .....	21
<b>II. 3. 2</b> Polluants naturels .....	22
<b>II. 4</b> Sources de pollution .....	22
<b>II. 4. 1</b> Pollution industrielle .....	22
<b>II. 4. 2</b> Pollution naturelle .....	22
<b>II. 4. 2. 1</b> Pollution désertique .....	22
<b>II. 4. 2. 2</b> Pollution marine .....	23
<b>II. 4. 2. 3</b> Autres types de Pollution naturelle .....	23
<b>II. 4. 3</b> Pollution mixte .....	23
<b>II. 5</b> Facteurs climatiques d'influence de la pollution .....	23
<b>II. 5. 1</b> Humidité .....	23
<b>II. 5. 2</b> Pluie .....	23
<b>II. 5. 3</b> Température.....	24
<b>II. 5. 4</b> Vent .....	24

# Sommaire

---

<b>II. 6</b> Répartition de pollution sur les barrières isolantes.....	24
<b>II. 7</b> Effet de la pollution sur les équipements électriques .....	25
<b>II. 8</b> Principales méthodes d'évaluation de la sévérité de la pollution d'un site .....	25
<b>II. 8. 1</b> Densité de dépôt de sel équivalente (DDSE) .....	26
<b>II. 8. 2</b> Dispositif de mesure de conductivité superficielle à l'aide d'une sonde mobile .....	26
<b>II. 9</b> Classification des niveaux de pollution atmosphérique extérieure .....	28
<b>II. 9. 1</b> Pollution légère (première classe) .....	28
<b>II. 9. 2</b> Pollution moyenne (deuxième classe).....	28
<b>II. 9. 3</b> Pollution forte (troisième classe).....	28
<b>II. 9. 4</b> Pollution très forte (quatrième classe).....	29
<b>II. 10</b> Classification des sévérités de pollution intérieure .....	29
<b>II. 11</b> Méthodes de simulation de la pollution .....	29
<b>II. 11. 1</b> Essais sous pollution artificielle.....	29
<b>II. 11. 1. 1</b> Pollution liquide.....	29
<b>II. 11. 1. 2</b> Brouillard salin.....	30
<b>II. 11.1. 3</b> Couche solide.....	30
<b>II. 11. 2</b> Essais sous pollution naturelle.....	31
<b>II. 12</b> Techniques de lutte contre la pollution.....	32
<b>II. 13</b> Conclusion .....	32

## **Chapitre III**

### **Barrières et décharges électriques**

<b>III. 1</b> Introduction .....	33
<b>III. 2</b> Définitions.....	33
<b>III. 2. 1</b> Isolant .....	33
<b>III. 2. 2</b> Diélectrique.....	33
<b>III. 3</b> Propriétés diélectriques des isolants.....	34
<b>III. 3. 1</b> Permittivité .....	34
<b>III. 3. 2</b> Rigidité diélectrique .....	35
<b>III. 3. 3</b> Angle de pertes et facteur de dissipation .....	36
<b>III. 3. 4</b> Résistance et résistivité d'isolement .....	36
<b>III. 3. 4. 1</b> Résistance d'isolement .....	36
<b>III. 3. 4. 2</b> Résistivité en tension continue .....	37
<b>III. 4</b> Différents matériaux isolants .....	37
<b>III. 4. 1</b> Isolants liquides .....	37

# Sommaire

---

III. 4. 2 Isolants gazeux .....	38
III. 4. 3 Isolants solides.....	38
III. 5 Verre .....	38
III. 5. 1 Fibres de verre.....	39
III. 5. 2 Verres recuits.....	39
III. 5. 3 Verres trempés .....	40
III. 6 Décharge électrique dans l'intervalle d'air protégé par une barrière isolante .....	40
III. 6. 1 Décharges de type streamers .....	40
III. 6. 2 Décharges de type leader .....	41
III. 7 Différents types d'amorçage des isolations gazeuses.....	42
III. 7. 1 Amorçage de l'air par avalanche primaire .....	42
III. 7. 2 Claquage de l'air par streamers .....	42
III. 7. 3 Disruption de l'air par leader .....	43
III. 8 Décharge électrique de surface .....	44
III. 8. 1 Décharges glissantes aux interfaces air/solide .....	45
III. 8. 2 Paramètres influençant les décharges de surface .....	46
III. 8. 2. 1 Polarité de la tension appliquée .....	46
III. 8. 2. 2 Nature et épaisseur du solide isolant .....	47
III. 8. 2. 3 Présence d'une barrière dans l'intervalle d'air interélectrode .....	48
III. 8. 2. 4 Position de la barrière .....	48
III. 8. 2. 5 Permittivité de la barrière .....	48
III. 8. 2. 6 Dégradation de la surface du solide .....	48
III. 9 Conclusion .....	49

## Chapitre IV

### Partie expérimentale

IV. 1 Introduction .....	50
IV. 2 Dispositif expérimental et techniques de mesure .....	50
IV. 2. 1 Modèle expérimental .....	50
IV. 2. 2 Circuits de mesure et de visualisation .....	51
IV. 2. 3 Composition de la solution polluante .....	52
IV. 2. 4 Procédé d'application de la pollution .....	53
IV. 2. 5 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques .....	53
IV. 3 Paramètres d'influence de la performance électrique du système .....	55
IV. 3. 1 Tension continue positive .....	55

# Sommaire

---

IV. 3. 1. 1 Position optimale de la barrière dans le système pointe sous tension continue positive – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d’eau mis à la terre .....	55
IV. 3. 1. 2 Position optimale de la barrière pour un système plan sous tension continue positive – barrière polluée – pointe à la terre .....	57
IV. 3. 1. 3 Distance interélectrode et dépôt de goutte d’eau sur le plan .....	58
IV. 3. 1. 4 Absence ou présence de gouttes d’eau sur les deux électrodes du système plan – plan.....	60
IV. 3. 1. 5 Equivalence de la performance électrique entre plan – plan métalliques et pointe – barrière polluée - plan sous tension continue positive .....	61
IV. 3. 2 Tension continue négative .....	63
IV. 3. 2. 1 Position optimale de la barrière dans le système pointe sous tension continue négative – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d’eau mis à la terre .....	63
IV. 3. 2. 2 Position optimale de la barrière pour un système plan sous tension continue négative – barrière polluée – pointe à la terre .....	65
IV. 3. 2. 3 Distance interélectrode et dépôt de goutte d’eau sur le plan .....	66
IV. 3. 2. 4 Absence ou présence de gouttes d’eau sur les deux électrodes du système plan-plan.....	68
IV. 3. 2. 5 Equivalence de la performance électrique entre plan – plan métalliques et pointe – barrière polluée - plan sous tension continue négative .....	69
IV. 4 Conclusion .....	70
Conclusion générale .....	72



# Liste des figures

---

<b>Fig. I. 1 :</b> Système d'électrode pointe – plan et support de fixation des barrières de protection.....	3
<b>Fig. I. 2 :</b> Tension disruptive en fonction de la nature et la position relative de la barrière par rapport à l'électrode sous tension ( $l_b = 30$ cm, $e_b = 6$ mm, $D_p = 15$ cm, $e_p = 6$ mm, atmosphère propre et sèche).....	4
<b>Fig. I. 3 :</b> Schéma et photo du dispositif pointe – plan avec barrière isolante sous forme d'un tube.....	4
<b>Fig. I. 4 :</b> Tension disruptive du système pointe – plan sans et avec barrière en verre enveloppant la pointe en fonction de la distance interélectrode.....	5
<b>Fig. I. 5 :</b> Influence de la barrière en tube sur la décharge électrique.....	6
<b>Fig. I. 6 :</b> Schéma du principe de l'agencement de l'électrode (les valeurs numériques sont données en mm).....	6
<b>Fig. I. 7 :</b> Chemin de l'arc dans l'intervalle d'air interélectrode. (a) impulsion choc de foudre, (b), (c) et (d) impulsion choc de manœuvre.....	7
<b>Fig. I. 8 :</b> Longueur de développement de la décharge superficielle ( $L_u$ ) du PTFE, (a) impulsion choc de foudre de 160 kV, (b) impulsion choc de manœuvre de 173 kV. Humidité absolue et relative sont respectivement : 21,1 g/m <sup>3</sup> et 79 %.....	7
<b>Fig. I. 9 :</b> Photo et caractéristiques du modèle expérimental.....	8
<b>Fig. I. 10 :</b> Circuit électrique de mesure et de visualisation.....	9
<b>Fig. I. 11 :</b> $U = f(a/d)$ pour différentes longueurs de la barrière propre.....	10
<b>Fig. I. 12 :</b> Caractéristique de système pointe – plan avec barrière.....	10
<b>Fig. I. 13 :</b> Schéma de mesure et de visualisation (SG : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur, $T_r$ : Transformateur BT/HT, Cam : Caméra rapide, PC : Ecran de PC, $O_e$ : Objet d'essai).....	11
<b>Fig. I. 14 :</b> Tension disruptive des deux systèmes à champ non uniforme en fonction du nombre d'écrans insérés dans leur espace d'air.....	12
<b>Fig. I. 15 :</b> Influence du nombre de barrières intercalées entre la pointe et le plan sur le chemin suivi par le canal de disruption de son espace d'air.....	12
<b>Fig. I. 16 :</b> Circuits de mesure de la tension disruptive de l'intervalle d'air des deux systèmes d'électrodes avec barrière polluée et de visualisation du chemin de la décharge électrique disruptive ( $U_c$ : Unité de commande du transformateur ; $T_r$ HT: Transformateur haute tension ; $U_{cr}$ : Voltmètre de crête, $R_a$ : Résistance d'affaiblissement de courant, $C_1$ and $C_2$ : Diviseur capacitif, Cam : Caméra rapide ; PC : Ordinateur; $O_e$ : Objet d'essai).....	13

# Liste des figures

---

<b>Fig. I. 17</b> : Tension disruptive du système pointe – barrière polluée – plan en fonction de la conductivité électrique de la couche de pollution et du mode de sa répartition sur la barrière ( $a = 0$ cm, $l_b = 30$ cm, $e_b = 6$ mm, $D_p = 15$ cm).....	13
<b>Fig. I. 18</b> : Comparaison de la tension d’amorçage de la configuration pointe – plan avec barrière polluée à celle avec barrière métallique sans ou avec gouttes d’eau ( $a = 0$ cm, $l_b = 30$ cm, $D_{bm} = 30$ cm, $e_b = e_{bm} = e_p = 6$ mm, $D_p = 15$ cm).....	14
<b>Fig. I. 19</b> : Chemin de la décharge disruptive dans le cas d’une barrière conductrice ou isolante fortement polluée ( $a/d = 0$ %, $d = 5$ cm, $l_b = D_{bm} = 30$ cm, $\sigma_v = 30$ mS/cm) .....	14
<b>Fig. I. 20</b> : Comparaison de la performance électrique d’un système pointe – barrière fortement polluée – plan métallique avec gouttes d’eau à celle de la configuration plan – plan métalliques avec gouttes d’eau ( $a/d = 0$ %, $l_b = D_p = 40$ cm, $\sigma_v = 30$ mS/cm).....	15
<b>Fig. I. 21</b> : Equivalence électrique entre le système pointe – une barrière polluée – plan et plan – plan avec gouttes d’eau.....	15
<b>Fig. I. 22</b> : Allure de la courbe de modélisation de la disruption de l’intervalle d’air de configuration d’électrodes pointe – une barrière polluée – plan avec gouttes d’eau.....	16
<b>Fig. I. 23</b> : Tension disruptive du système pointe – plan sans barrière et avec barrière polluée enveloppant la pointe en fonction de la distance interélectrode.....	17
<b>Fig. I. 24</b> : chemin de la décharge disruptive avec barrière en tube pollué.....	17
<b>Fig. I. 25</b> : Rigidité diélectrique du système en fonction conductivité superficielle de la pollution sur la barrière (BPH2F : barrière polluée et humidifiée sur les deux façades).....	18
<b>Fig. I. 26</b> : Evolution de la décharge dans le cas d’une barrière uniformément polluée.....	18
<b>Fig. II. 1</b> : Variantes d’uniformité et de non uniformité de distribution de pollution sur une barrière isolante ( $\sigma_f$ : conductivité faible, $\sigma_F$ : conductivité forte) .....	24
<b>Fig. II. 2</b> : Dispositif allemand de surveillance de la sévérité de pollution SLM 10 (a : Sonde à électrodes planes, b : Sonde à électrodes linéaires).....	26
<b>Fig. II. 3</b> : Sonde à électrodes planes avec papier absorbant.....	27
<b>Fig. III. 1</b> : Champ électrique propre à l’intérieur d’un matériau isolant sous tension.....	34
<b>Fig. III. 2</b> : Cellules de mesure de rigidité diélectrique des isolants.....	35
<b>Fig. III. 3</b> : circuit électrique équivalent série.....	36
<b>Fig. III. 4</b> : circuit électrique équivalent parallèle.....	36
<b>Fig. III. 5</b> : Schéma de mesure des résistivités transversale $\rho_{tc}$ et superficielle $\rho_{sc}$ .....	37
<b>Fig. III. 6</b> : Représentation schématique de la structure du verre de silice.....	39
<b>Fig. III. 7</b> : Décharge par Streamers ( $d \leq 1m$ ) .....	43
<b>Fig. III. 8</b> : Décharge par leader.....	43

# Liste des figures

---

<b>Fig. III. 9</b> : Décharge à barrière diélectrique.....	44
<b>Fig. III. 10</b> : Système à décharges glissantes.....	45
<b>Fig. III. 11</b> : Figure de Lichtenberg observée sur une interface verre/SF6 pour une impulsion de tension de 30 kVx1 $\mu$ s sous une pression de 0,3 MPa .....	45
<b>Fig. III. 12</b> : 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 .....	46
<b>Fig. III. 13</b> : 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.....	47
<b>Fig. IV. 1</b> : Systèmes pointe – barrière polluée – plan avec gouttes d'eau, et support de fixation de barrière de protection ( $D_p$ : diamètre du plan métallique circulaire ; $l_b$ : longueur de la barrière en verre ; $e_b$ : son épaisseur) .....	50
<b>Fig. IV. 2</b> : Schéma de mesure et de visualisation .....	52
<b>Fig. IV. 3</b> : Mesure de la conductivité volumique des solutions polluantes (Conductimètre).....	52
<b>Fig. IV. 4</b> : $H = f(H_r, T)$ .....	54
<b>Fig. IV. 5</b> : $K_h = f(H)$ .....	54
<b>Fig. IV. 6</b> : Tension disruptive d'un système pointe – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d'eau en fonction de la position relative de la barrière ( $a/d$ ), sous tension continue positive ( $\sigma_v = 25$ mS/cm) .....	55
<b>Fig. IV. 7</b> : Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière polluée pour $d = 5$ cm, sous tension continue positive .....	56
<b>Fig. IV. 8</b> : Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière polluée pour $d = 10$ cm, sous tension continue positive .....	56
<b>Fig. IV. 9</b> : Tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système plan sous tension continue positive – barrière polluée – pointe en fonction de la position de la barrière ( $\sigma_v = 25$ mS/cm).....	57
<b>Fig. IV. 10</b> : Chemin de la décharge électrique dans l'intervalle d'air d'un système plan sous tension continue positive – barrière polluée – pointe pour différentes positions de la barrière.....	57

## Liste des figures

---

<b>Fig. IV. 11 :</b> Chemin de la décharge électrique dans l'intervalle d'air d'un système plan – barrière polluée – pointe pour différentes positions de la barrière, sous tension continue positive.....	58
<b>Fig. IV. 12 :</b> Tension disruptive de l'intervalle d'air du système pointe – plan métallique sans ou avec gouttes d'eau, sous tension continue positive .....	59
<b>Fig. IV. 13 :</b> Chemin de la décharge électrique pour un système pointe – plan métallique sans ou avec gouttes d'eau, sous tension continue positive .....	59
<b>Fig. IV. 14 :</b> Dispositif du système plan – plan sans ou avec gouttes d'eau ( $D_p$ : diamètre du plan ; $d$ : distance interélectrode) .....	60
<b>Fig. IV. 15 :</b> Tension disruptive de l'intervalle d'air du système plan – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau sous tension continue positive (conductivité d'eau $1200 \mu\text{S/cm}$ ).....	60
<b>Fig. IV. 16 :</b> Chemin de la décharge électrique pour un système plan – plan métalliques sous tension continue positive (conductivité d'eau est $1200 \mu\text{S/cm}$ ) .....	61
<b>Fig. IV. 17 :</b> Equivalence de la performance électrique des systèmes pointe – barrière polluée uniformément – plan avec gouttes d'eau et plan – plan métalliques avec gouttes d'eau, sous tension continue positive ( $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$ ).....	62
<b>Fig. IV. 18 :</b> Chemin de la décharge électrique du système pointe – barrière polluée – plan et plan – plan, sous tension continue positive .....	62
<b>Fig. IV. 19 :</b> Tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système pointe – barrière polluée – plan en fonction de la position relative de la barrière ( $a/d$ ), sous tension continue négative ( $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$ ).....	63
<b>Fig. IV. 20 :</b> Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour $d = 5 \text{ cm}$ , sous tension continue négative.....	64
<b>Fig. IV. 21 :</b> Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour $d = 10 \text{ cm}$ , sous tension continue négative.....	64
<b>Fig. IV. 22 :</b> Tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système plan avec gouttes d'eau – barrière polluée – pointe en fonction de la position de la barrière $a/d$ , sous tension continue négative ( $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$ ).....	65
<b>Fig. IV. 23 :</b> Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour $d = 5 \text{ cm}$ , sous tension continue négative.....	65
<b>Fig. IV. 24 :</b> Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour $d = 10 \text{ cm}$ , sous tension continue négative.....	66

## Liste des figures

---

- Fig. IV. 25 :** Tension disruptive de l'intervalle d'air du système plan – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau, sous tension continue négative.....67
- Fig. IV. 26 :** Chemin de la décharge du système plan – plan métalliques sans ou avec gouttes d'eau, sous tension continue négative.....67
- Fig. IV. 27 :** Tension disruptive de l'intervalle d'air du système pointe – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau, sous tension continue négative.....68
- Fig. IV. 28 :** Chemin de la décharge pour un système pointe – plan sec ou avec goutte d'eau, sous tension continue négative.....68
- Fig. IV. 29 :** Comparaison de la performance électrique entre un système pointe – barrière polluée – plan avec gouttes d'eau et plan – plan métalliques avec gouttes, sous tension continue négative ( $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$ ).....69
- Fig. IV. 30 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière, sous tension continue négative.....70

**Introduction**

**générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

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

L'effet des barrières sur l'augmentation de la rigidité des systèmes pointe -plan, est connu depuis des années. L'influence de la barrière sur l'intervalle d'air pointe-plan dépend de plusieurs paramètres.

L'amélioration de la rigidité diélectrique des systèmes à champ électrique non uniforme protégé par une barrière sous atmosphère propre a été bien prouvée par plusieurs chercheurs. Par contre l'effet du degré de pollution de la barrière sur sa performance électrique lorsque celle-ci est insérée n'a pas suscité beaucoup d'intérêt chez les chercheurs. 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 claquer l'intervalle d'air protégé.

Notre travail est une contribution à l'étude comparative entre un système pointe – plan protégé par une barrière et plan – plan sous conditions de pollution très sévères et tension continue positive et négative.

Pour ces raisons, notre présent mémoire se voit structuré en quatre chapitres.

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 – plan sous conditions de pollution très sévères et tension continue.

Le deuxième 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.

Dans le troisième 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 suscitée.

# **Introduction générale**

---

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

## **Etat d'art sur la performance électrique des barrières**



## I. 1 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.

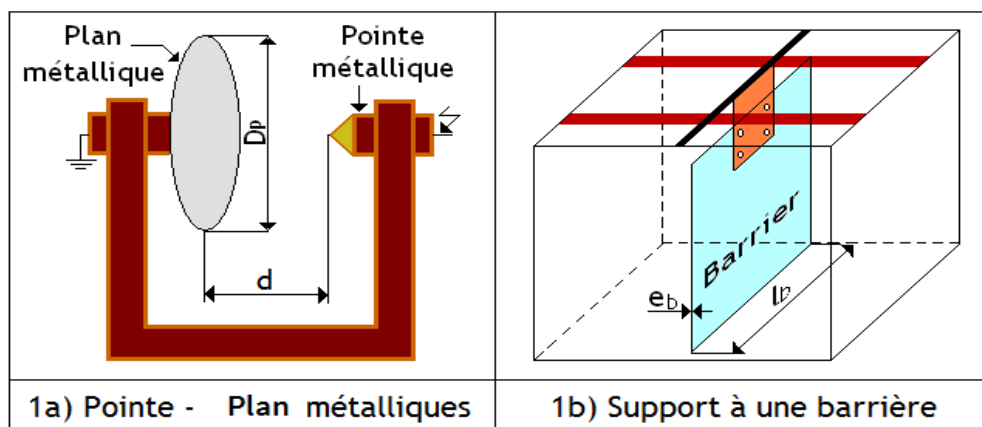
Depuis ce temps une multitude de paramètres électro-géométriques de la barrière isolante, exerçant une influence importante sur la performance électrique de l'intervalle d'air protégé par celle-ci, sont rentrés en jeu. Parmi ceux - là, nous pouvons distinguer essentiellement la sévérité du degré de pollution 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.

Du point de vue performance électrique l'équivalence entre la configuration pointe – plan protégée par une barrière et une configuration plan – plan sous conditions de pollution très sévères a été établie pour la première fois en AC par T. Belhoul [1] pour une distance interélectrode variable. Cependant en continu peu de recherches ont été menées dans ce sens. Dans ce qui suit nous passerons en revue les résultats issus de ce genre d'investigations.

## I. 2 Investigations antérieures sur l'équivalence de la performance électrique de deux configurations pointe – barrière isolante – plan et plan – plan sous conditions de pollution très sévères

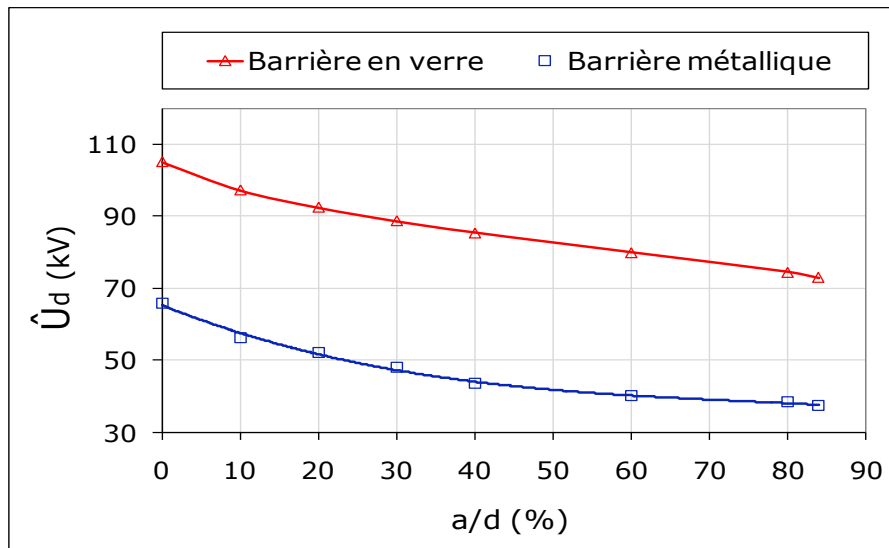
### I. 2. 1 Atmosphère propre

L'objectif recherché par T. Belhoul [1], consiste à étudier la performance électrique équivalente entre un intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière propre et celui du plan - plan pour une éventuelle modélisation de la disruption de leur espace d'air sous tension alternative 50 Hz, en utilisant le modèle expérimental illustré par la figure I. 1.



**Fig. I. 1 :** Système d'électrode pointe – plan et support de fixation des barrières de protection

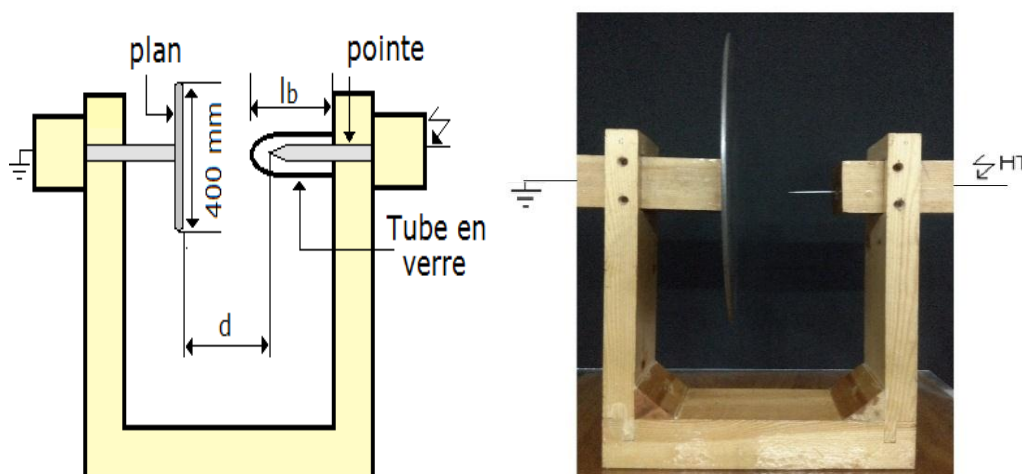
Le dispositif contient une barrière en verre, de forme carrée de 6 mm d'épaisseur ( $e_b$ ) et de largeur ( $l_b$ ) de 10, 20, 30 et 40 cm. La distance interélectrode varie entre 4 cm et 14 cm.



**Fig. I. 2 :** Tension disruptive en fonction de la nature et la position relative de la barrière par rapport à l'électrode sous tension ( $l_b = 30$  cm,  $e_b = 6$  mm,  $D_p = 15$  cm,  $e_p = 6$  mm, atmosphère propre et sèche)

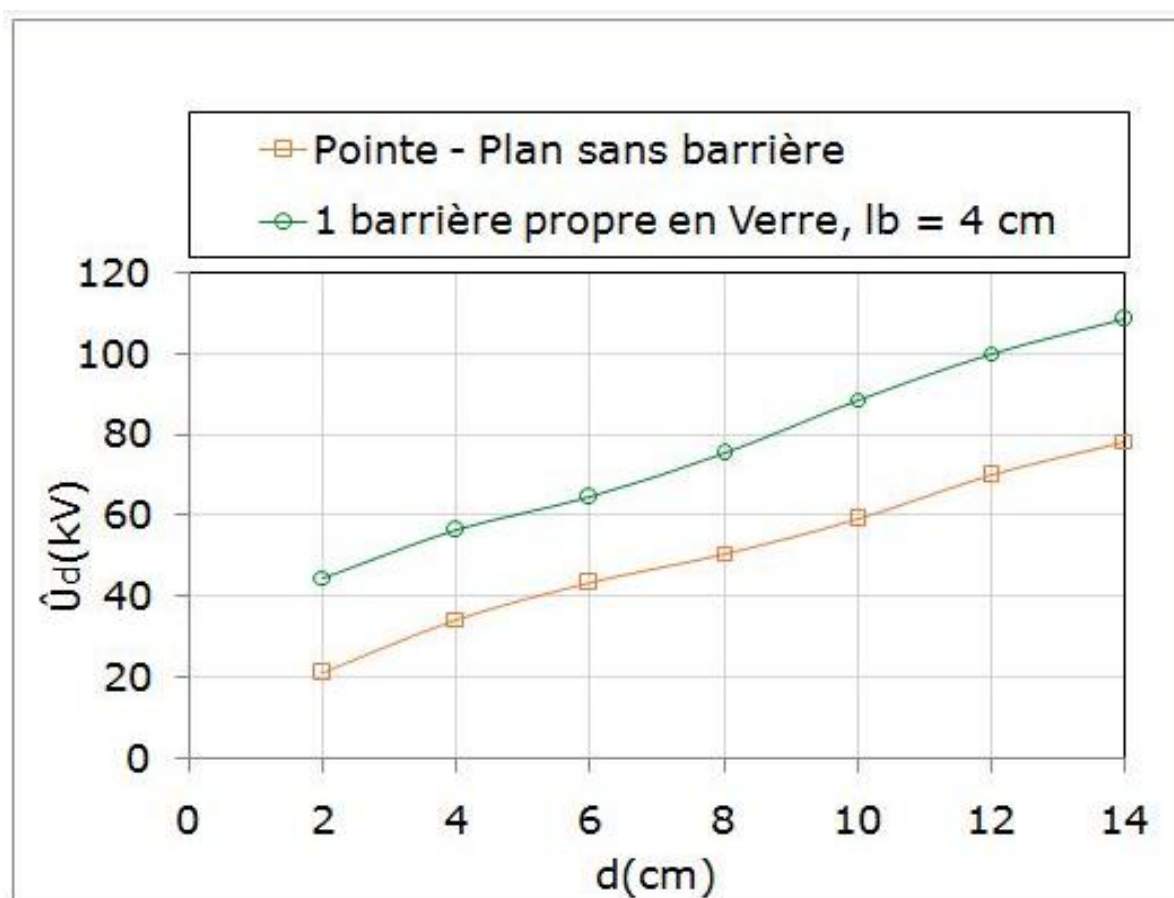
Il résulte de la figure I. 2 que la valeur maximale de la rigidité de ce système est obtenue lorsque la barrière est en contact avec la pointe sous tension ( $a/d = 0$  %, avec « a » la distance entre la pointe et la barrière, « d » la distance interélectrode). La barrière isolante en verre augmente la performance électrique du système de 60 % par rapport au cas sans celle-ci.

T. Belhoul [2] a étudié aussi la performance électrique équivalente entre un intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec une barrière isolante propre sous forme de tube recouvrant l'électrode mise sous tension alternative 50 Hz.



**Fig. I. 3 :** Schéma et photo du dispositif pointe – plan avec barrière isolante sous forme d'un tube

Le modèle expérimental est illustré par la figure I. 3, celui-ci est constitué d'un support en bois de forme U. La hauteur du support est de 40 cm, sa longueur est de 30 cm. Sur celui-ci sont encastrés deux bras en bois mobiles. Des électrodes pointues ou planes peuvent être vissées sur ces derniers. L'électrode mise sous tension est constituée d'une tige cylindrique en acier de 40 mm de longueur et 2.5 mm de diamètre. Celle-ci est terminée par une pointe conique en acier ayant un rayon de courbure de 0.335 mm. L'électrode mise à la terre est sous forme d'un plan conducteur cylindrique de 40 cm de diamètre. La distance interélectrode varie entre 2 et 14 cm. La barrière isolante exploitée dans cette étude est en verre sous forme d'un tube de 4 cm de longueur et d'épaisseur de 1 mm.

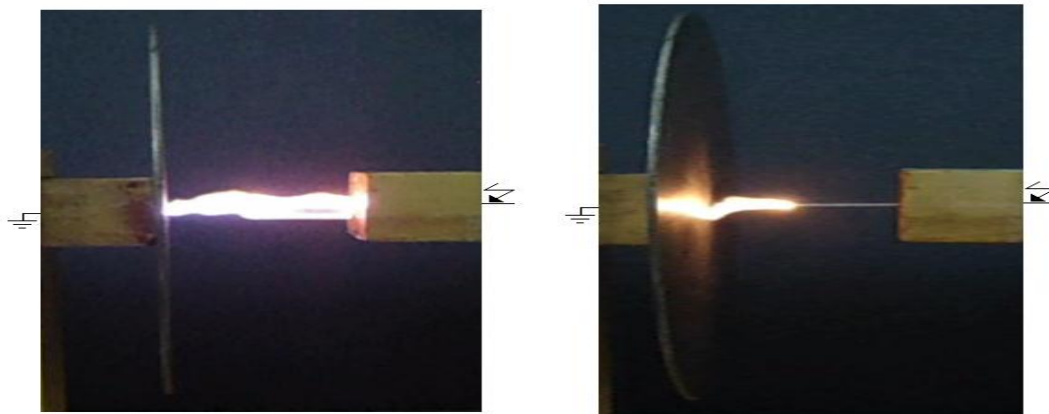


**Fig. I. 4 :** Tension disruptive du système pointe – plan sans et avec barrière en verre enveloppant la pointe en fonction de la distance interélectrode

Il résulte de la figure I. 4 que l'insertion d'une barrière isolante en forme de tube recouvrant la tige pointue sous tension offre une augmentation de la performance électrique de 40 à 100 % pour un intervalle interélectrode entre 2 et 14 cm.

La décharge électrique prend naissance à l'extrémité du tube grâce à la présence d'un champ fort de la pointe mise sous tension, cette dernière, se déplace de l'extrémité de la tige collée au

tronçon du bois en se propageant sur le long de la surface de cette barrière, ensuite elle va faire une jonction au milieu du plan mis à la terre, comme le montre la figure I. 5.

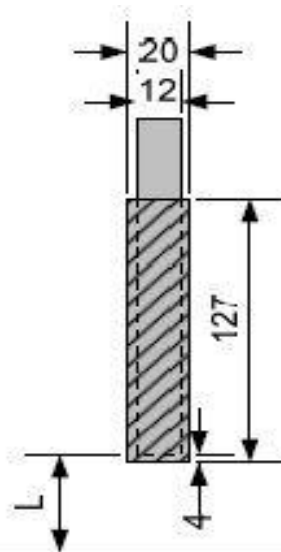


a) Pointe – plan avec barrière en tube

b) Pointe – plan sans barrière

**Fig. I. 5 :** Influence de la barrière en tube sur la décharge électrique

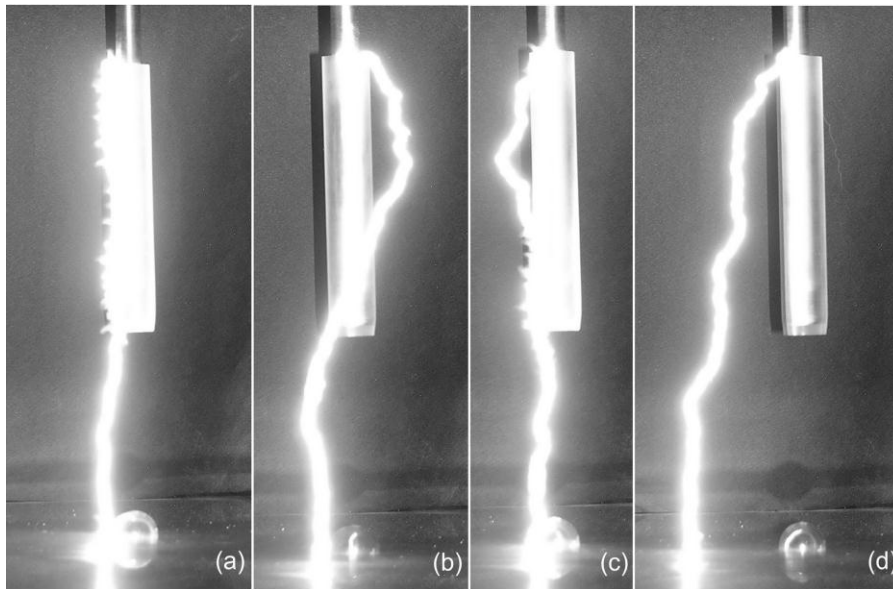
P. N. Mavroidi [3] a fait des recherches concernant le phénomène et le mécanisme du claquage dans les petits intervalles d'air pointe – plan avec une couverture diélectrique de la pointe mise sous tension de choc de foudre positive standard.



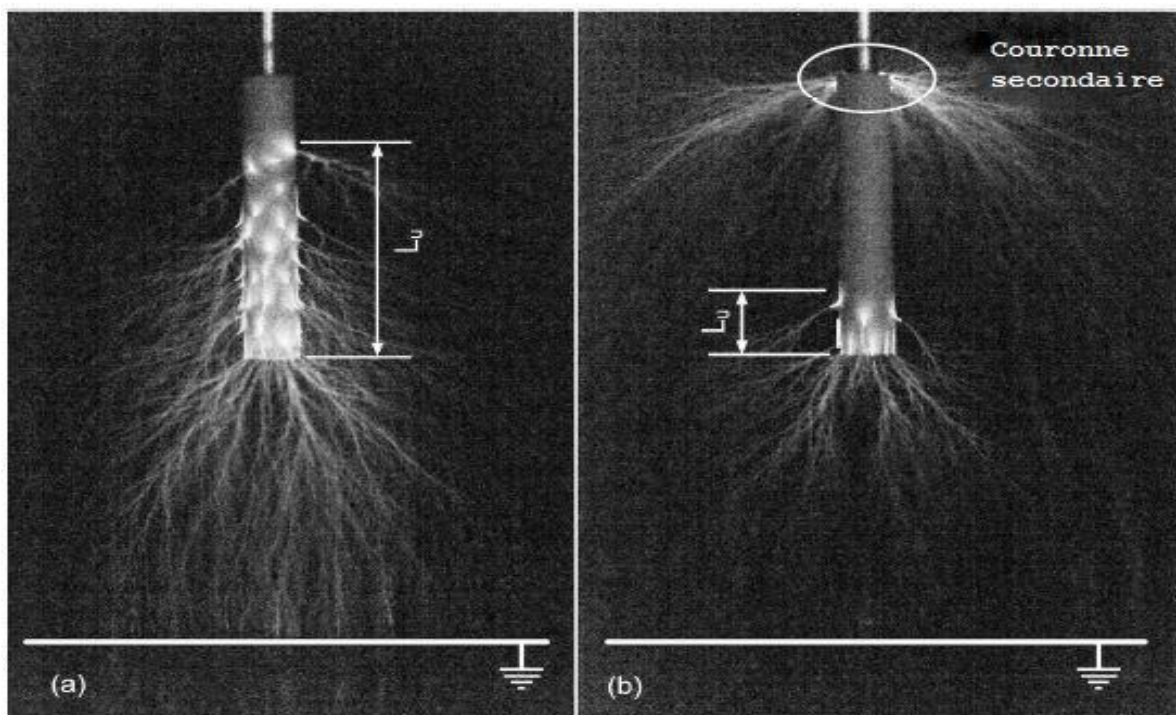
**Fig. I. 6 :** Schéma du principe de l'agencement de l'électrode (les valeurs numériques sont données en mm)

Le dispositif illustré par la figure I. 6, se compose d'une tige cylindrique en laiton de 1,2 cm de diamètre, avec une pointe coupée carrée suspendue sur un plan d'aluminium mis à la terre de 100 x 200 cm et placé à 80 cm au-dessus du plancher du laboratoire. Sa longueur varie entre 2,5 et 15 cm, la couverture diélectrique est en PTFE (polytétrafluoroéthylène), d'une épaisseur de 0,4 cm et d'une longueur de 12,7 cm. Un générateur de Marx à deux étages de

280 kV / 0,5 kJ a été utilisé pour produire des chocs de foudre standard positive, 1.3 / 49.6  $\mu$ s, en mettant sous tension la pointe. Une sonde positionnée au centre du plan mis à la terre, un oscilloscope digital de 400 MHz permet la surveillance de l'intensité du champ électrique au niveau du plan mis à la terre.



**Fig. I. 7 :** Chemin de l'arc dans l'intervalle d'air interélectrode. (a) impulsion choc de foudre, (b), (c) et (d) impulsion choc de manœuvre



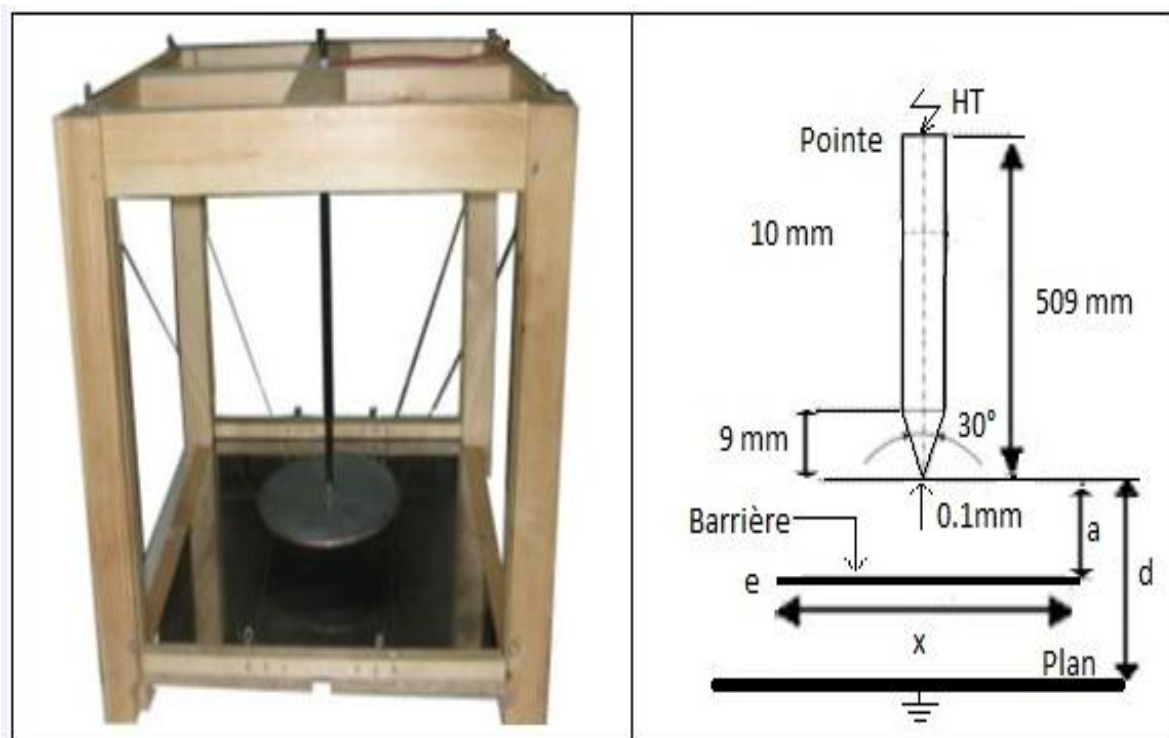
**Fig. I. 8 :** Longueur de développement de la décharge superficielle ( $L_u$ ) du PTFE, (a) impulsion choc de foudre de 160 kV, (b) impulsion choc de manœuvre de 173 kV. Humidité absolue et relative sont respectivement : 21,1  $g/m^3$  et 79 %



Il en résulte que les répartitions couronne et les probabilités de claquage sont dérivées pour des intervalles d'air pointe – plan avec une couverture diélectrique de la pointe, tout en variant la longueur. La première et la deuxième répartition de la tension, la couronne ainsi que la tension de claquage sont significativement plus élevées par rapport à celle qui se rapporte aux simples intervalles pointe – plan, qui ont été considérés comme des références. L'arrivée de la première couronne de streamers n'est pas un critère suffisant pour la disruption. L'arrivée de la deuxième couronne et la tension de claquage de l'intervalle d'air pointe – plan avec la couverture diélectrique est significativement plus élevée que celle correspondant au simple intervalle d'air avec une distance variable, grâce à la longueur de la couverture diélectrique. Cela a été discuté sur la base du modèle de la progression de la décharge jusqu'au claquage, comme le montrent les figures I. 7 et I. 8.

Il résulte des études menées par B. Azedine [4] que la tension de claquage d'un intervalle d'air pointe – plan avec barrière en forme d'hémisphère et dont la cavité est en face de la pointe sous tension, est de 30 à 45 % plus grande que celle du même système avec barrière plane.

H. Hallil [5] a étudié l'influence de la longueur de la barrière isolante sur la tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système à champ non uniforme (pointe – barrière – plan) mis sous tension continue négative. Il a utilisé le modèle expérimental représenté en figure I. 9.

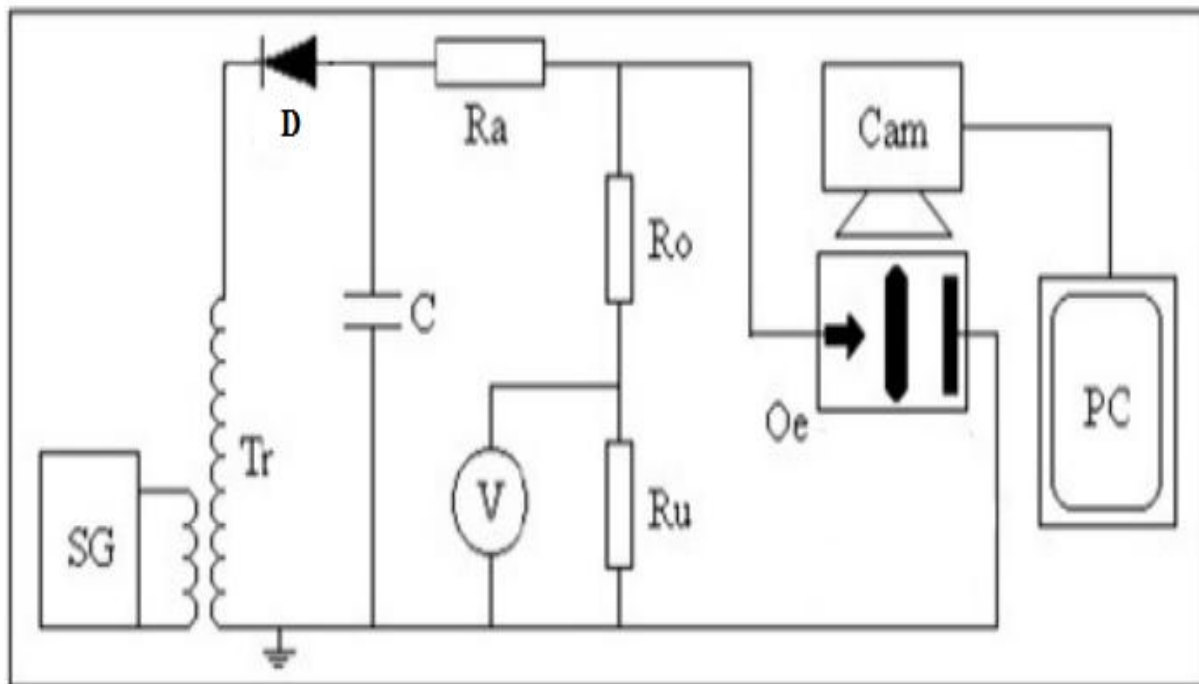


a) Photo du modèle

b) Caractéristiques du modèle

**Fig. I. 9 :** Photo et caractéristiques du modèle expérimental

Les barrières isolantes utilisées dans son cas sont en verre, de forme carrée de 5 mm d'épaisseur et de longueurs 10 cm et 15 cm.



**Fig. I. 10 :** Circuit électrique de mesure et de visualisation

La rigidité du système et la visualisation du phénomène électrique évoluant dans l'espace interélectrode de celui-ci ont été réalisés à l'aide du schéma électrique illustré par la figure I. 10.

Il résulte d'après la figure I. 11, que la tension de disruption du système croît avec l'élévation de la longueur de la barrière isolante. De plus, pour des positions relatives de la barrière inférieures ou égales à 70 %, l'écart de rigidité diélectrique du système pour les longueurs 10 cm et 15 cm de la barrière isolante propre est plus grand que celui obtenu dans le cas sans barrière.

Pour la barrière de longueur de 10 cm et de position relative ( $a/d = 0\%$ ), le taux d'augmentation de la tension disruptive est de 59,63 %. La visualisation de la décharge électrique évoluant dans l'intervalle d'air du système d'électrodes à barrière isolante propre fait ressortir un allongement géométrique du canal de la décharge principale en fonction de l'élévation de la longueur de la barrière particulièrement à l'approche de l'électrode haute tension. Il a été remarqué que le canal de la décharge se développant dans l'intervalle d'air du système, empreinte le chemin oblique de l'électrode sous tension vers le bord de la barrière, puis du bord de celle-ci vers le plan.



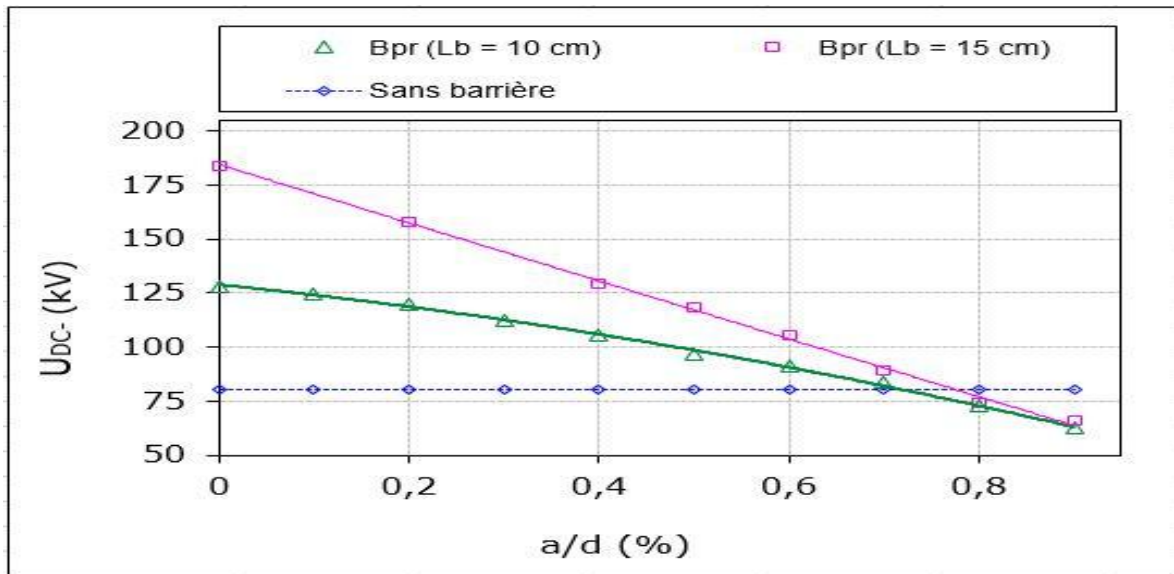


Fig. I. 11 :  $U = f(a/d)$  pour différentes longueurs de la barrière propre

S. Slimane [6] a fait des études sur l'évolution de la tenue électrique d'un système pointe – plan en fonction du nombre de barrières y insérée et de leur isolement sous tension continue positive. Le modèle expérimental est illustré par la figure I. 12.

L'électrode haute tension est constituée d'une tige cylindrique en acier de 10 mm de diamètre et de 250 mm de longueur. Celle-ci est terminée par une pointe conique en bronze ayant un angle de  $60^\circ$  et de 1,1 mm de rayon de courbure. L'électrode à la terre est constituée d'un disque en acier de 10 mm d'épaisseur, de 15 cm de diamètre. Sur celui-ci est vissée une tige cylindrique en acier de 20 mm de diamètre et de 150 mm de longueur. Toutes ces électrodes sont fixées sur deux faces verticales et opposées d'un cadre cubique en bois de 60 cm de côté.

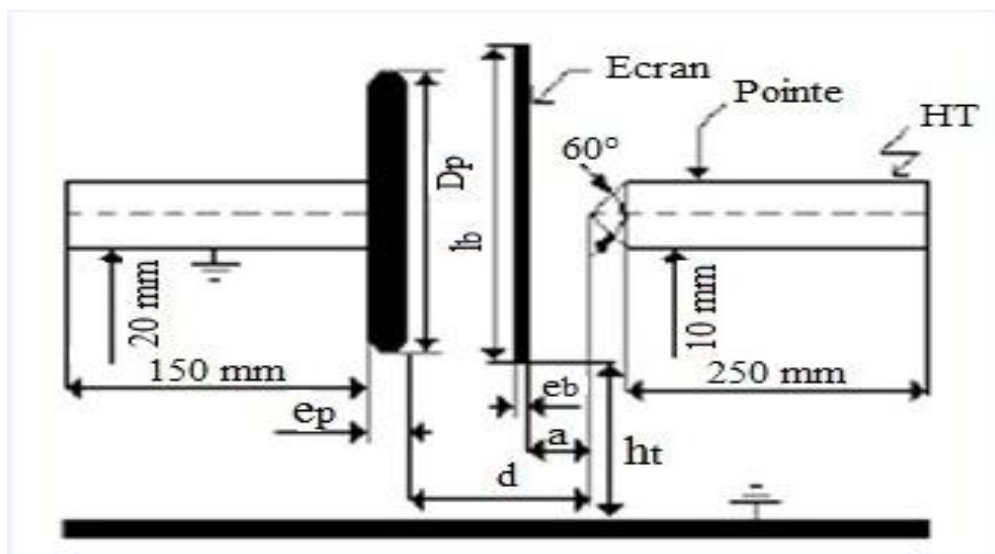
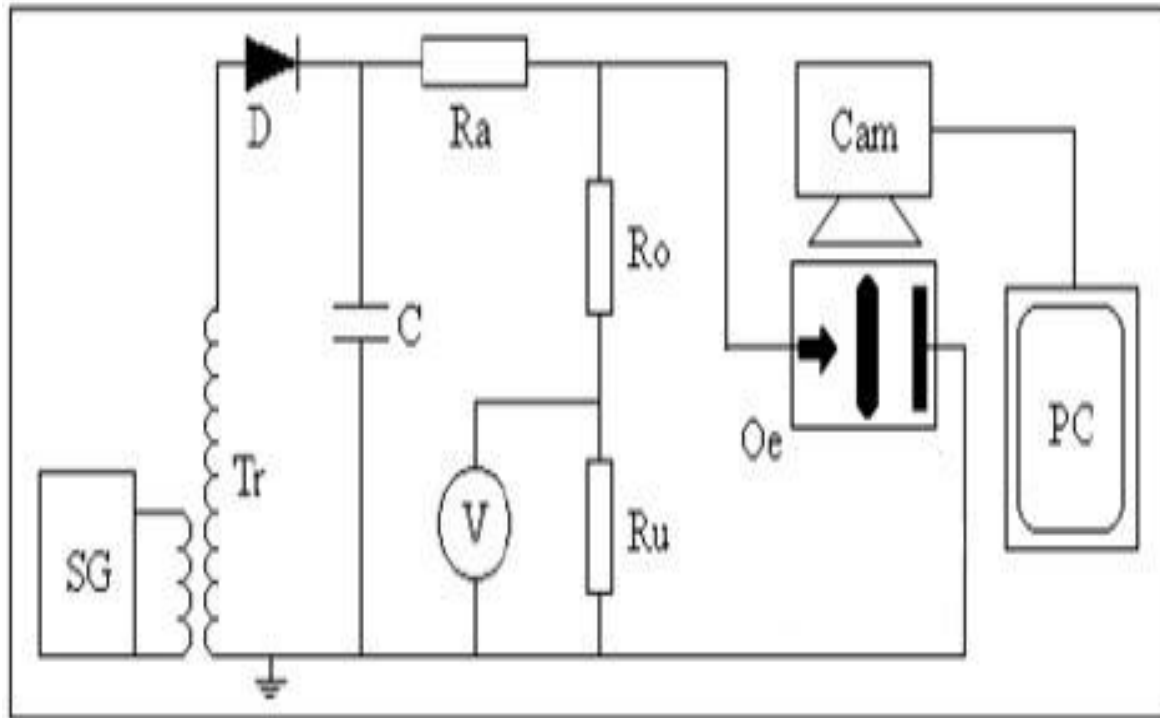


Fig. I. 12 : Caractéristique de système pointe – plan avec barrière

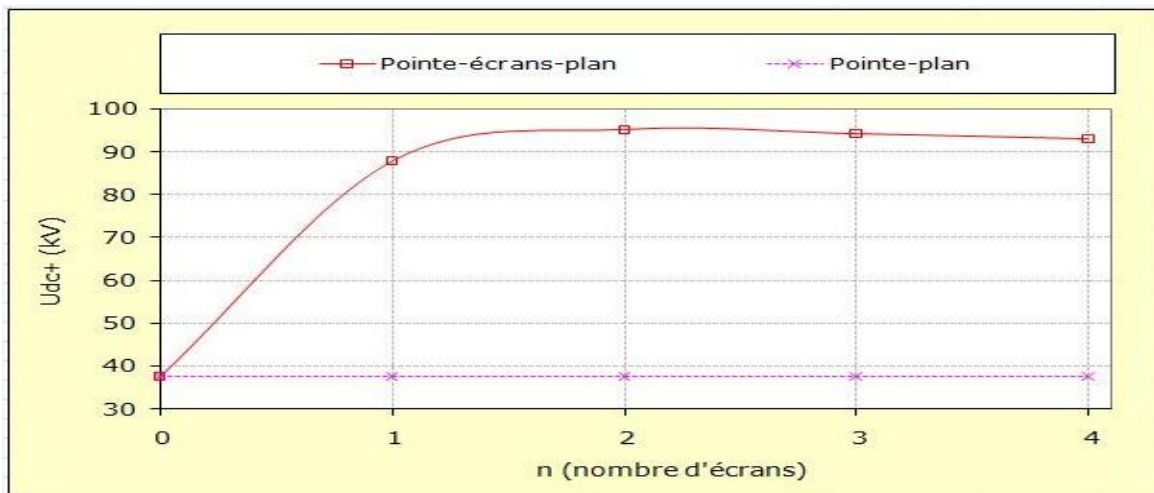
La caractérisation de la performance des systèmes avec barrières et la visualisation du phénomène électrique évoluant dans leur espace d'air ont été effectués sur la base du schéma électrique illustré par la figure I. 13.



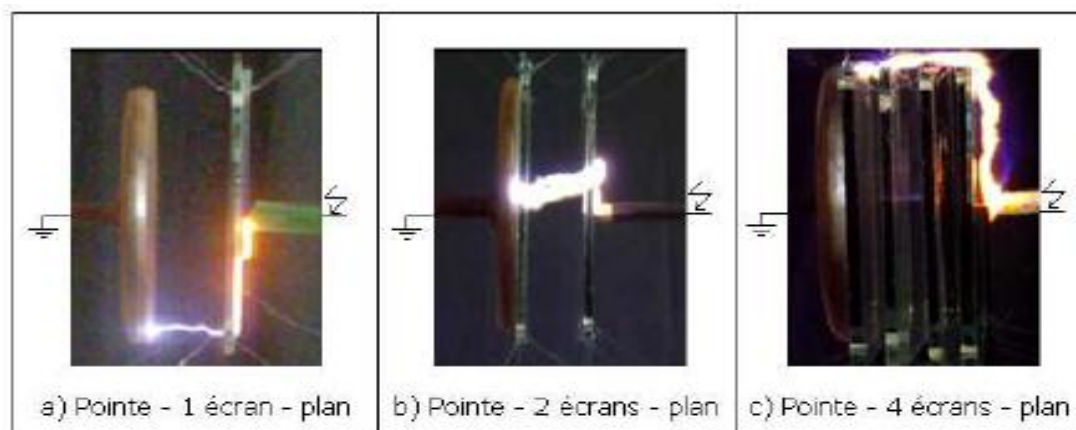
**Fig. I. 13 :** Schéma de mesure et de visualisation (SG : Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur,  $T_r$  : Transformateur BT/HT, Cam : Caméra rapide, PC : Ecran de PC,  $O_e$  : Objet d'essai)

Le circuit de mesure de la tension d'amorçage comprend essentiellement un transformateur ( $T_r$ ) dont la tension alternative maximale délivrée à son secondaire est de l'ordre de 135 kV. Celle-ci est redressée par la diode D et lissée par la capacité C. La variation temporelle de sa rampe peut être obtenue au moyen de l'appareil de commande manuelle ou automatique SG. La tension appliquée sur l'objet d'essai  $O_e$  est affichée directement sur le voltmètre de crête V. Le dispositif expérimental est relié aux bornes de la résistance ( $R_a$ ) de limitation de courant et au diviseur de tension résistif ( $R_o$ ,  $R_u$ ). Le circuit de visualisation est constitué d'une caméra rapide (Cam) pour l'enregistrement des différentes phases de la décharge électrique et d'un PC pour une analyse des diverses séquences au moyen d'un logiciel Vidéo studio 11.

Il résulte de la figure I. 14 que la tenue électrique d'un intervalle d'air d'une configuration pointe – barrières propres – plan croît jusqu'à une valeur du nombre de barrières propres égale à un. A partir de cette valeur, elle demeure quasiment inchangée quel que soit le nombre de barrières ajoutées.



**Fig. I. 14 :** Tension disruptive des deux systèmes à champ non uniforme en fonction du nombre d'écrans insérés dans leur espace d'air



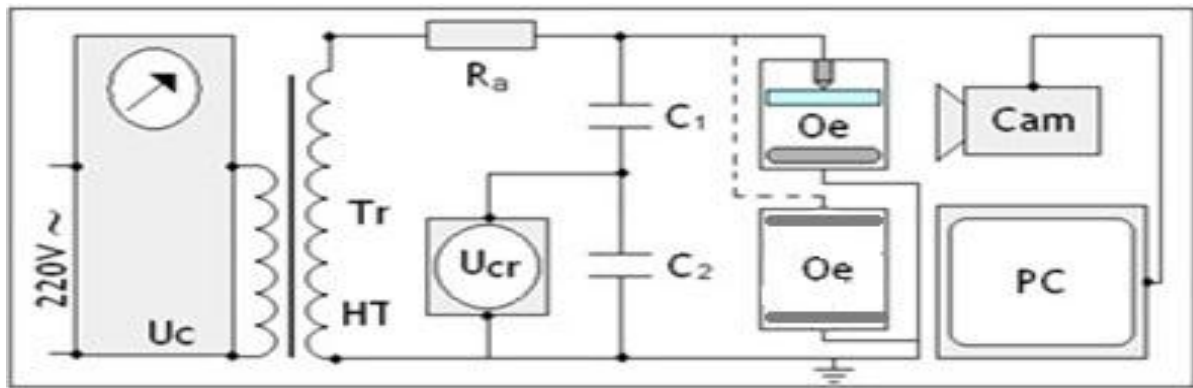
**Fig. I. 15 :** Influence du nombre de barrières intercalées entre la pointe et le plan sur le chemin suivi par le canal de disruption de son espace d'air

D'après la visualisation du phénomène électrique, le chemin emprunté par la décharge dans le cas de deux barrières est pratiquement le même que celui du nombre supérieur à deux, comme c'est illustré par la figure I. 15.

### I. 2. 2 Atmosphère polluée

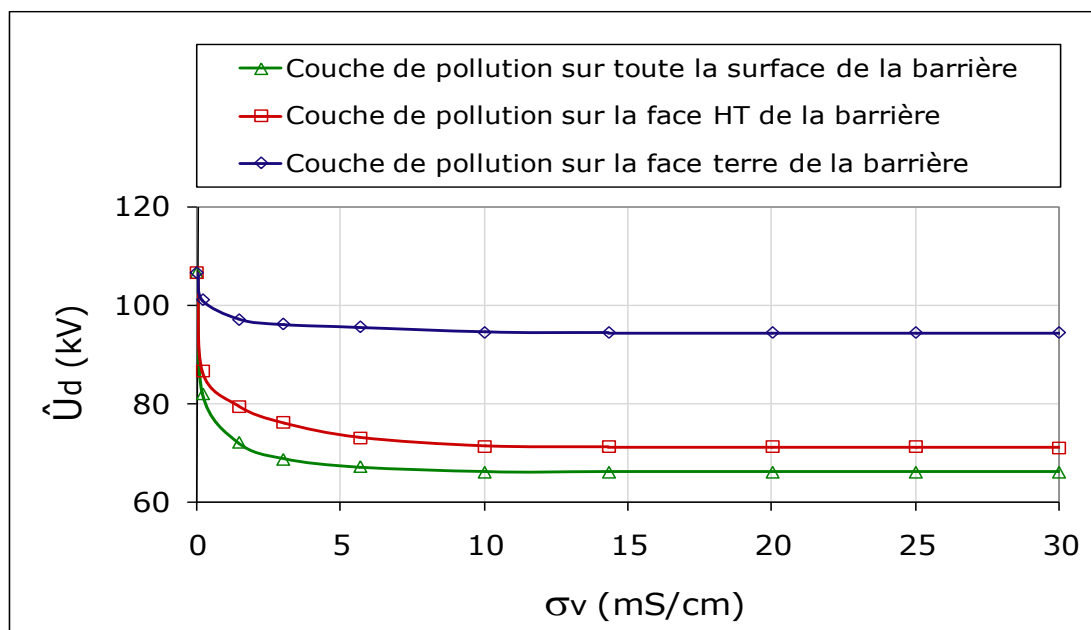
T. Belhoul [1], a étudié l'évolution de la tension d'amorçage de l'intervalle d'air du système pointe – barrière polluée – plan en fonction de la conductivité électrique de la couche de pollution et du mode de sa distribution sur la barrière, avec le même dispositif du cas propre comme le montre la figure I. 1.

La figure I. 16 donne les circuits de mesure de la tension disruptive de l'intervalle d'air du système d'électrodes pointe – plan avec barrière polluée et de visualisation du chemin de la décharge électrique disruptive.



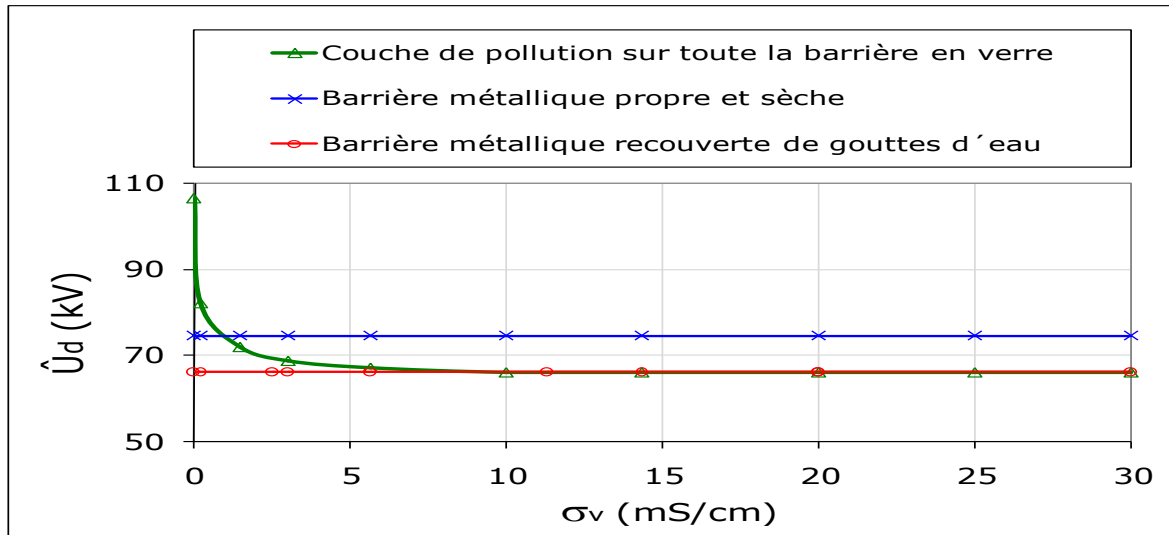
**Fig. I. 16 :** Circuits de mesure de la tension disruptive de l'intervalle d'air des deux systèmes d'électrodes avec barrière polluée et de visualisation du chemin de la décharge électrique disruptive ( $U_c$  : Unité de commande du transformateur ;  $T_r$  HT: Transformateur haute tension ;  $U_{cr}$  : Voltmètre de crête,  $R_a$  : Résistance d'affaiblissement de courant,  $C_1$  and  $C_2$  : Diviseur capacitif, Cam : Caméra rapide ; PC : Ordinateur;  $O_e$  : Objet d'essai

Il résulte de la figure I. 17 que la rigidité diélectrique minimale du système est obtenue lorsque la barrière est polluée sur ses deux grandes faces et ses trois bords. Par contre le système est électriquement plus performant dans le cas où une couche de pollution recouvre uniquement la face de la barrière en regard de l'électrode plane mise à la terre. Enfin lorsque la barrière est polluée uniquement sur sa surface située vis-à-vis de la pointe sous tension, la valeur de la tension disruptive du système est très proche de celle obtenue pour le même système avec une barrière totalement recouverte de pollution.



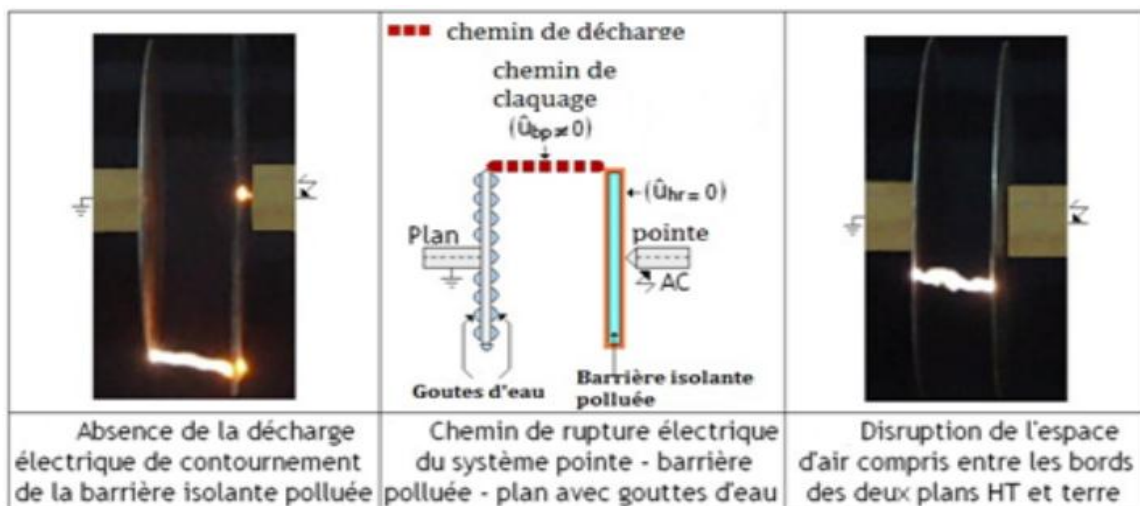
**Fig. I. 17 :** Tension disruptive du système pointe – barrière polluée – plan en fonction de la conductivité électrique de la couche de pollution et du mode de sa répartition sur la barrière ( $a = 0$  cm,  $l_b = 30$  cm,  $e_b = 6$  mm,  $D_p = 15$  cm)

Il en résulte une superposition parfaite des courbes de tension disruptive de l'espace d'air des deux systèmes pointe – barrière fortement polluée – plan métallique avec gouttes d'eau et plan – plan métalliques avec gouttes d'eau, comme c'est illustré sur la figure I. 18.



**Fig. I. 18** : Comparaison de la tension d'amorçage de la configuration pointe – plan avec barrière polluée à celle avec barrière métallique sans ou avec gouttes d'eau ( $a = 0$  cm,  $l_b = 30$  cm,  $D_{bm} = 30$  cm,  $e_b = e_{bm} = e_p = 6$  mm,  $D_p = 15$  cm)

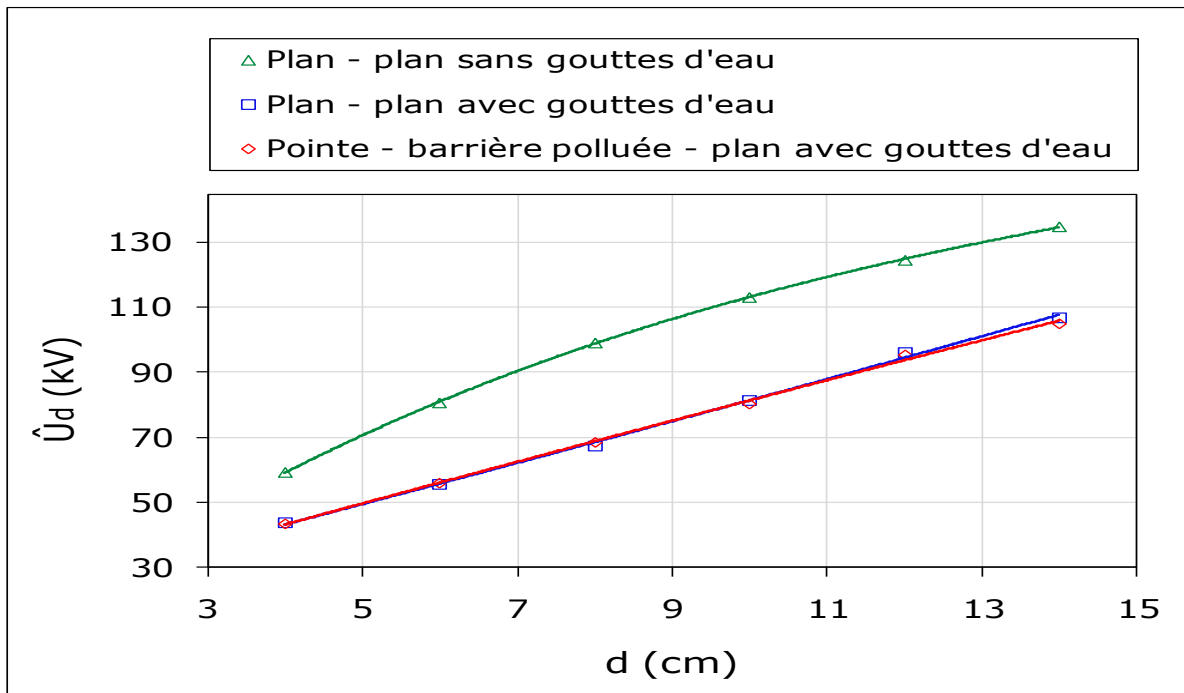
Il en résulte, la disparition de la décharge électrique contournant la surface de la barrière isolante fortement conductrice comme le montrent clairement les images présentées sur la figure I. 19.



**Fig. I. 19** : Chemin de la décharge disruptive dans le cas d'une barrière conductrice ou isolante fortement polluée ( $a/d = 0$  %,  $d = 5$  cm,  $l_b = D_{bm} = 30$  cm,  $\sigma_v = 30$ mS/cm)

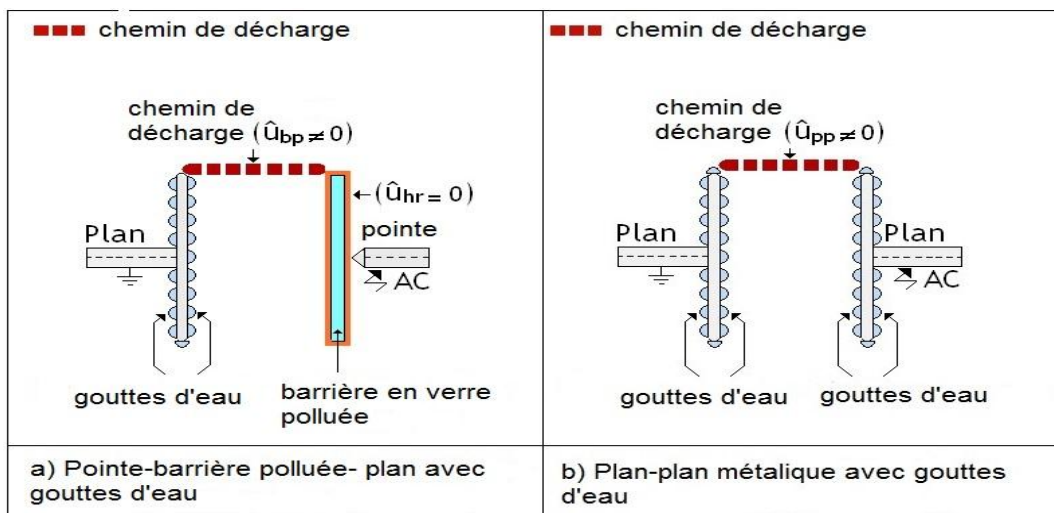
D'après la figure I. 20, l'auteur a conclu que la performance électrique de la configuration pointe – plan protégée par une barrière isolante fortement polluée est égale à celle du système

plan – plan métalliques sur la surface desquels sont déposées des gouttes d'eau de taille et de conductivité électrique arbitraire.



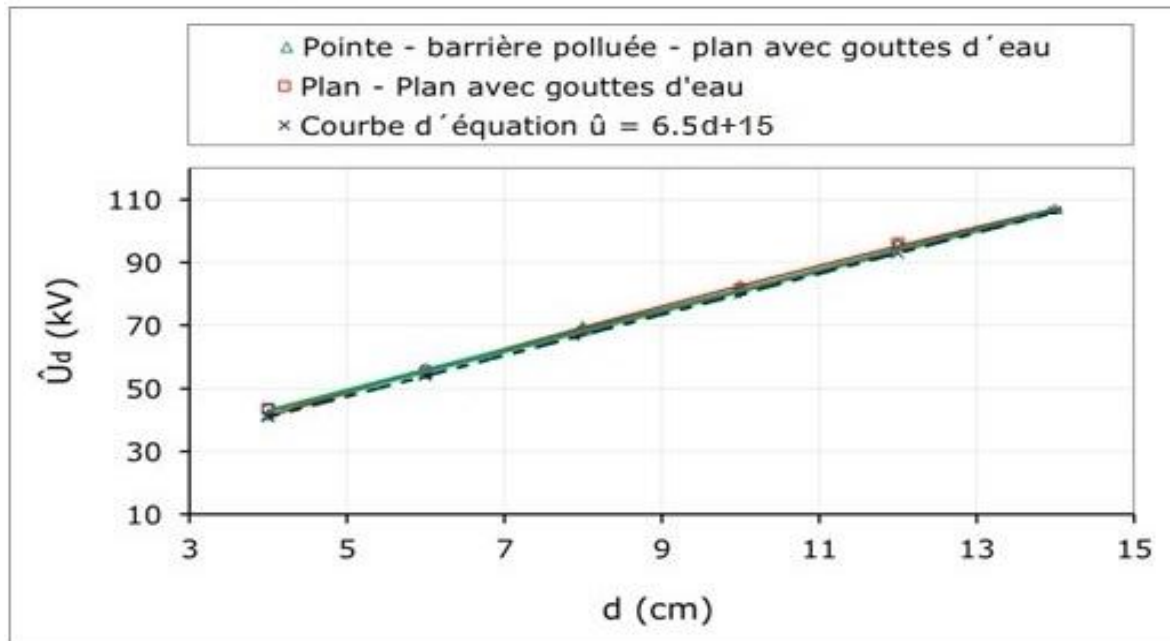
**Fig. I. 20** : Comparaison de la performance électrique d'un système pointe – barrière fortement polluée – plan métallique avec gouttes d'eau à celle de la configuration plan – plan métalliques avec gouttes d'eau ( $a/d = 0\%$ ,  $l_b = D_p = 40\text{ cm}$ ,  $\sigma_v = 30\text{ mS/cm}$ )

L'auteur a aussi fait une modélisation de la disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme protégé par des barrières sous conditions de pollution très sévères et mises sous tension alternative, comme le montrent les figures I. 21 et I. 22.



**Fig. I. 21** : Equivalence électrique entre le système pointe – une barrière polluée – plan et plan – plan avec gouttes d'eau





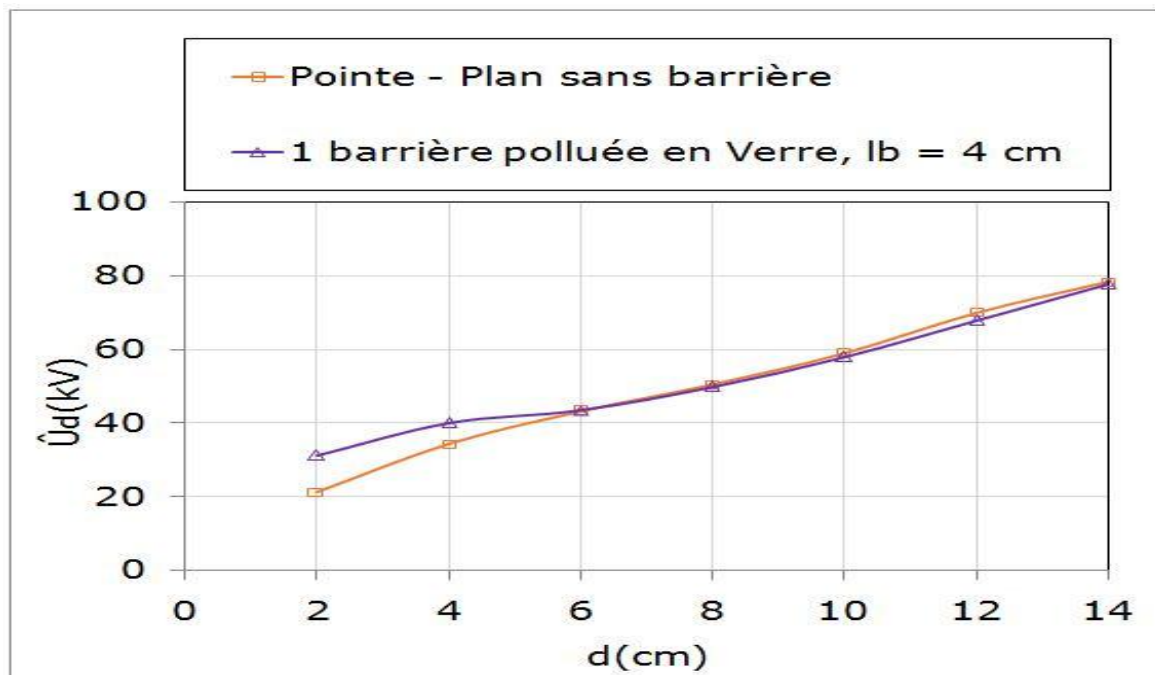
**Fig. I. 22 :** Allure de la courbe de modélisation de la disruption de l'intervalle d'air de configuration d'électrodes pointe – une barrière polluée – plan avec gouttes d'eau

Il résulte de la figure I. 22 que la performance électrique de la configuration pointe – plan protégée par une barrière isolante fortement polluée est égale à celle du système plan – plan métalliques sur la surface desquels sont déposées des gouttes d'eau de taille et de conductivité électrique arbitraire. La disruption de l'espace d'air pointe – plan avec une barrière polluée peut être modélisée dans l'intervalle d'air de longueur variant entre 4 et 14 cm par l'équation d'une droite de pente égale à 6,5 kV/cm. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle nécessaire pour le développement des streamers positifs. Ceci veut dire que l'amorçage d'un tel intervalle d'air est régi tout simplement par une décharge électrique de type streamers positifs. Dans ces conditions, l'isolement électrique de ces deux configurations est aussi modélisable.

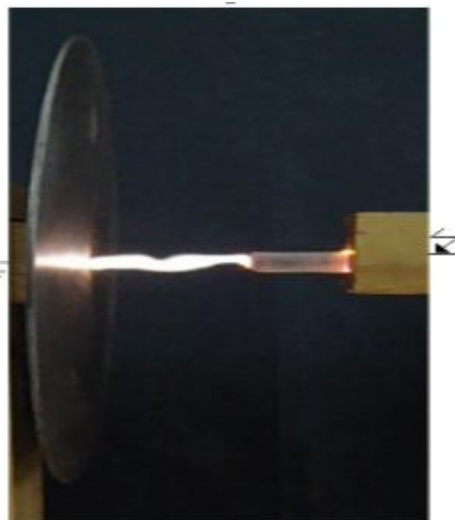
T. Belhoul [2] a étudié la performance électrique d'une barrière sous forme du tube en verre illustré par la figure I. 3.

Il résulte de la figure I. 23, qu'avec l'application d'une couche de pollution très forte d'une façon uniforme sur toute la surface de la barrière ( $\sigma = 25 \text{ mS/cm}$ ), la superposition des deux courbes de tension de disruption de l'intervalle d'air sans et avec barrière polluée fortement.

La décharge électrique prend un chemin plus court allant de l'extrémité arrondie du tube vers le milieu du plan est pratiquement le même cas pour un système non protégé, comme illustré par la figure I. 24



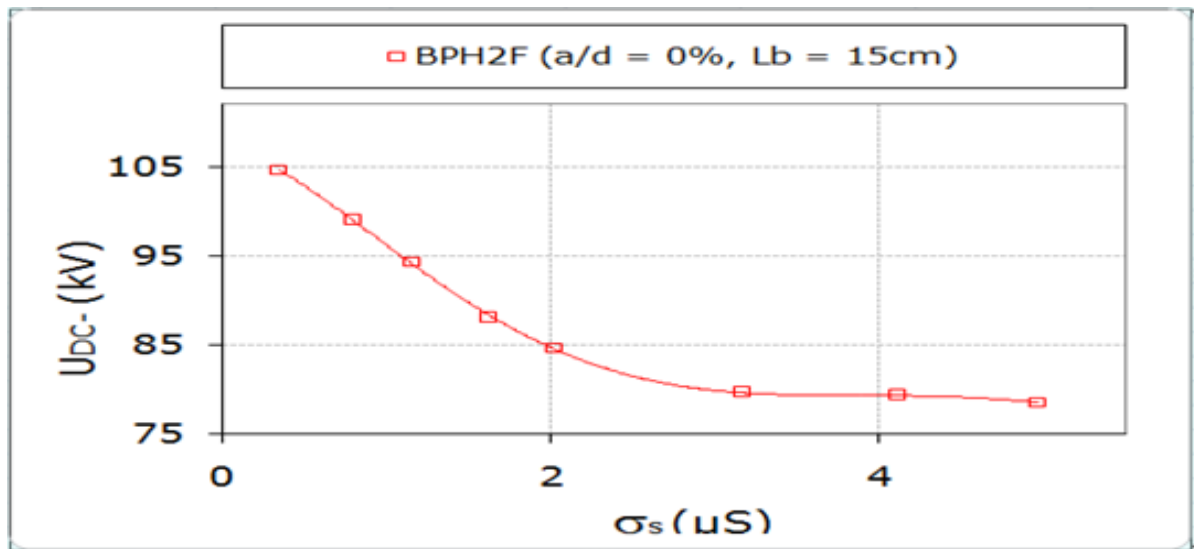
**Fig. I. 23 :** Tension disruptive du système pointe – plan sans barrière et avec barrière polluée enveloppant la pointe en fonction de la distance interélectrode



**Fig. I. 24 :** chemin de la décharge disruptive avec barrière en tube pollué

L'objectif principal des travaux expérimentaux menés par H. Hallil [5] est basé sur l'influence du degré de sévérité de pollution d'une barrière isolante sur la tension de disruption de l'intervalle d'air d'un système à champ électrique non uniforme (pointe – barrière – plan) mis sous tension continue négative. L'étude de l'effet du degré de pollution sur la rigidité diélectrique du système a été réalisée en faisant varier la conductivité superficielle de la barrière isolante contaminée uniformément jusqu'à ce que la tension de disruption considérée atteigne une valeur minimale constante.

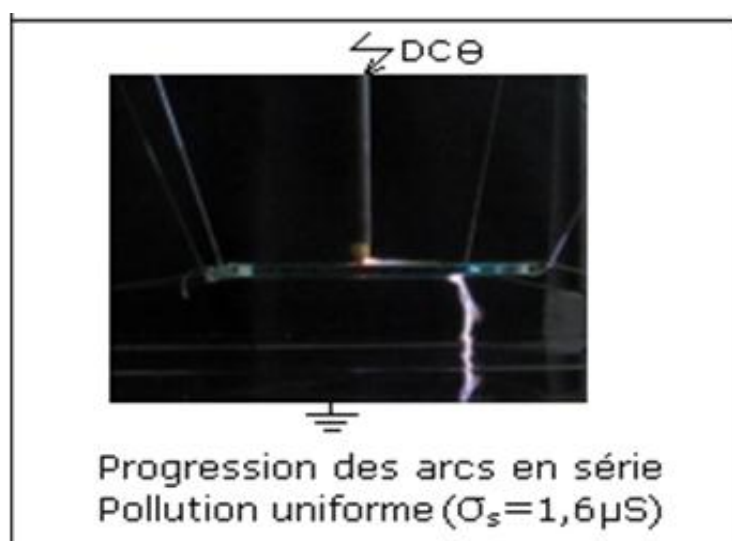




**Fig. I. 25 :** Rigidité diélectrique du système en fonction conductivité superficielle de la pollution sur la barrière (BPH2F : barrière polluée et humidifiée sur les deux façades)

Il ressort de la figure I. 25, que la tension de disruption de l'intervalle d'air du système avec barrière isolante uniformément polluée, diminue très rapidement en fonction de la conductivité électrique superficielle de celle-ci jusqu'à une valeur correspondant à une conductivité superficielle limite de la barrière de l'ordre de  $3 \mu\text{S}$ . Au-delà de cette limite la valeur de celle-ci demeure constante quel que soit le degré de sévérité de pollution de la barrière.

Il résulte de la figure I. 26 que l'amorçage de l'intervalle d'air d'un système d'électrodes pointe - plan avec barrière polluée est régie par la progression de l'un vers l'autre de deux arcs électriques quels que soient le mode distribution et la conductivité superficielle de la barrière du moins dans l'intervalle allant de 0 à  $5 \mu\text{S}$ .



**Fig. I. 26 :** Evolution de la décharge dans le cas d'une barrière uniformément polluée

### I. 3 Conclusion

La synthèse des travaux réalisés sur l'équivalence du système plan – plan et pointe – barrière isolante – plan, sous condition de pollution très sévères, nous a permis la mise en évidence des paramètres affectant essentiellement la performance électrique de celle-ci. Il résulte de certains travaux, l'existence d'une position de la barrière dans l'espace d'air où elle a été insérée, une taille et un nombre de barrières bien déterminé pour lesquels la tension de tenue électrique du système est maximale. Il ressort aussi, 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 deux fois plus élevée que celle obtenue sans celle-ci, sous atmosphérique propre et sèche. Par contre dans le cas d'une atmosphère polluée et humidifiée, son efficacité est estimée au maximum à 1,3. La conductivité électrique de la couche de pollution recouvrant la surface de la barrière influe très défavorablement sur sa performance électrique.

Seule une investigation a été menée sur l'équivalence de la performance électrique du système pointe – plan avec une barrière polluée sous tension alternative. La disruption de l'espace d'air pointe – plan avec une barrière polluée a été modélisée dans l'intervalle d'air de longueur variant entre 4 cm et 14 cm par l'équation d'une droite de pente égale à 6,5 kV/cm. Par contre l'investigation sous tension continue positive a été réalisée pour une distance interélectrode fixe égale à 4 cm et sans modélisation.

Ceci justifie l'idée de notre travail, qui consiste en la comparaison entre les intervalles d'air variables des deux systèmes pointe – barrière isolante – plan et plan – plan sous tension continue et conditions de pollution très sévères, au point de vue performance électrique en vue d'une modélisation du phénomène de sa disruption dans ces conditions défavorables pour un meilleur isolement de ce système.



## **Chapitre II**

# **Pollution des barrières isolantes**



**II. 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 en 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 été 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.

**II. 2 Définitions [7]****II. 2. 1 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  $\text{kg/m}^3$ .

**II. 2. 2 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.

**II. 2. 3 Degré de pollution**

C'est la 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.

**II. 2. 4 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.

**II. 2. 5 Contrainte de contournement [8]**

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, ou un taux de défauts acceptable.

**II. 2. 6 Conductance superficielle [8]**

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.

**II. 3 Différents types de polluants [8]**

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.

**II. 3. 1 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.

### II. 3. 2 Polluants naturels

Les polluants d'origine naturelle sont principalement le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). 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.

### II. 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 :

#### II. 4. 1 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 [11].

#### II. 4. 2 Pollution naturelle

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

##### II. 4. 2. 1 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 [10].

**II. 4. 2. 2 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 [9].

**II. 4. 2. 3 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 [11].

La pluie est 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.

**II. 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.

**II. 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 :

**II. 5. 1 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 [13].

**II. 5. 2 Pluie**

Les fortes pluies permettent en général le nettoyage des surfaces, isolantes polluées, cependant, les fines peuvent les mouiller, ce qui augmente le risque de leur contournement [13, 14].

**II. 5. 3 Température**

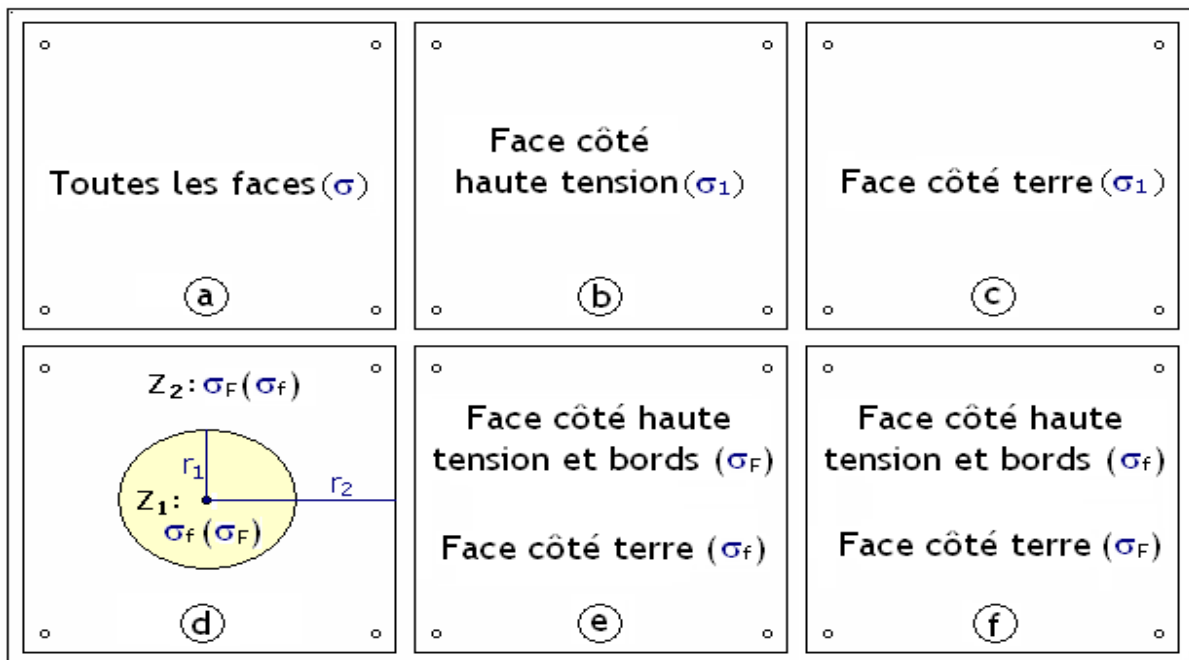
Contrairement à l’humidité, l’élévation de la température favorise l’assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité et par conséquent la tenue des isolations contaminées devient plus important. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l’humidification de la couche de pollution [13].

**II. 5. 4 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 [12].

**II. 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. II. 1), ont été définis dans la littérature [19] :



**Fig. II. 1** : Variantes d’uniformité et de non uniformité de distribution de pollution sur une barrière isolante [19] ( $\sigma_f$  : 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 (Fig. II. 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.

## **II. 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.

## **II. 8 Principales méthodes d'évaluation de la sévérité de la pollution d'un site [8]**

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.

### II. 8. 1 Densité de dépôt de sel équivalente (DDSE) [7]

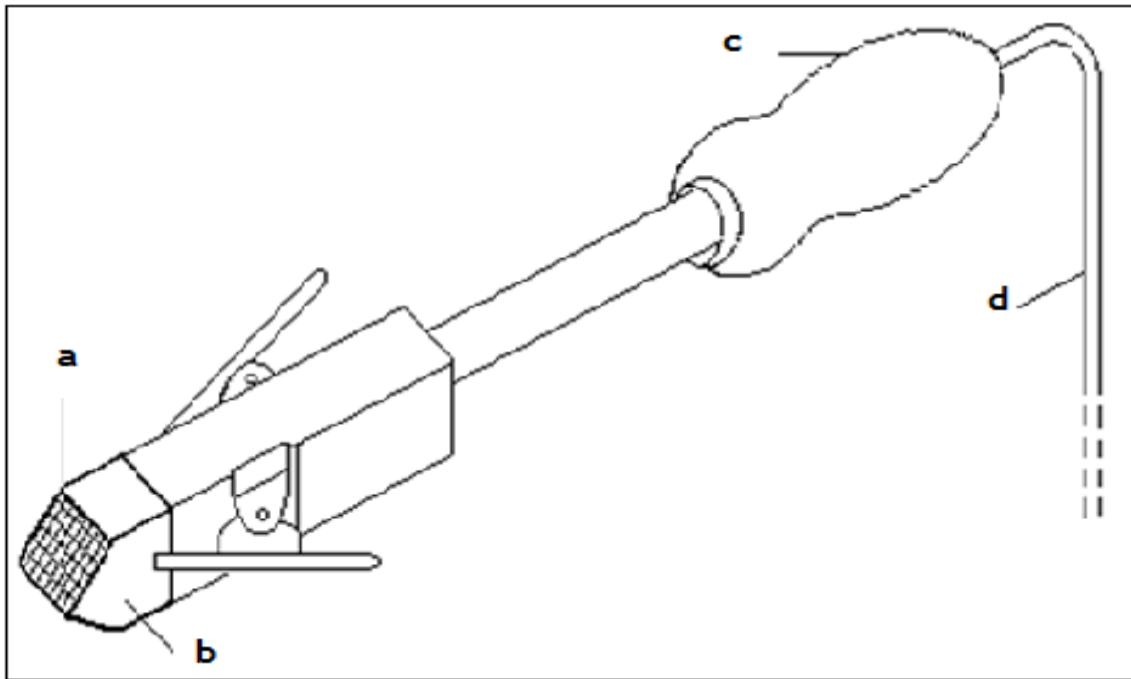
Il s'agit de dépôt équivalent, en milligramme de NaCl /cm<sup>2</sup> de la surface de l'isolant, dont la conductivité électrique est égale à celle du dépôt réel, dissous dans le même volume d'eau. Pour le calcul la DDSE, il faut prélever des échantillons du dépôt polluant présent à la surface des isolants 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.

### II. 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. II. 2**)



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



**Fig. II. 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. II. 3**). Avant d'effectuer les mesures sur une surface polluée de la barrière il faut :

- fixer une bande absorbante (papier PH) de dimensions ( $a = 10 \text{ mm}$  : distance interélectrode ;  $b = 10 \text{ mm}$  : 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 :

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

Où :

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

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

## **II. 9 Classification des niveaux de pollution atmosphérique extérieure [8]**

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 :

### **II. 9. 1 Pollution légère (première classe) [8] ( $\sigma_s = 5 \mu\text{S}$ )**

- 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 et soumise 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.

### **II. 9. 2 Pollution moyenne (deuxième classe) [8] ( $\sigma_s = 10 \text{ à } 15 \mu\text{S}$ )**

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).

### **II. 9. 3 Pollution forte (troisième classe) [8] ( $\sigma_s = 15 \text{ à } 30 \mu\text{S}$ )**

- 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.

#### **II. 9. 4 Pollution très forte (quatrième classe) [8] ( $\sigma_s = 30$ à $50 \mu\text{S}$ )**

- 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.

### **II. 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  $10 \mu\text{S}$  [15 - 17].

### **II. 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.

#### **II. 11. 1 Essais sous pollution artificielle [8]**

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 ( $\text{NaCl}$ ) 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.

##### **II. 11. 1. 1 Pollution liquide [8]**

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.

### **II. 11. 1. 2 Brouillard salin [8]**

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 détaillée pour assurer la reproductibilité des caractéristiques du brouillard, qui est plutôt humide.

Dans cet essai, il est utile 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).

### **II. 11.1. 3 Couche solide [8]**

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

Dans certains cas, la couche solide est composée d'une peinture semi-conductrice, cette dernière simule mieux les dépôts de pollution industrielle, tels que les cendres de carburant. La

validité de cette méthode a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières. La méthode de brouillard salin permet d’obtenir, par rapport aux méthodes de couche solide, une bonne reproductibilité des essais. Elle est d’une grande facilité de mise en œuvre. Cette méthode est la seule qui assure, au cours des essais, un renouvellement de couche.

**Tableau. II. 1** : Equivalence entre pollution naturelle et méthode de pollution artificielle [18]

Niveau de pollution		Pollution artificielle : sévérité équivalente		
		Brouillard salin Salinité g /l	Couche solide Densité de NaCl équivalente 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

**II. 11. 2 Essais sous pollution naturelle [8]**

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 fait sur 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.

## **II. 12 Techniques de lutte contre la pollution [8]**

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 sur plus de pollution.

## **II. 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, il peut être intéressant d'assortir les mesures de pollution des mesures météorologiques.





# **Chapitre III**

## **Barrières et décharges électriques**



**III. 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. Nous intéressons 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 nous intéresserons 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.

**III. 2 Définitions****III. 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  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ .

**III. 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.

### III. 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:

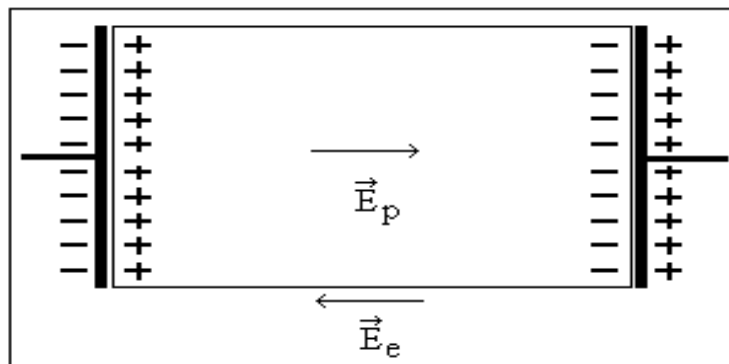
- Permittivité relative  $\epsilon_r$  ;
- Rigidité diélectrique  $E$  ;
- Facteur de pertes diélectriques  $\text{tg}\delta$  ;

- 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.

#### III. 3. 1 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.III.1**).



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

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:

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (\text{III.1})$$

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

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

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

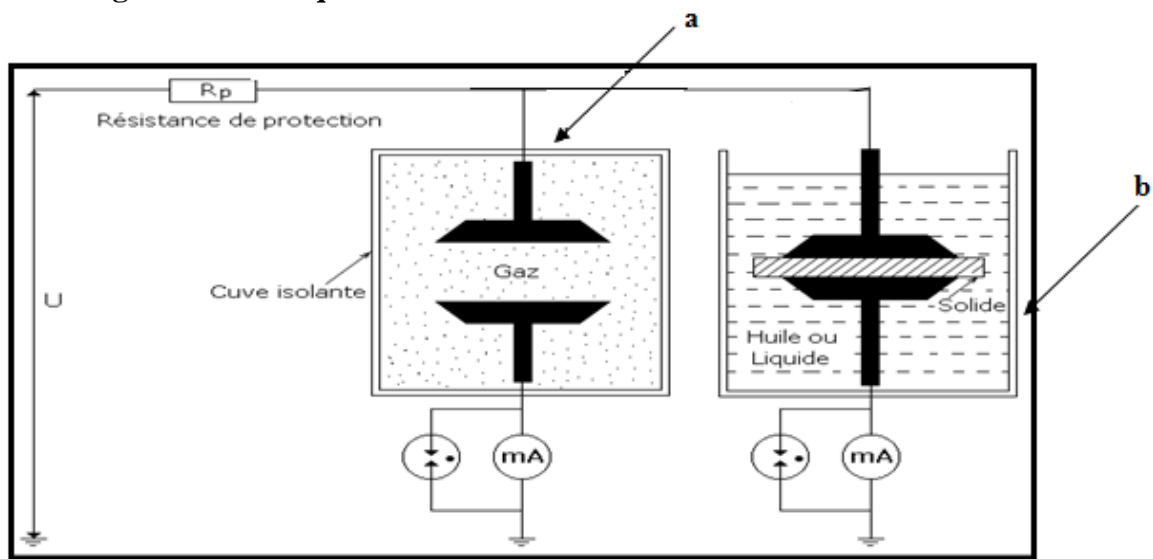
Dans le cas des diélectriques non parfaits, on définit de façon analogue une permittivité complexe relative qui tient compte de la dissipation d'énergie dans le diélectrique. Elle s'écrit:

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

Où  $\epsilon_r'$  est la partie réelle de la permittivité complexe, jouant le même rôle que  $\epsilon_r$  dans le cas des diélectriques parfaits:

$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \epsilon_0 \tag{III.4}$$

**III. 3. 2 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. III. 2 :** 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. III. 2)  $E_d = \hat{U}_d/d$ , (V/m), avec  $\hat{U}_d$ : tension de crête et d: la distance interélectrode.

**III. 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. III.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:

$$\text{Tg} \delta = I_a / I_r = U_a / U_r + P_a / P_r \tag{III.5}$$

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

$$\text{tg} \delta = \frac{\epsilon_r'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}{\epsilon_r'} \tag{III.6}$$

Le produit  $\epsilon_r'' = \epsilon_r' \text{Tg} \delta + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$  est dénommé indice de pertes, car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

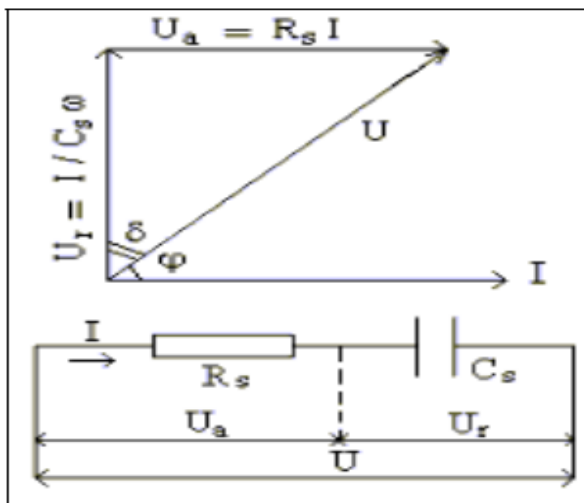


Fig. III. 3 : Circuit électrique équivalent série

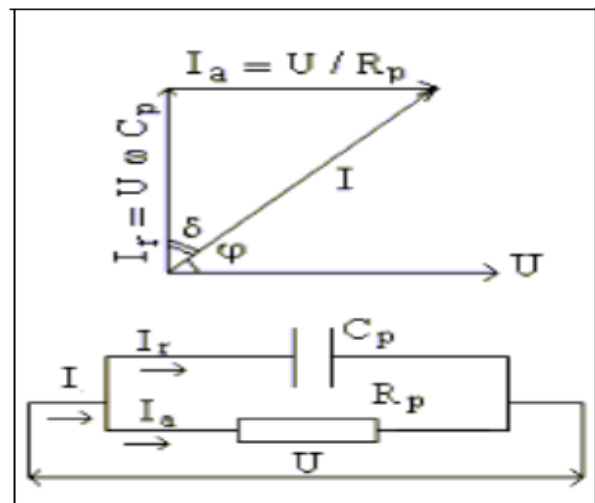


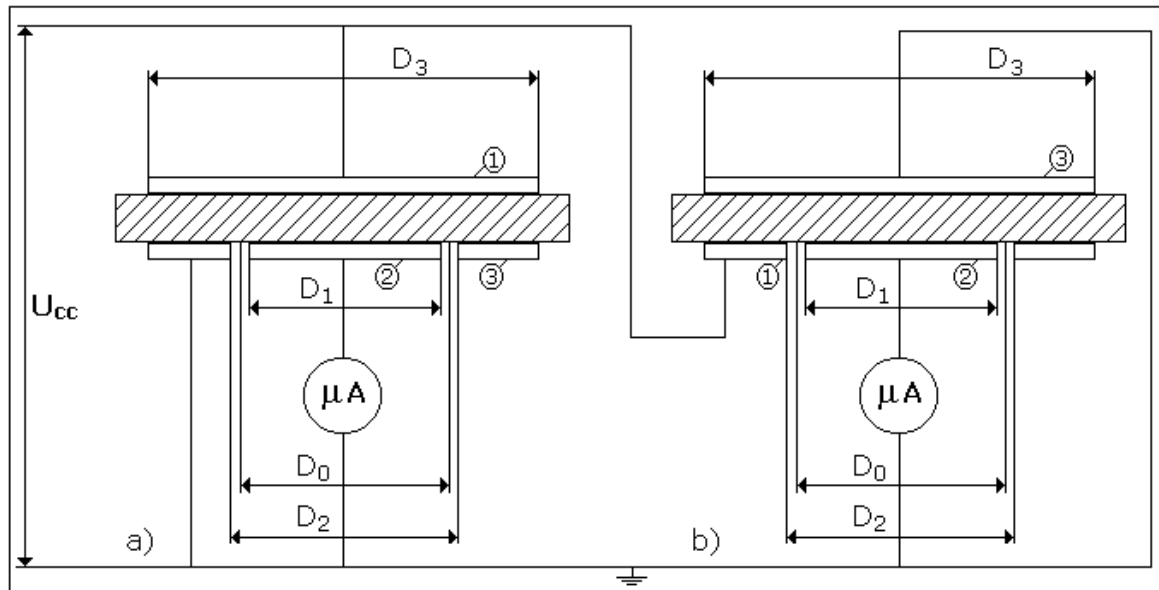
Fig. III. 4 : Circuit électrique équivalent parallèle

**III. 3. 4 Résistance et résistivité d'isolement**

**III. 3. 4. 1 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.

III. 3. 4. 2 Résistivité en tension continue



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

Fig. III. 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

$$\rho_{tcc} = S_t R_V / d \quad \text{(III. 7)}$$

$$\rho_{scc} = P R_S / f \quad \text{(III. 8)}$$

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

$\rho_{tcc}$  : la résistivité transversale mesurée en courant continu ;

$\rho_{scc}$  : a résistivité superficielle mesurée en courant continu.

III. 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.

III. 4. 1 Isolants liquides

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.

**III. 4. 2 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.

**III. 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 polyvinylyles, 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.

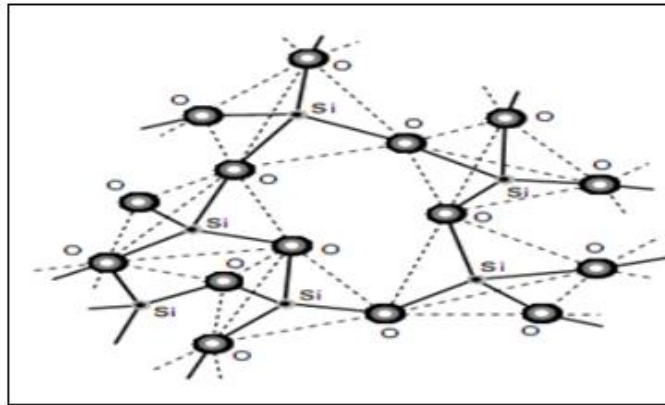
**III. 5 Verre [25]**

Le verre est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900 °C; un mélange de sable, de chaux et de carbonate de Sodium. Le liquide, peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs chimiquement, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO<sub>2</sub>) et de fondants (**Fig III. 6**).

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



**Fig. III. 6 :** Représentation schématique de la structure du verre de silice [8]

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

### III. 5. 1 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 5 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:  $\text{tg } \delta = 4,354 \cdot 10^{-2}$ .

### III. 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

### III. 5. 3 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 défectuosité de l'isolateur.

### **III. 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 10<sup>4</sup> 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  $d$ . Telle que  $(p)$  c'est la polarité.

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 environnants. 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  $1000 \text{ cm}/\mu\text{s}$ .

### **III. 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  $4,5 \text{ kV/cm}$  pour  $30 \text{ cm}$ . 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  $80 \text{ cm}$  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.

### **III. 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).

#### **III. 7. 1 Amorçage de l'air par avalanche primaire**

Ce type de claquage n'existe que dans le cas de champs 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.

#### **III. 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. III.7), à ce moment-là, du fait de la contribution de l'électrode à la terre phénomène.

La forte densité de courant engendrée au niveau de l'électrode sous tension provoque la thermo-ionisation. Ce phénomène donne naissance à un leader instable se développant dans l'intervalle d'air considéré. Dès que le leader relie les deux électrodes, un arc se forme, permettant ainsi la circulation du courant de court-circuit.

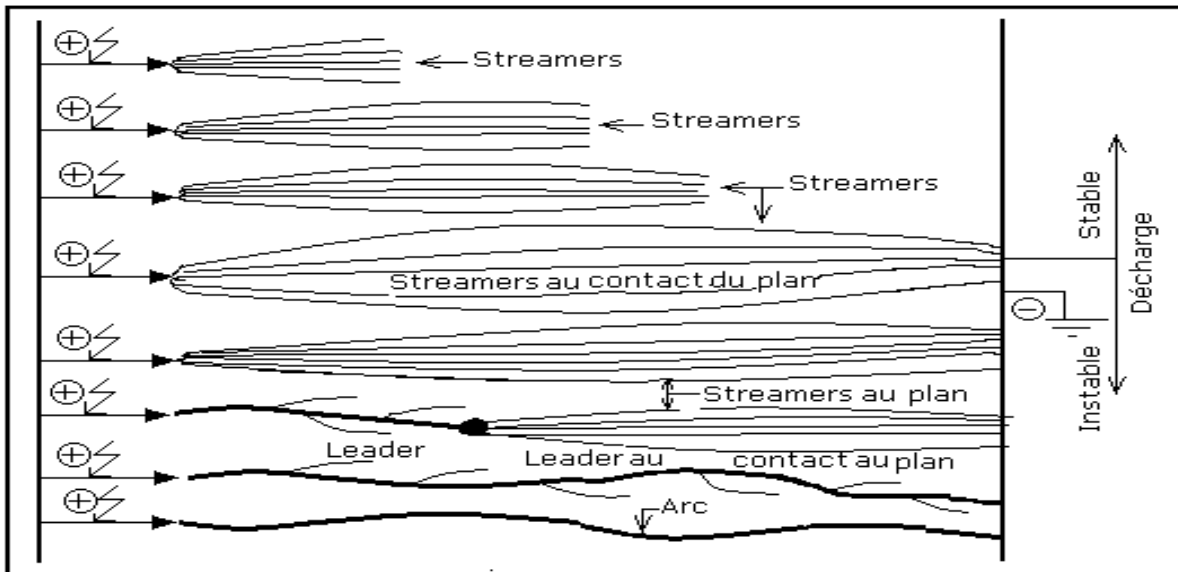


Fig. III. 7 : Décharge par Streamers ( $d \leq 1m$ )

III. 7. 3 Disruption de l'air par leader

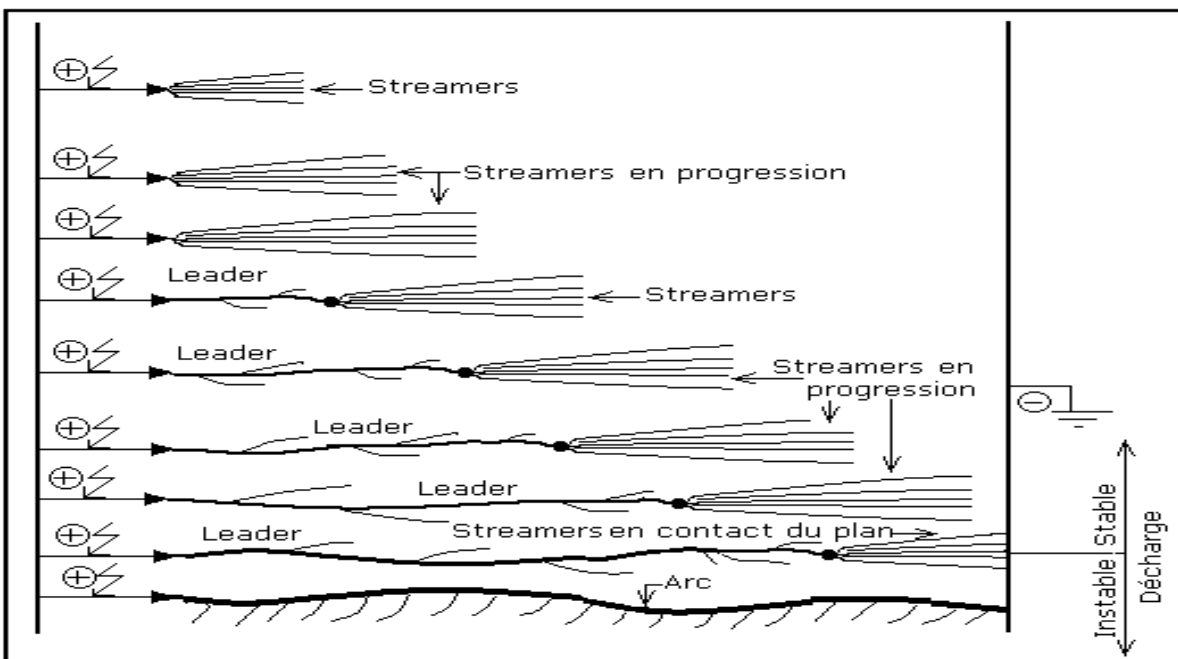
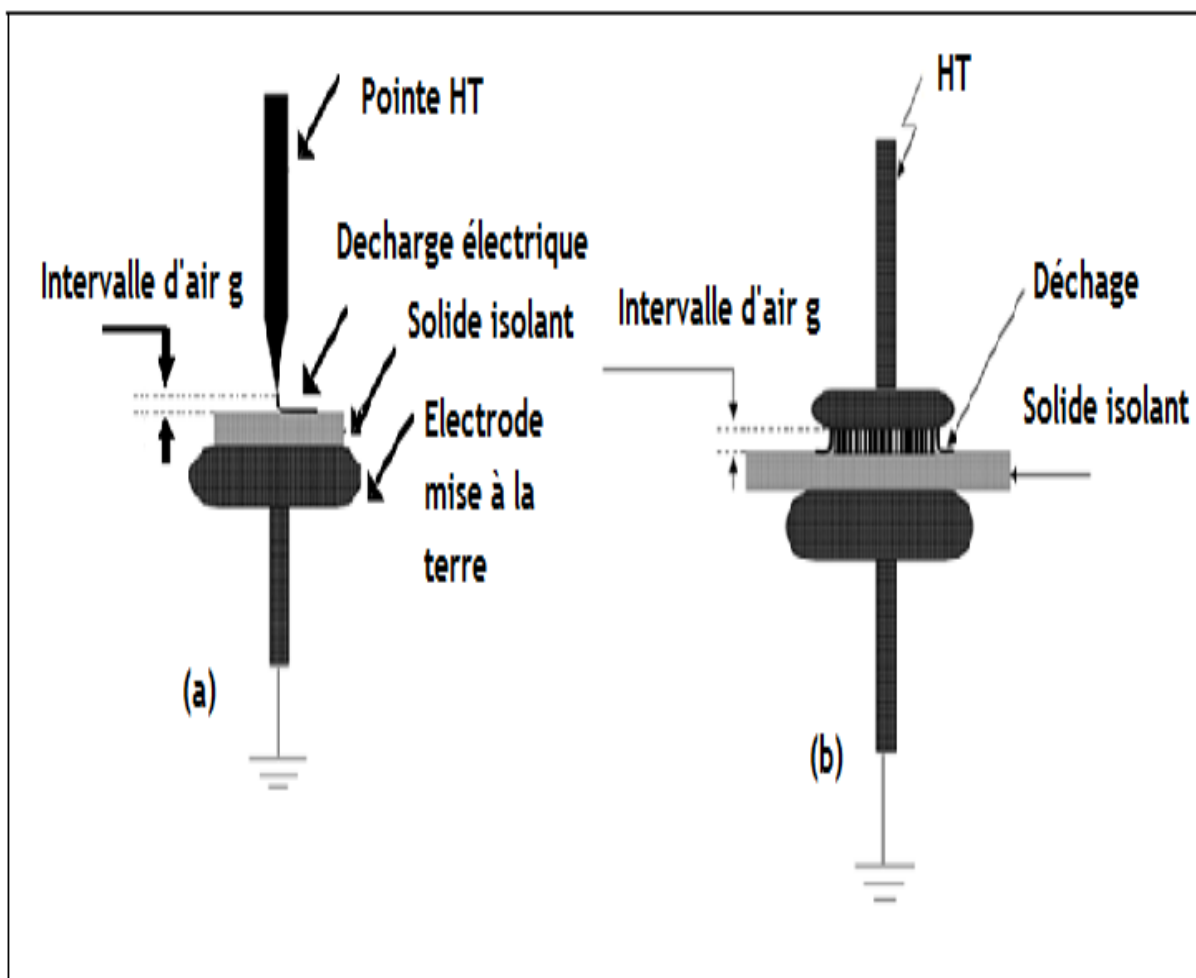


Fig. III. 8 : Décharge par leader

Pour de longs intervalles d'air, la naissance d'un leader peut avoir lieu sans la contribution de l'électrode opposée (**Fig. III. 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.

### III. 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 :

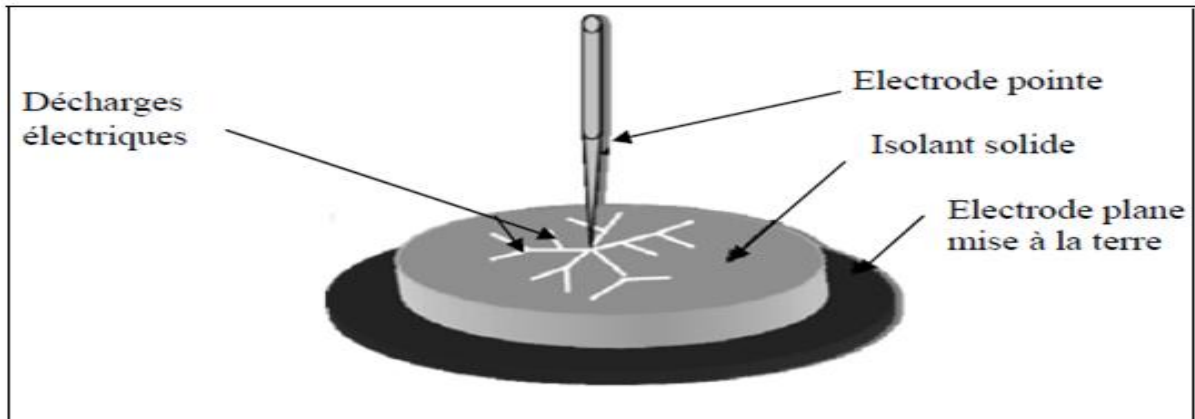


a) Système pointe - plan

b) Système plan - plan

**Fig. III. 9** : Décharge à barrière diélectrique

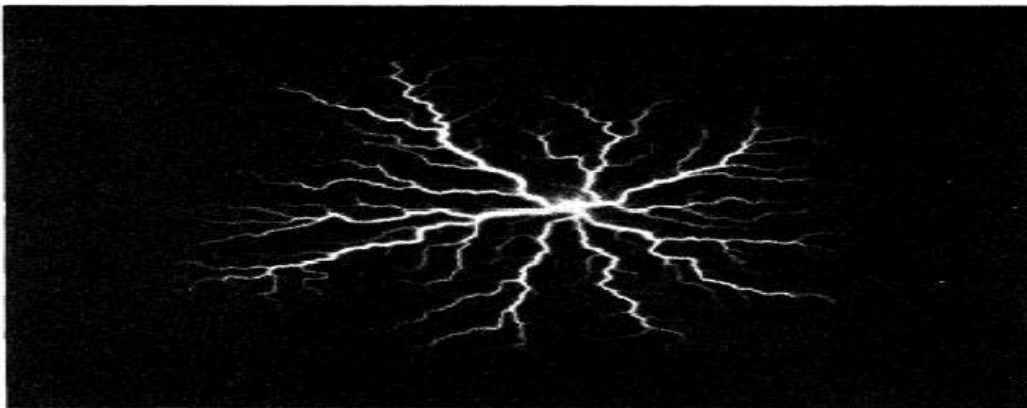
Les décharges à barrière diélectrique (**Fig. III. 9**) où les isolants gazeux et solide sont généralement en série entre les deux électrodes, la décharge se développe d'abord dans le volume du gaz avant qu'elle se propage sur la surface du solide.



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

Les décharges dites glissantes lorsque les deux électrodes haute tension et la terre 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. III. 10**).

### III. 8. 1 Décharges glissantes aux interfaces air/solide



**Fig. III. 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]

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 " , (**Fig. III. 11**).

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

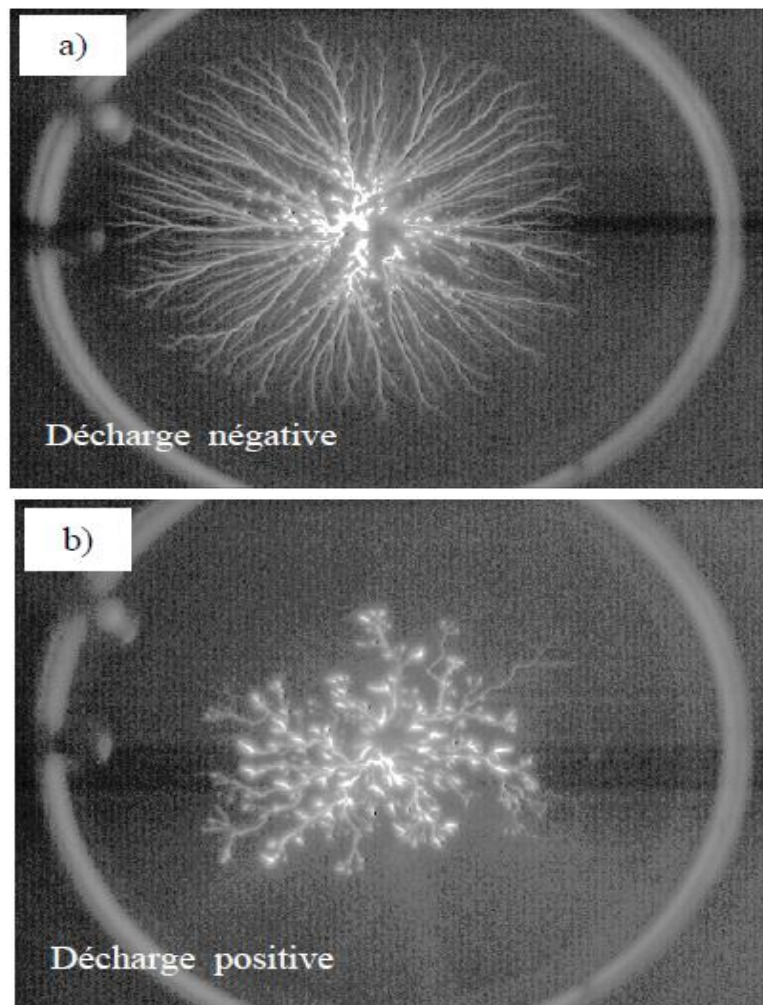
### III. 8. 2 Paramètres influençant les décharges de surface

#### III. 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 surfaciques émanant d'une pointe négative, se distinguent par des branches rectilignes (Fig III.12a).

Elles sont constituées d'un tronc principal duquel 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.

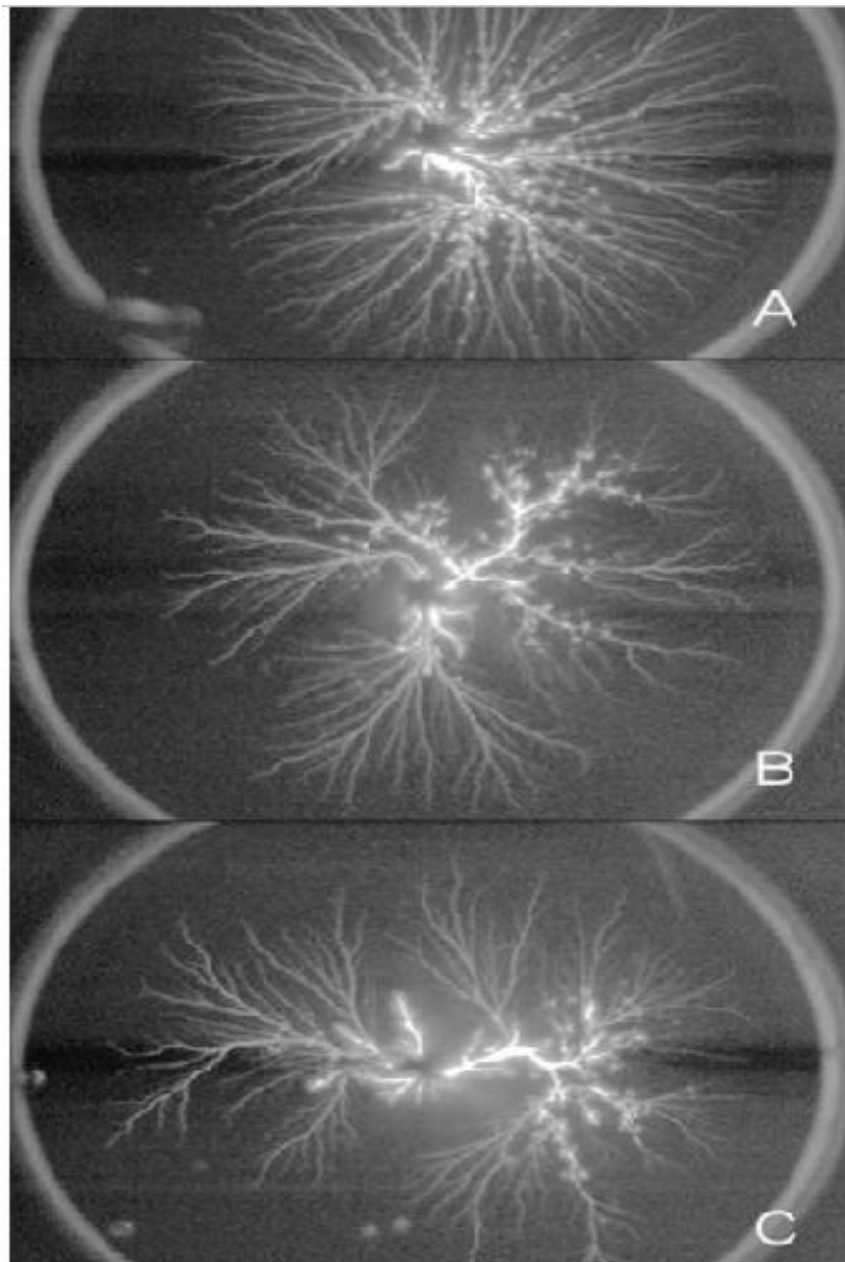


**Fig . III. 12 :** Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 KV (valeur crête) pour les deux polarités : (a) polarité négative, (b) polarité positive [33]



- Les décharges générées à partir d'une pointe positive ont une forme différente des décharges négatives (**Fig. III. 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.

### III. 8. 2. 2 Nature et épaisseur du solide isolant



**Fig. III. 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



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 III. 13.

L'aspect général change selon le matériau utilisé et la densité totale de branches dépend fortement de l'épaisseur du solide isolant.

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.

### **III. 8. 2. 3 Présence d'une barrière dans l'intervalle d'air interélectrode**

L'introduction d'un solide diélectrique dans l'espace interélectrode 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).

### **III. 8. 2. 4 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 [22].

### **III. 8. 2. 5 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 [29].

### **III. 8. 2. 6 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.

### **III. 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 de ces isolants nous a permis de constater que :

- Un matériau isolant est caractérisé par cinq grandeurs à savoir : rigidité diélectrique, permittivité complexe, facteur de pertes et résistance d'isolement (transversale et longitudinale).
- Un matériau isolant ne peut être considéré comme un bon isolant que lorsque celui-ci possède une permittivité très faible, des pertes électriques les plus faibles possibles, une rigidité diélectrique très élevée et un niveau de décharges partielles très bas.



# **Chapitre IV**

## **Partie expérimentale**



**IV. 1 Introduction**

L’objectif essentiel convoité à travers ce chapitre, consiste en la recherche d’une performance électrique équivalente entre un intervalle d’air à champ électrique non uniforme des deux systèmes, pointe – barrière polluée sévèrement – plan avec gouttes d’eau et celui du plan – plan métalliques sous tension continue positive et négative, dans un intervalle d’air variant entre 2 et 16 cm.

Pour une distance séparant la barrière en contact avec la pointe sous tension, polluée sévèrement avec un degré donné, le plan mis à la terre. La tension disruptive de l’espace d’air interélectrode variable a été mesurée plusieurs fois (25 mesures), puis une valeur moyenne de celle-ci a été déterminée.

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

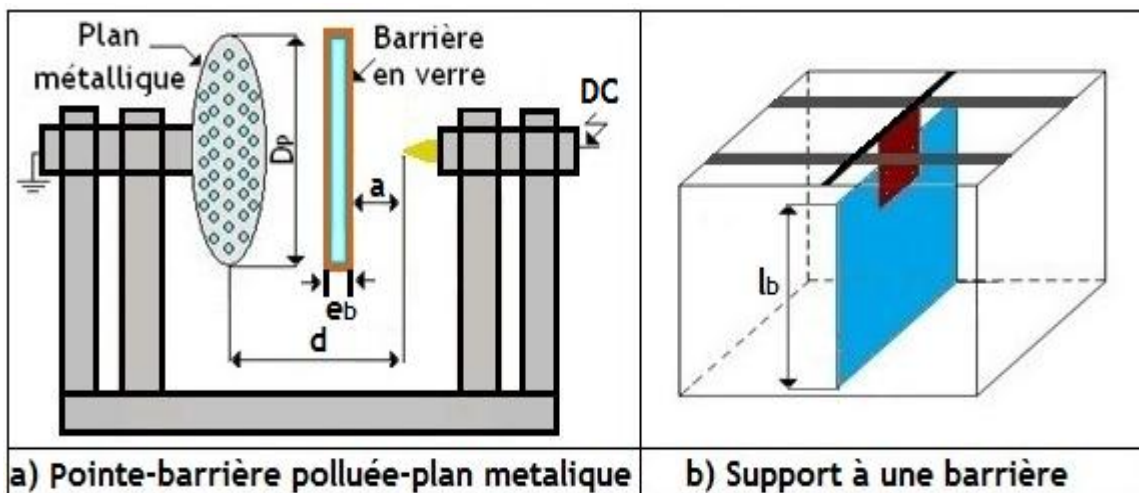
Puis, pour des intervalles d’airs qui sont égale à 5 et 10 cm la position optimale de la barrière protégeant le système pointe – plan a été établie.

Enfin, tous ces essais ont été appuyés par une visualisation du phénomène électrique, se développant dans l’espace d’air interélectrode des différentes configurations d’électrodes avec barrière sous 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.



**Fig. IV. 1 :** Systèmes pointe – barrière polluée – plan avec gouttes d’eau, et support de fixation de barrière de protection ( $D_p$  : diamètre du plan métallique circulaire ;  $l_b$  : longueur de la barrière en verre ;  $e_b$  : son épaisseur)

Ce dispositif a été déjà utilisé dans l'étude de T. Belhoul [1], il se compose d'un support en bois en forme de U, ayant 45 cm de hauteur, 39 cm de longueur, sur lequel sont encastrés deux bras en bois. Sur ces derniers sont vissées des électrodes pointe et plan (**Fig. IV. 1. a**). L'électrode pointue 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 0,3 mm de rayon de courbure, elles peuvent être vissées sur les tiges sortant des deux bras du support en forme de U. Ces deux bras encastrés sont mobiles pour permettre la variation de la distance interélectrode.

La barrière isolante exploitée dans notre étude est en verre, de forme carrée de dimensions (40 x 40 x 0,5) cm<sup>3</sup> (**Fig. IV. 1. b**). La fixation de la barrière sur le support en bois de forme parallélépipédique de dimensions (65 x 55 x 72) cm<sup>3</sup>, leur maintien perpendiculaire à l'axe horizontal se réalise au moyen d'un autre support en bois en forme de T coulissant sur un rail en bois installé sur la paroi supérieure du parallélépipède qui permet de changer la position de la barrière. Cette dernière est attachée à ce support à l'aide de chevilles en plastique (**Fig. IV. 1. b**). Le support suscitée en forme citée précédemment peut être introduit à l'intérieur du parallélépipédique, afin de pouvoir varier aisément et simultanément la distance interélectrode (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.

#### IV. 2. 2 Circuits de mesure et de visualisation

La mesure de la performance électrique du système avec barrière polluée 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 (**Fig. IV. 2**). Le circuit de mesure de la tension disruptive du système considéré se compose d'un transformateur  $T_r$  qui délivre à son secondaire une tension 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.

La tension de ce circuit est redressée par une diode D et lissée par un condensateur C. L'objet  $O_e$  n'est tout autre que le système d'électrodes pointe – barrière – plan, qui est connecté aux limites de la résistance de protection R, et au diviseur de tension résistif  $R_0/R_u$ . Le circuit de visualisation se constitue d'une caméra pour l'enregistrement des différentes phases de la décharge électrique se développant dans l'intervalle interélectrode du système, d'un PC pour une meilleure observation et analyse de celle-ci.

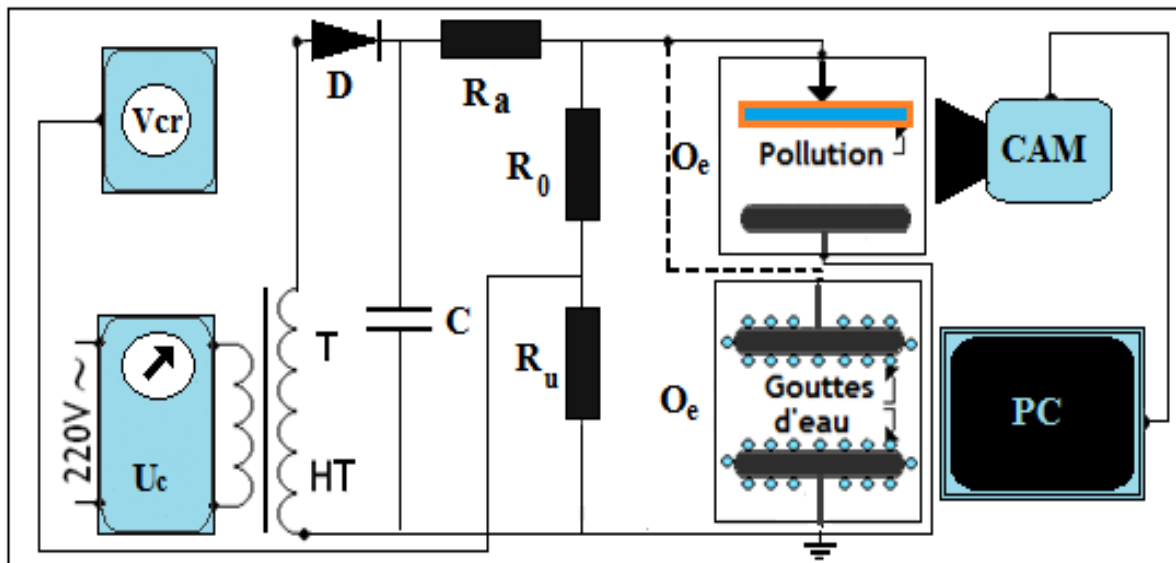


Fig. IV. 2 : Schéma de mesure et de visualisation

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

La solution polluante utilisée se compose 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 conductivité volumique désirée est de 25 mS/cm (Fig. IV. 3).



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

Fig. IV. 3 : 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.

D'après l'étude réalisée par S. SLIMANI [6], le degré de sévérité de pollution est constant à partir de 15 mS/cm, c'est pour cette raison qu'on a choisi une conductivité volumique de 25 mS/cm.

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

Le mode de distribution de celle-ci a été utilisé concernant l'application de la solution polluante sur la barrière :

- la pollution doit être uniformément réparti sur les deux grandes faces de la barrière et leur trois bords.

La couche de pollution sur la barrière a été appliquée comme suit :

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

Après l'application de la pollution sur la surface de la barrière, la mise sous tension d'essai du système d'électrodes considéré est effectuée immédiatement pour éviter l'assèchement naturel de celle-ci. La barrière doit être nettoyée, rincée à l'eau puis séchée à l'aide du papier absorbant avant chaque nouvel essai, à l'aide d'une éponge imbibée de la solution polluante, la pollution est déposée sur la surface de la barrière sous forme de bandes de pollution disposées en parallèle, reliées les unes aux autres de telle sorte à obtenir une seule couche continue de même épaisseur tout le long de la surface de cette barrière .

#### IV. 2. 5 Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques [26]

La tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système électrique avec barrière polluée est strictement liée aux conditions atmosphériques nominales, dont on trouve la température ambiante, la pression et l'humidité de l'air environnant. La valeur de la tension 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.

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

Avec P en kPa,  $\theta$  en C°

$K_h$  : facteur de correction relatif à l'humidité.

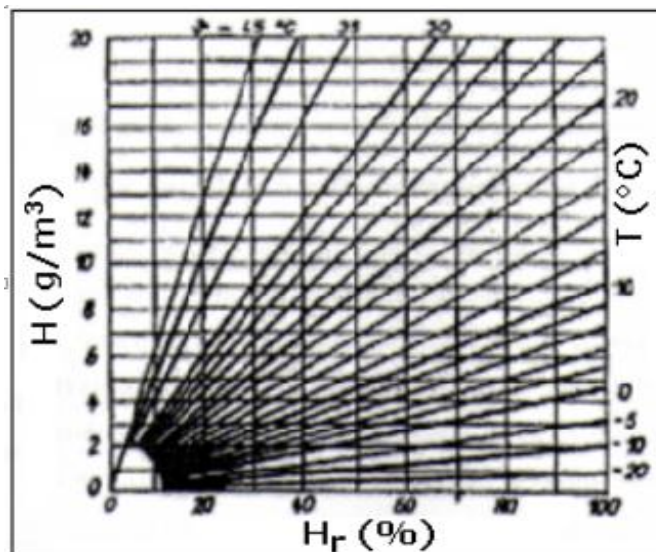


Fig. IV. 4 :  $H = f(H_r, T)$

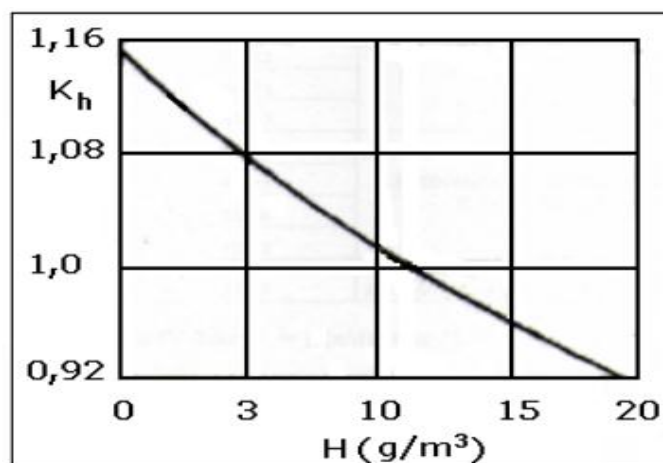


Fig. IV. 5 :  $K_h = f(H)$

Pour déterminer le facteur de correction  $K_h$ , relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative  $H_r(\%)$  vers l'humidité absolue  $H(g/m^3)$ , 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 représentée par la figure IV. 5.

### IV. 3 Paramètres d'influence de la performance électrique du système

#### IV. 3. 1 Tension continue positive

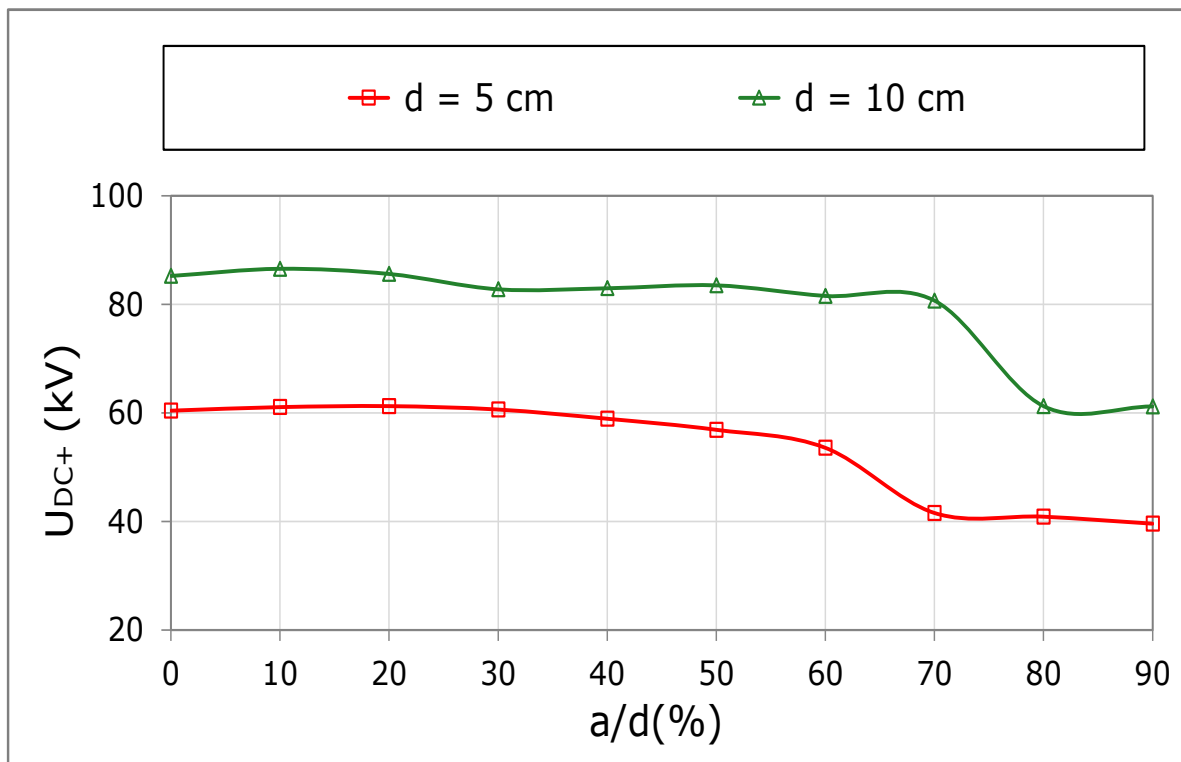
##### IV. 3. 1. 1 Position optimale de la barrière dans le système pointe sous tension continue positive – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d'eau mis à la terre

Pour une longueur de l'intervalle d'air pointe – plan égal à 5 cm et 10 cm, l'allure de la performance électrique d'un système pointe – barrière polluée – plan en fonction de position relative de la barrière polluée ( $a/d$ ), sous tension continue positive, c'est illustrée par la figure IV. 6.

Avec :

$d$  : la distance interélectrode

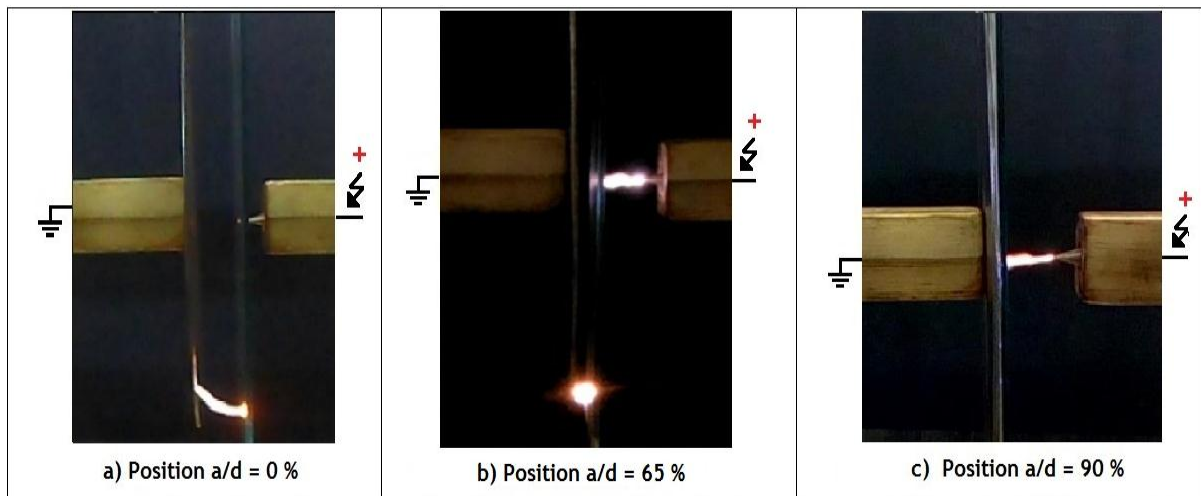
$a$  : la distance entre la barrière et l'électrode sous tension.



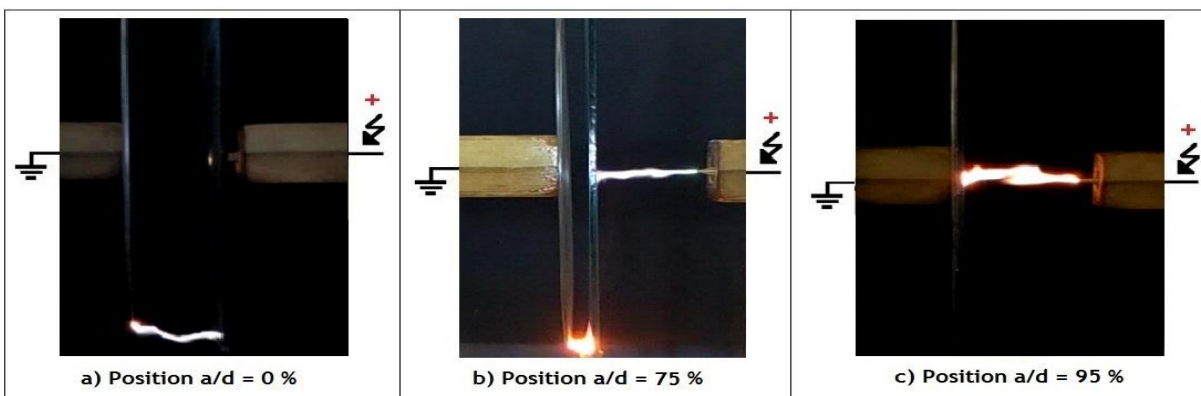
**Fig. IV. 6** : Tension disruptive d'un système pointe – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d'eau en fonction de la position relative de la barrière ( $a/d$ ), sous tension continue positive ( $\sigma_v = 25$  mS/cm)

Il en résulte, pour  $d = 5$  cm, la performance électrique du système avec barrière polluée, est maximale lorsque la position relative ( $a/d$  varie de 0 à 60 %), pour  $d = 10$  cm elle est maximale

lorsque  $a/d$  varie de 0 à 70 %. Au-delà, elle décroît jusqu'à une valeur minimale qui est fonction de la distance interélectrode.



**Fig. IV. 7 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière polluée pour  $d = 5$  cm, sous tension continue positive



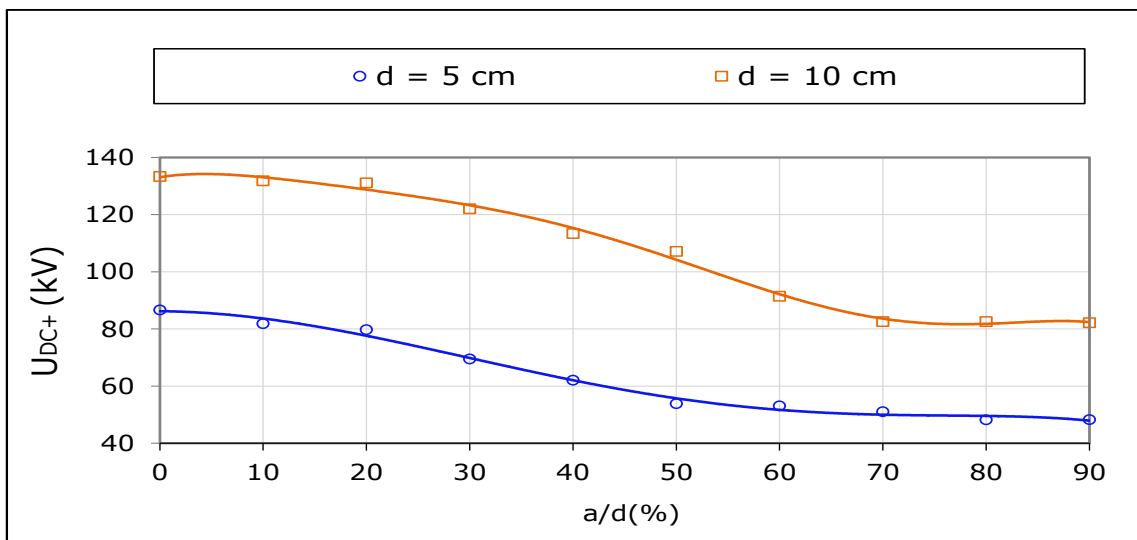
**Fig. IV. 8 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière polluée pour  $d = 10$  cm, sous tension continue positive

Il résulte d'après les figures IV. 7 et IV. 8, que la décharge électrique dans le cas d'une barrière polluée, mise en contact avec la pointe sous tension ( $a/d = 0$  %) que la disruption d'un tel espace d'air est régie pratiquement par une seule décharge négative reliant le bord du plan à celui de la barrière fortement polluée comme si celles-ci sont équivalentes à des électrodes métalliques. Pour la position relative ( $a/d = 65$  % et  $75$  %), nous constatons qu'une décharge positive qui part de la pointe vers la barrière polluée et une autre décharge négative qui progresse du bord de celle-ci vers le plan conducteur. Pour  $a/d = 90$  % et  $95$  %, une seule décharge positive émane de la pointe et évolue vers la barrière polluée en contact avec le plan.

Il est à constater, que lorsque la barrière est en contact avec la pointe sous tension continue positive, c'est la décharge négative qui crée la rupture électrique du système c'est pour cela que la performance est plus élevée dans ce cas.

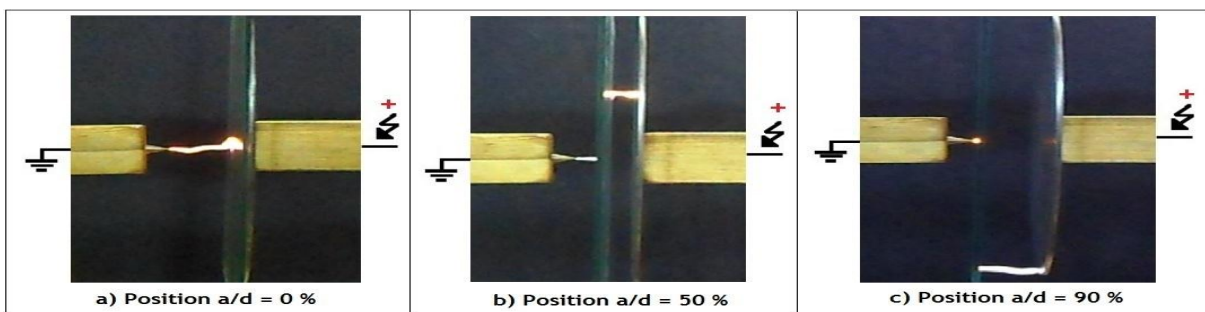
**IV. 3. 1. 2 Position optimale de la barrière pour un système plan sous tension continue positive – barrière polluée – pointe à la terre**

Pour une longueur d'un intervalle d'air plan – pointe égal à 5 cm et 10 cm, l'allure de la performance électrique d'un système plan – barrière polluée – pointe en fonction de (a/d), position relative de la barrière polluée sous tension continue positive, est illustrée par la figure IV. 9.

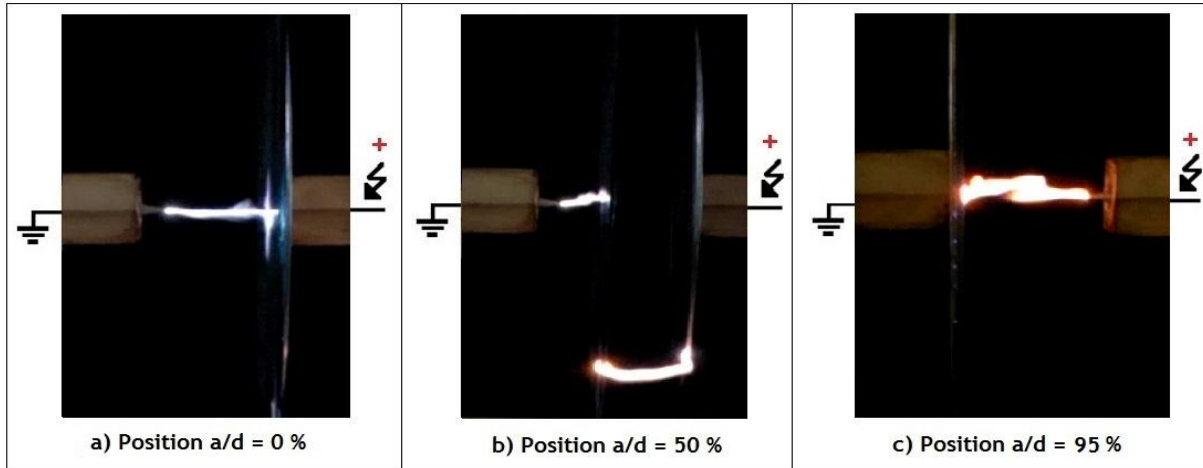


**Fig. IV. 9 :** Tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système plan sous tension continue positive – barrière polluée – pointe en fonction de la position de la barrière ( $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$ )

Il en résulte que pour  $d = 5 \text{ cm}$  et  $d = 10 \text{ cm}$ , la performance électrique du système avec barrière polluée, est maximale lorsque celle-ci est en contact avec le plan mis sous tension ( $a/d = 0 \%$ ). Au-delà, elle décroît jusqu'à une valeur minimale en fonction de la distance interélectrode ( $a/d = 90 \%$ ).



**Fig. IV. 10 :** Chemin de la décharge électrique dans l'intervalle d'air d'un système plan sous tension continue positive – barrière polluée – pointe pour différentes positions de la barrière



**Fig. IV. 11** : Chemin de la décharge électrique dans l'intervalle d'air d'un système plan – barrière polluée – pointe pour différentes positions de la barrière, sous tension continue positive

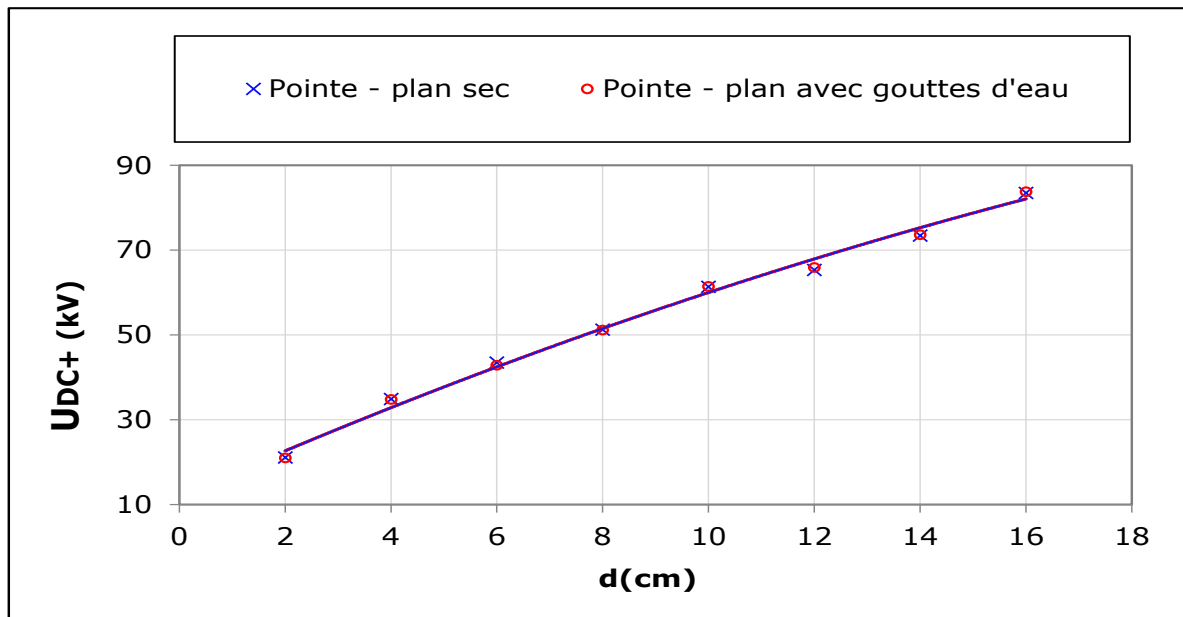
D'après les figures IV. 10 et IV. 11, que la décharge électrique dans le cas d'une barrière polluée mise en contact avec le plan sous tension ( $a/d = 0\%$ ) la disruption d'un tel espace d'air est régie pratiquement par une seule décharge négative reliant la pointe et le bord de la barrière fortement polluée. Pour la position relative  $a/d = 50\%$ , on constate qu'une décharge négative de la pointe vers la barrière polluée et une autre décharge positive du bord de celle-ci vers le plan conducteur, et pour  $a/d = 90\%$  et  $95\%$ , une seule décharge positive qui se développe du plan vers la barrière polluée.

Il en résulte que pour la tension continue positive pour  $d = 5\text{ cm}$  et  $10\text{ cm}$ , la décharge négative sort en premier, lorsque la barrière est en contact avec le plan mis sous tension positive, le système devient comme celui du plan – pointe donc la tension de rupture est maximale et sa dû au développement de la décharge négative qui est plus grande que la positive. Au-delà, elle décroît jusqu'à une valeur minimale en fonction de la position relative ( $a/d = 90\%$  et  $95\%$ ).

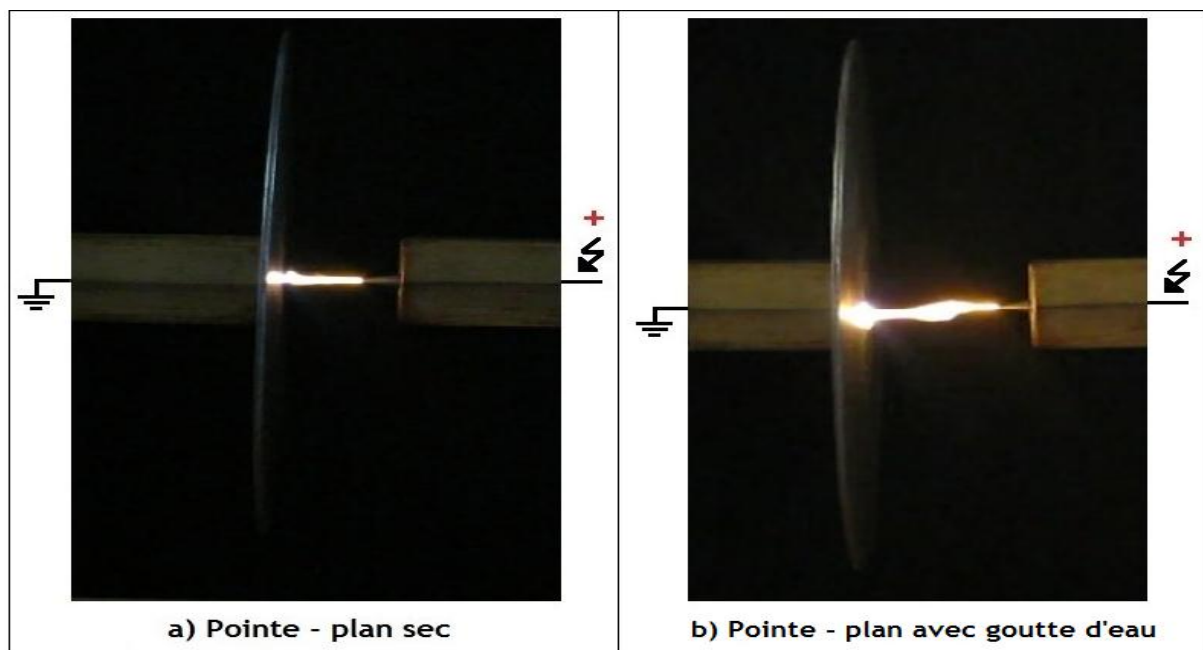
### IV. 3. 1. 3 Distance interélectrode et dépôt de goutte d'eau sur le plan

L'allure de la tension disruptive de l'espace d'air du système pointe – plan métallique est illustré par la figure IV.12.

Il en résulte d'après la figure, qu'en présence ou bien en absence de gouttes d'eau sur le plan, la tension de disruption du système pointe - plan croît avec l'augmentation de la distance interélectrode. La performance électrique du système est la même pour un plan recouvert de gouttes d'eau ou sans celles-ci.



**Fig. IV. 12 :** Tension disruptive de l'intervalle d'air du système pointe – plan métallique sans ou avec gouttes d'eau, sous tension continue positive



**Fig. IV. 13 :** Chemin de la décharge électrique pour un système pointe – plan métallique sans ou avec gouttes d'eau, sous tension continue positive

D'après la figure IV. 13, une seule décharge positive évoluant dans l'air de la pointe au plan sans gouttes d'eau. Concernant la configuration pointe - plan avec gouttes d'eau nous constatons que la décharge positive évolue toujours de la même manière, mais cette fois-ci des extrémités des gouttes déposées sur le plan dont leur géométrie est équivalente à des petits cônes générés suite à l'accentuation du champ électrique très intense au bord du plan métallique.

IV. 3. 1. 4 Absence ou présence de gouttes d'eau sur les deux électrodes du système plan - plan

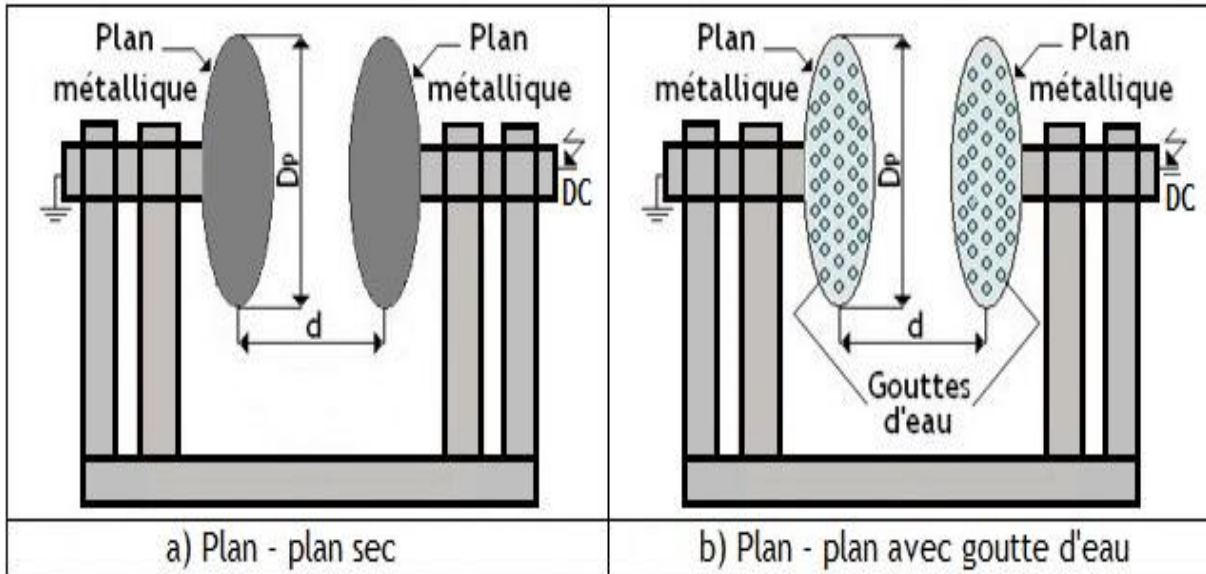


Fig. IV. 14 : Dispositif du système plan – plan sans ou avec gouttes d'eau ( $D_p$  : diamètre du plan ;  $d$  : distance interélectrode)

En utilisant le dispositif du système plan – plan qui est illustré par la figure IV. 14 pour mesurer la tension disruptive de l'intervalle d'air du système plan – plan avec ou sans gouttes d'eau.

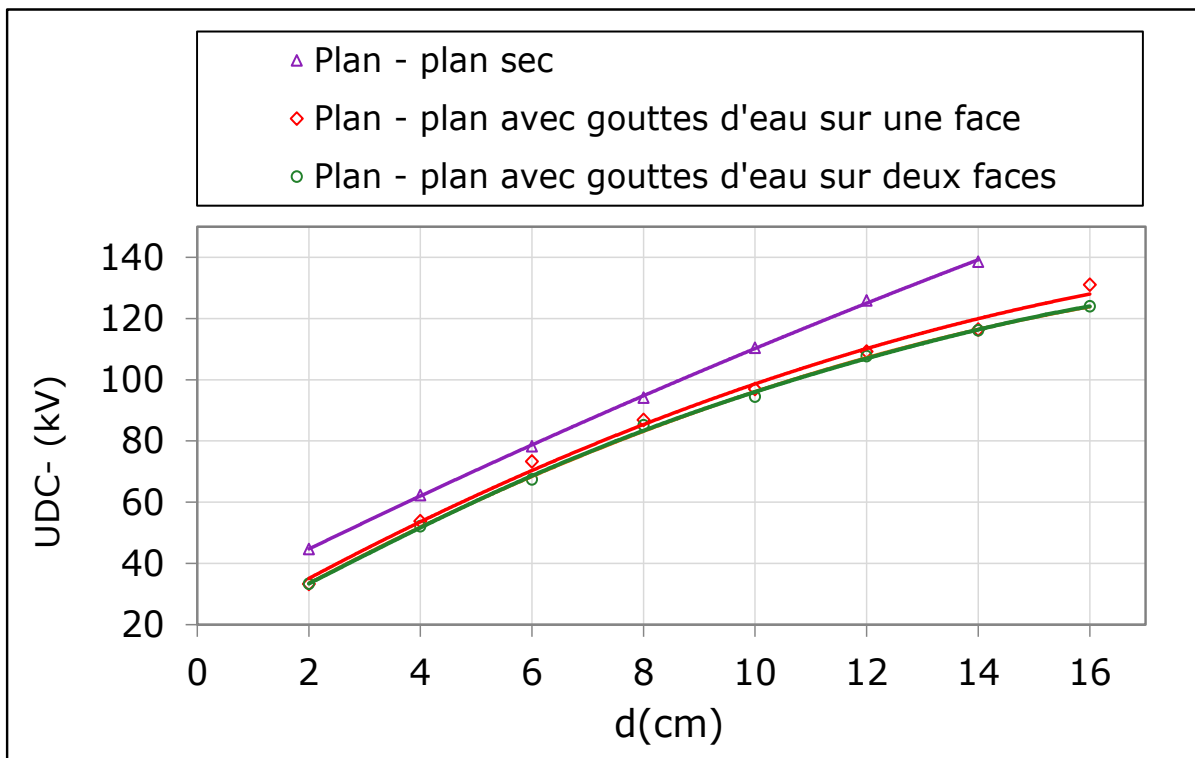
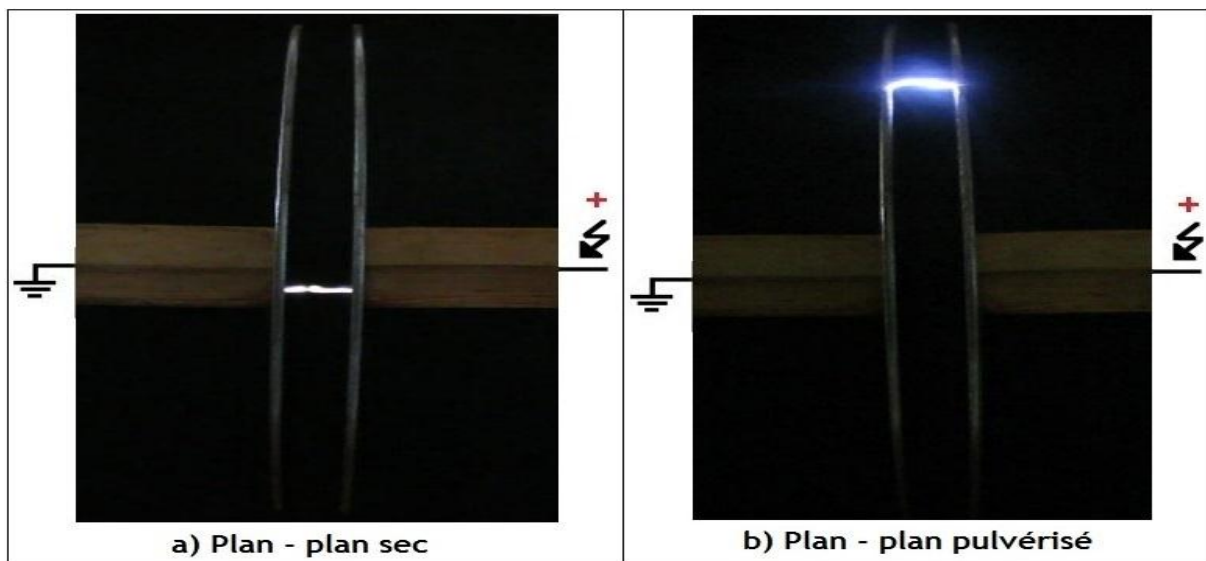


Fig. IV. 15 : Tension disruptive de l'intervalle d'air du système plan – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau sous tension continue positive (conductivité d'eau  $1200 \mu\text{S/cm}$ )

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 étudiés 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 celle-ci.

Cela peut s'expliquer par le fait que les gouttes d'eau prennent la forme de petites saillies qui perturbent ainsi le champ électrique régnant dans cet intervalle d'air.



**Fig. IV. 16** : Chemin de la décharge électrique pour un système plan – plan métalliques sous tension continue positive (conductivité d'eau est 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

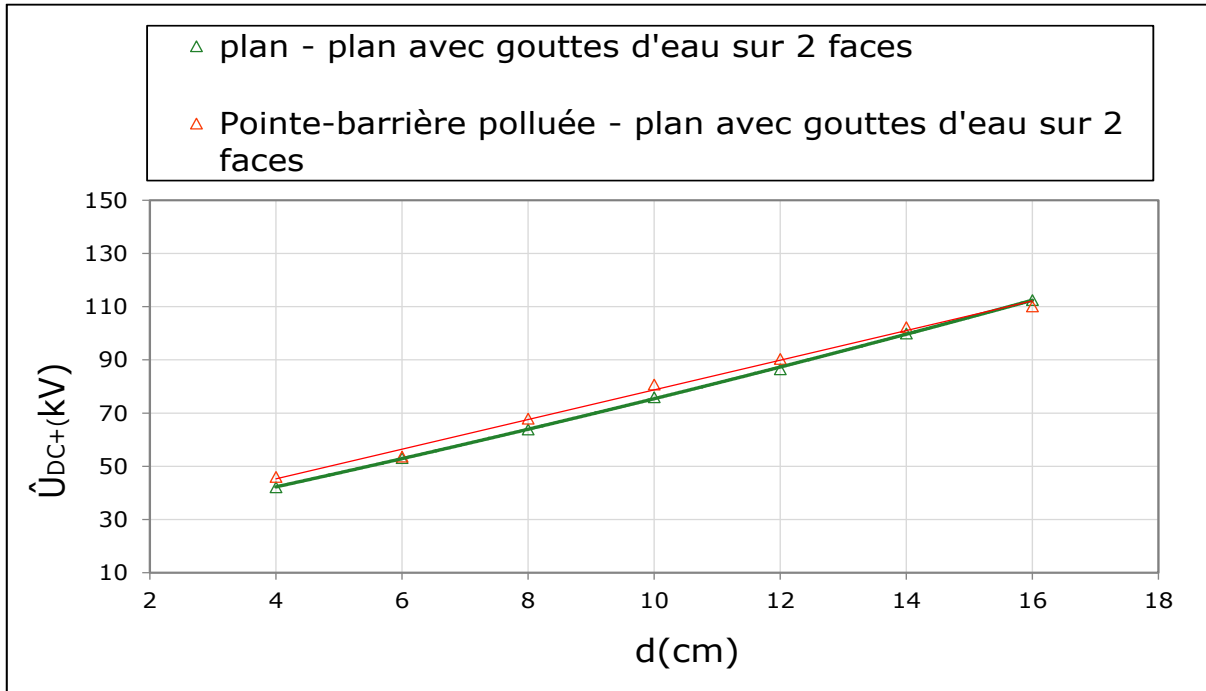
D'après la figure IV. 16, une seule décharge positive évoluant dans l'air du bord au bord des deux électrodes planes sans gouttes d'eau car c'est à ces endroits que le rayon de courbure est le plus faible. Concernant la configuration plan - plan avec gouttes d'eau, nous remarquons que la décharge positive 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.

#### **IV. 3. 1. 5 Equivalence de la performance électrique entre plan – plan métalliques et pointe – barrière polluée - plan sous tension continue positive**

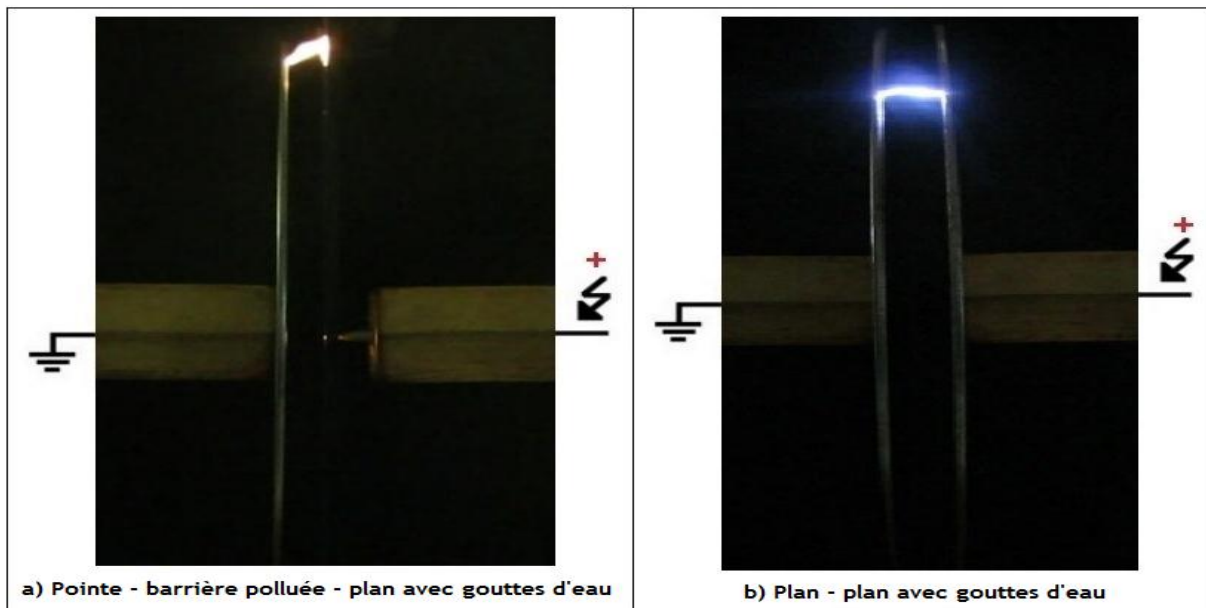
L'allure des tensions d'amorçage de l'intervalle d'air des systèmes d'électrodes pointe - barrière fortement polluées – plan et plan - plan métalliques avec gouttes d'eau en fonction de la distance interélectrode entre 4 et 14 cm est illustrée par la figure IV. 17.



Il en résulte une superposition des courbes de tension d'amorçage de ces deux systèmes dans l'espace d'air suscité. Nous pouvons conclure que l'existence d'une équivalence de performance électrique presque parfaite entre ces deux configurations dans l'intervalle d'air susmentionné et sous conditions de pollution très sévères, a été mise en évidence.



**Fig. IV. 17 :**  quivalence de la performance électrique des systèmes pointe – barrière polluée uniformément – plan avec gouttes d’eau et plan – plan métalliques avec gouttes d’eau, sous tension continue positive ( $\sigma_v = 25 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. IV. 18 :** Chemin de la décharge électrique du système pointe – barrière polluée – plan et plan – plan, sous tension continue positive

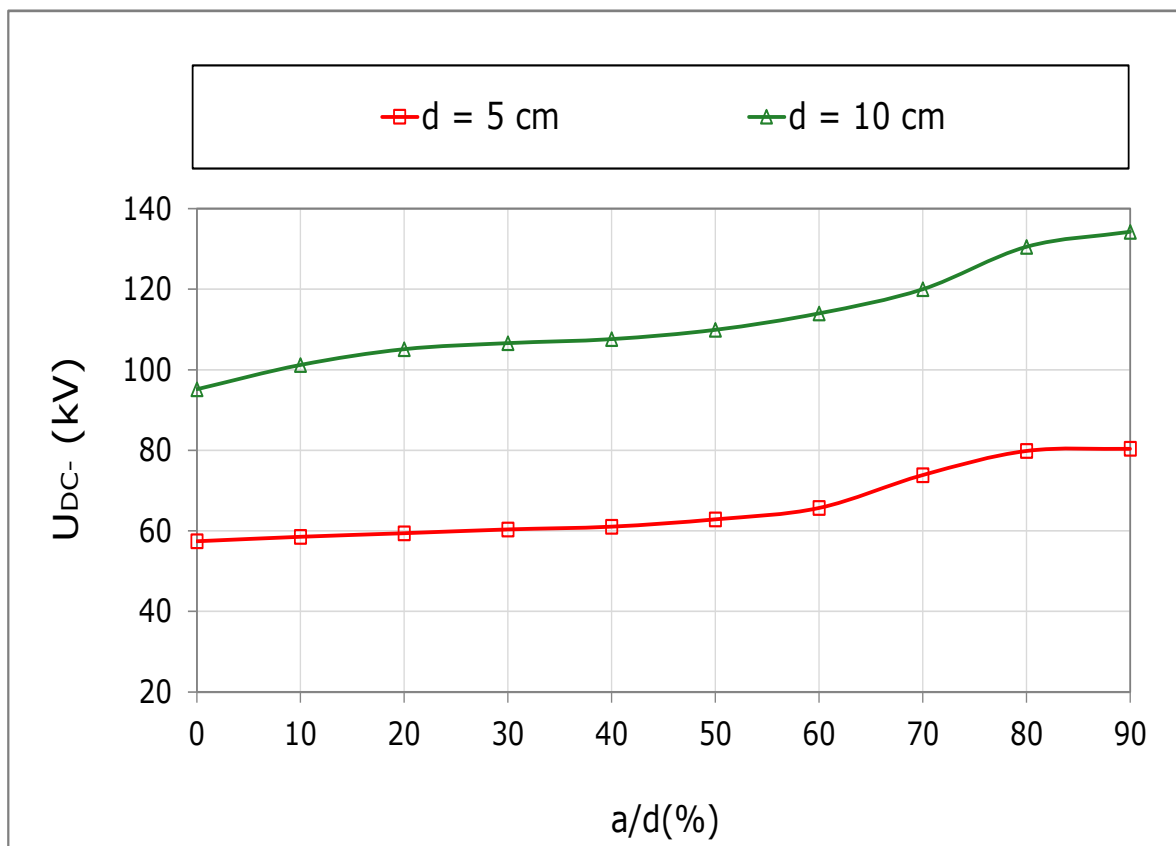


Il en résulte de la figure IV. 18, que la disruption d'un tel espace d'air est régie pratiquement par une seule décharge électrique positive reliant les bords de la barrière fortement polluée et le plan comme si celles-ci sont équivalentes à des électrodes métalliques. Pour la configuration plan-plan avec gouttes d'eau nous remarquons que la décharge positive évolue du bord au bord des électrodes planes, ce qui explique que lorsque la barrière est polluée en contact avec la pointe, la performance électrique devienne pratiquement comme celle du système plan – plan.

### IV. 3. 2 Tension continue négative

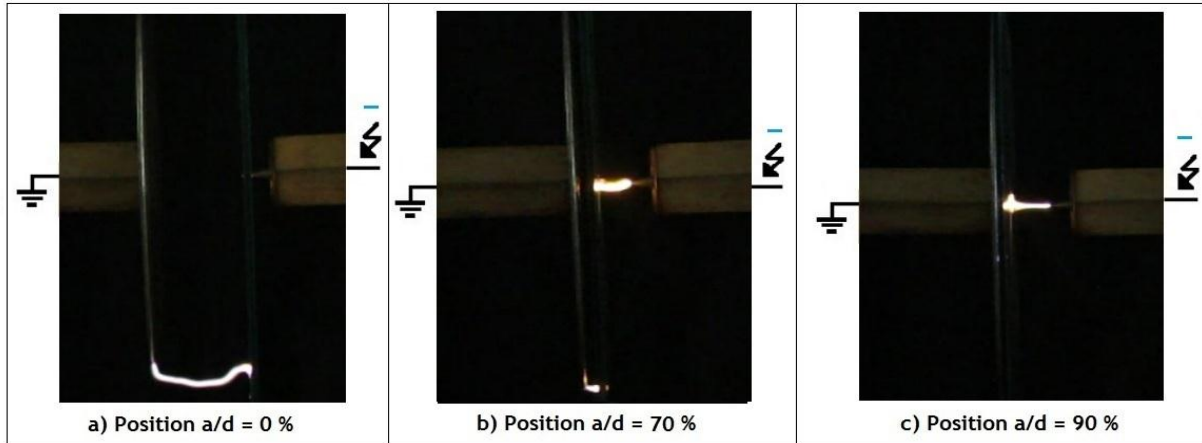
#### IV. 3. 2. 1 Position optimale de la barrière dans le système pointe sous tension continue négative – barrière polluée – plan métallique avec gouttes d'eau mis à la terre

Pour une longueur d'un intervalle d'air pointe – plan égal à 5 cm et 10 cm, l'allure de la performance électrique d'un système pointe – barrière polluée – plan en fonction de  $(a/d)$ , position relative de la barrière polluée sous tension continue négative, est illustrée par la figure IV. 19. Avec  $d$  la distance interélectrode et  $a$  la distance entre la barrière et l'électrode sous tension.

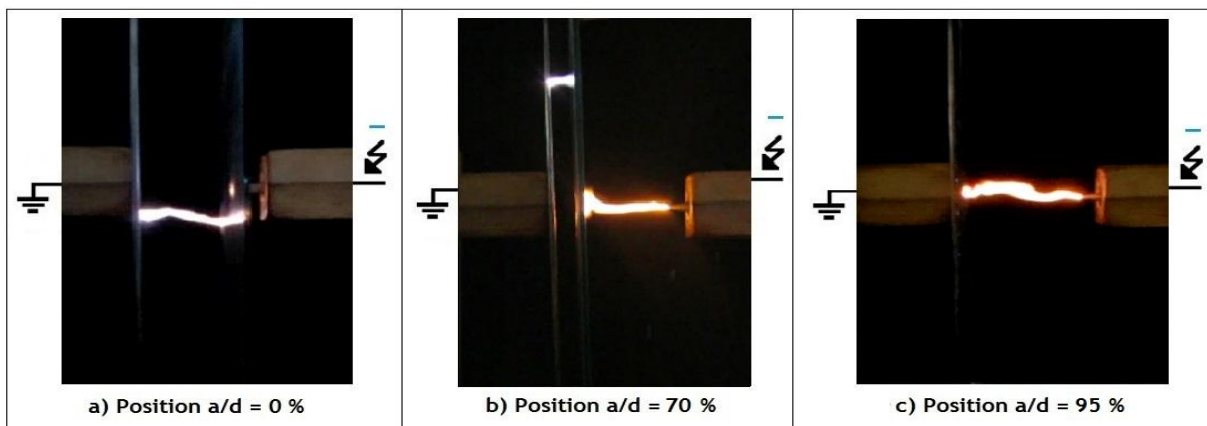


**Fig. IV. 19** : Tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système pointe – barrière polluée – plan en fonction de la position relative de la barrière  $(a/d)$ , sous tension continue négative ( $\sigma_v = 25$  mS/cm)

Il résulte d'après la figure IV. 19, que pour  $d = 5$  cm et  $d = 10$  cm, la performance électrique du système avec barrière polluée, est minimale lorsque celle-ci est en contact avec le plan mis à la terre ( $a/d = 0$  %). Au-delà, elle croît jusqu'à une valeur maximale en fonction position relative ( $a/d = 90$  % et  $95$  %).



**Fig. IV. 20 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour  $d = 5$  cm, sous tension continue négative

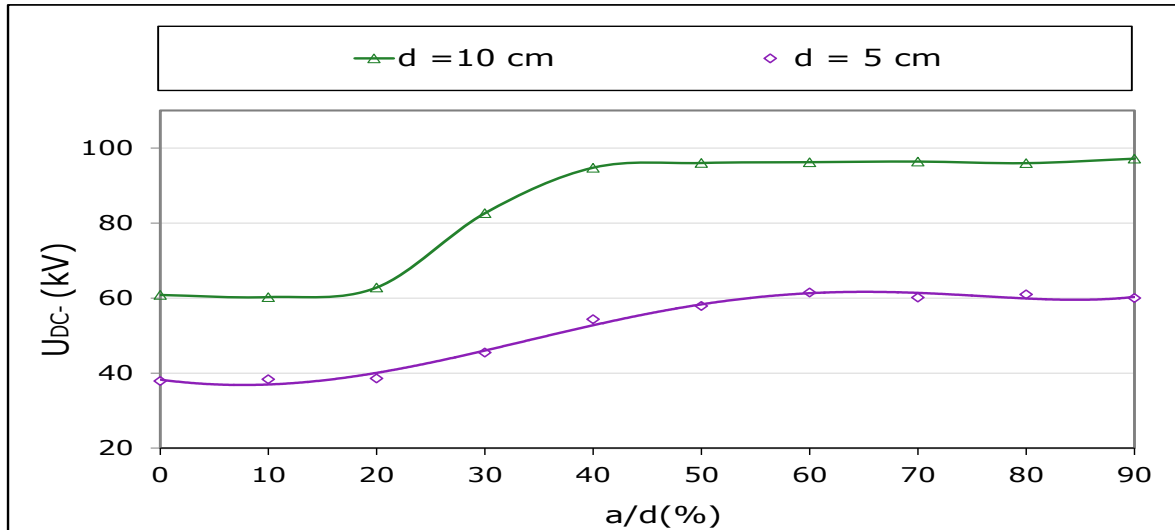


**Fig. IV. 21 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour  $d = 10$  cm, sous tension continue négative

Il en résulte des figures IV. 20 et IV. 21, que la décharge électrique dans le cas d'une barrière polluée, mise en contact avec la pointe sous tension ( $a/d = 0$  %) est régie pratiquement par une seule décharge positive reliant le bord du plan à celui de la barrière fortement polluée comme si celles-ci sont équivalentes à des électrodes métalliques. Pour la position relative de  $a/d = 70$  %, nous constatons qu'une décharge négative qui part de la pointe vers la barrière polluée et une autre décharge positive qui progresse du bord de celle-ci vers le plan conducteur. Pour la position relative  $a/d = 90$  % et  $95$  %, une seule décharge négative émane de la pointe et évolue vers la barrière polluée en contact avec le plan.

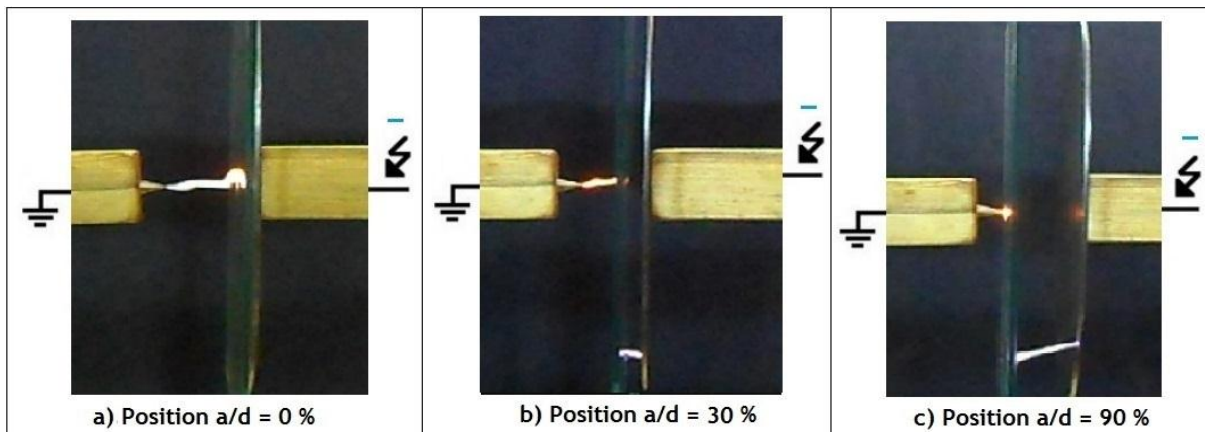
**IV. 3. 2. 2 Position optimale de la barrière pour un système plan sous tension continue négative – barrière polluée – pointe à la terre**

Pour une longueur d'un intervalle d'air plan – pointe égal à 5 cm et 10 cm, l'allure de la performance électrique d'un système plan – barrière polluée – pointe en fonction de la position relative (a/d) de la barrière polluée sous tension continue positive, est illustrée par la figure IV. 22.

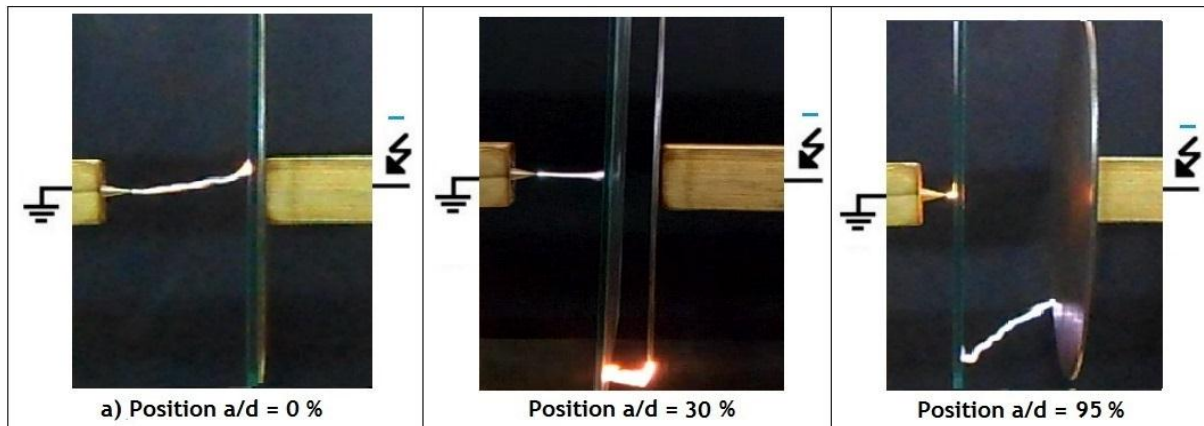


**Fig. IV. 22 :** Tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système plan avec gouttes d'eau – barrière polluée – pointe en fonction de la position de la barrière a/d, sous tension continue négative ( $\sigma_v = 25$  mS/cm)

Il en résulte, que pour les distances interélectrode  $d = 5$  et  $10$  cm, la performance électrique du système avec barrière polluée, est minimale lorsque celle-ci est en contact avec le plan mis sous tension ( $a/d = 0\%$ ). Au-delà, elle croît jusqu'à une valeur maximale en fonction de la distance interélectrode ( $a/d = 90\%$  et  $a/d = 95\%$ ).



**Fig. IV. 23 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour  $d = 5$  cm, sous tension continue négative



**Fig. IV. 24 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière pour  $d = 10$  cm, sous tension continue négative

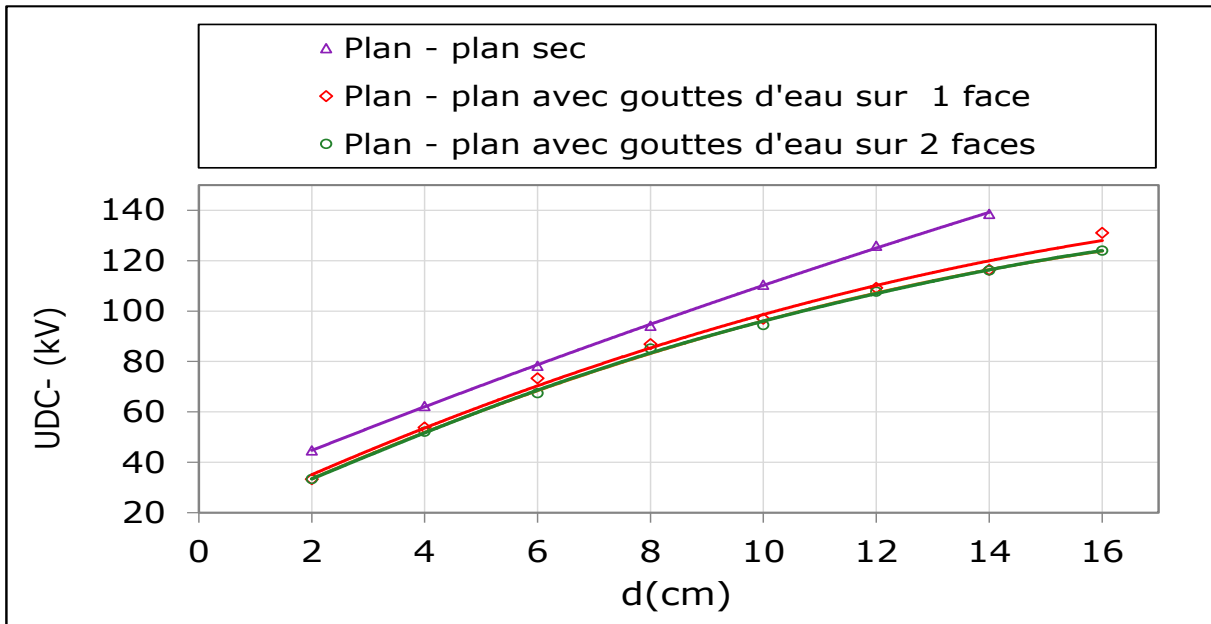
Il résulte d'après les figures IV.23 et IV. 24, que la décharge électrique dans le cas d'une barrière polluée mise en contact avec le plan sous tension ( $a/d = 0\%$ ) la disruption d'un tel espace d'air est régie pratiquement par une seule décharge positive reliant la pointe et le bord de la barrière fortement polluée. Pour la position relative de  $a/d = 30\%$ , on constate qu'une décharge positive de la pointe vers la barrière polluée et une autre décharge négative du bord de celle-ci vers le plan conducteur, et pour  $a/d = 90\%$  une seule décharge négative qui se développe du plan vers la barrière polluée.

Il en résulte que pour la tension continue négative, la décharge positive sort en premier, lorsque la barrière est en contact avec le plan mis sous tension négative, le système devient comme celui du plan – pointe donc la tension de rupture est minimale, ça dû au développement de la décharge positive qui est plus petite que la négative. Au-delà, elle croît jusqu'à une valeur maximale en fonction de la position relative de  $a/d = 90\%$ , ça dû à la décharge électrique négative qui sort dans ce cas du bord du plan vers le bord de la barrière.

#### IV. 3. 2. 3 Distance interélectrode et dépôt de goutte d'eau sur le plan

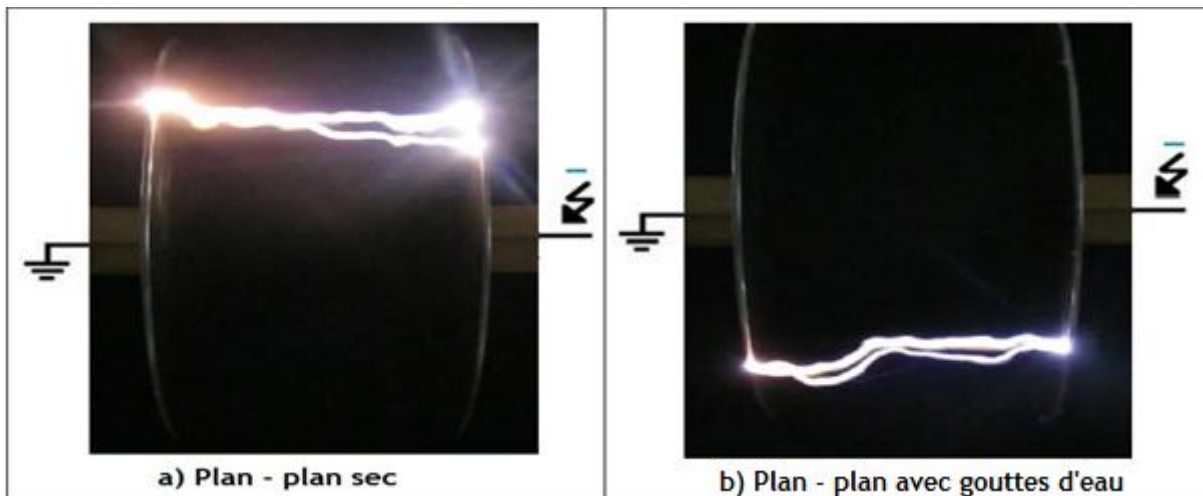
L'allure de la tension disruptive de l'espace d'air du système plan – plan métallique est illustrée par la figure IV.25.

Il résulte d'après la figure. IV. 25, que pour une taille donnée de ces électrodes planes et métalliques de 40 cm de diamètre, pour des intervalles d'air variant entre 2 cm et 16 cm, la tension de disruption de l'espace d'air des systèmes étudiés 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 celles-ci.



**Fig. IV. 25 :** Tension disruptive de l’intervalle d’air du système plan – plan métalliques avec ou sans gouttes d’eau, sous tension continue négative

Cela peut s’expliquer par le fait que les petites gouttes d’eau prennent une forme de petites saillies qui perturbent ainsi le champ électrique régnant dans cet intervalle d’air.



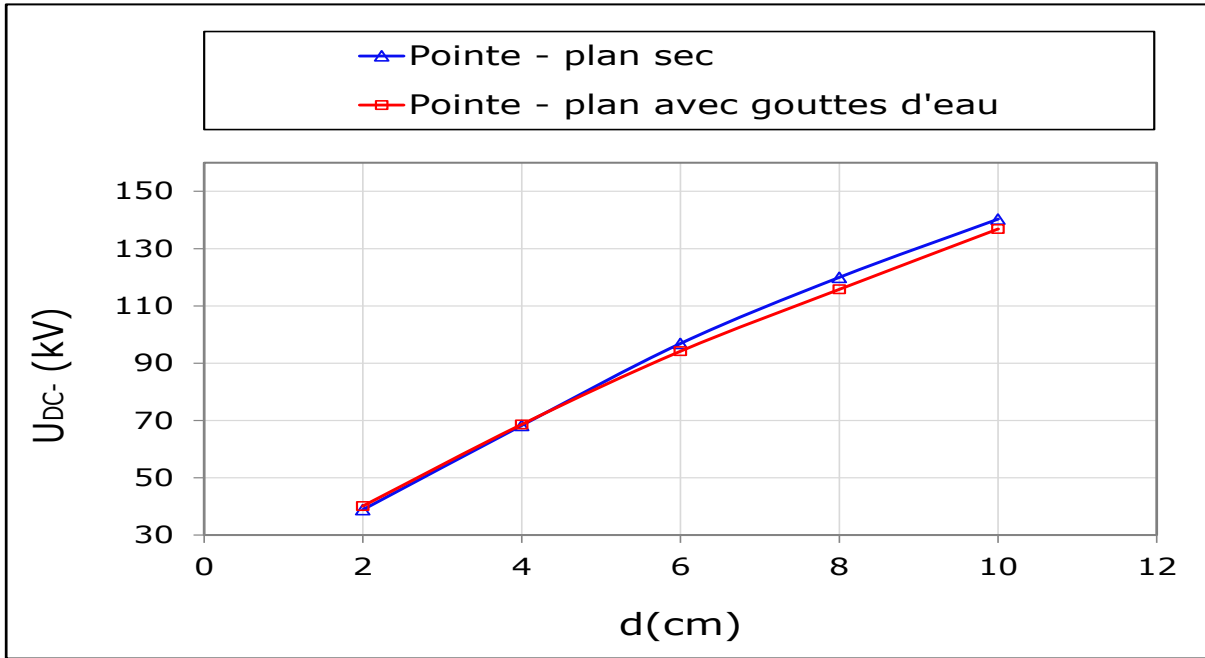
**Fig. IV. 26 :** Chemin de la décharge du système plan – plan métalliques sans ou avec gouttes d’eau, sous tension continue négative

D’après la figure. IV. 26, une seule décharge négative 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 remarquons, que la décharge négative s’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

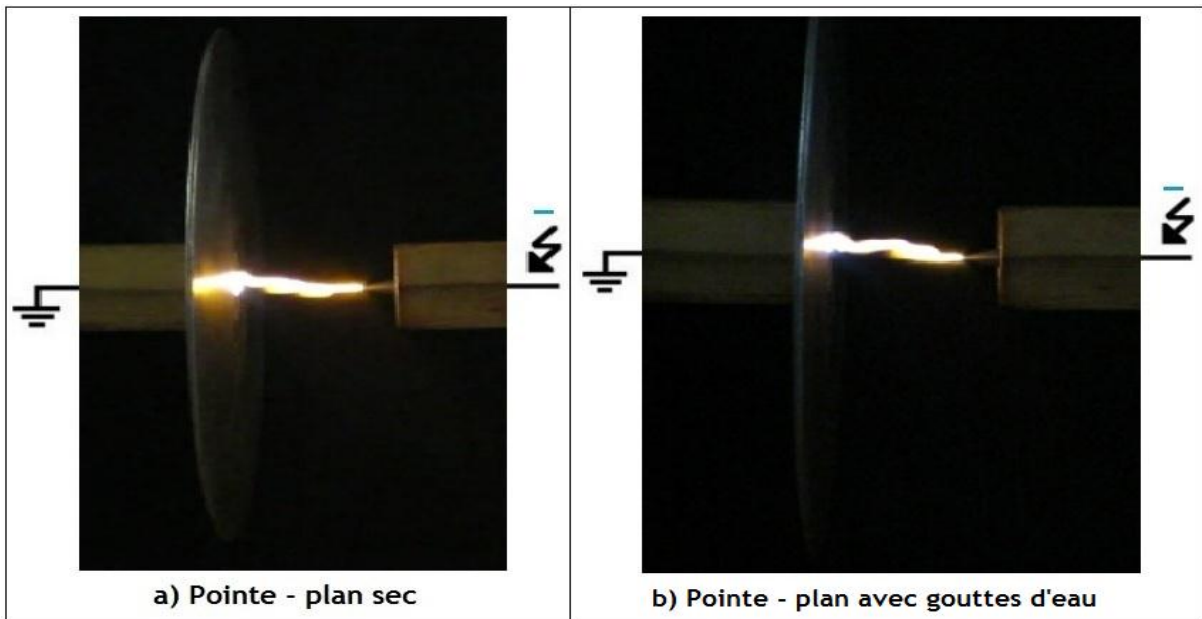
équivalente à des petits cônes générés suite à l'accentuation du champ électrique très intense aux bords des électrodes planes métalliques.

**IV. 3. 2. 4 Absence ou présence de gouttes d'eau sur les deux électrodes du système pointe - plan**

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.27.



**Fig. IV. 27 :** Tension disruptive de l'intervalle d'air du système pointe – plan métalliques avec ou sans gouttes d'eau, sous tension continue négative



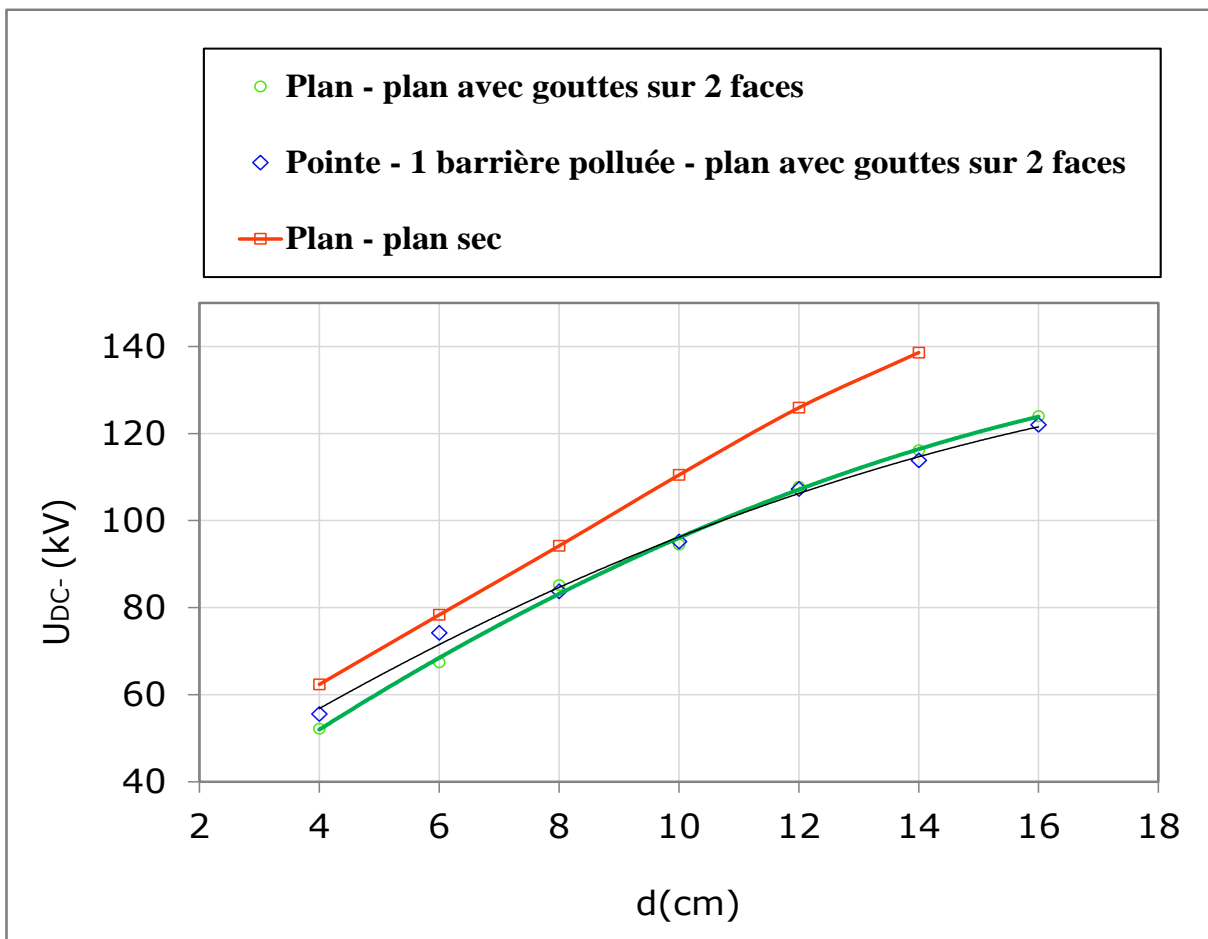
**Fig. IV. 28 :** Chemin de la decharge pour un système pointe – plan sec ou avec goutte d'eau, sous tension continue négative

Il en résulte, pour une taille donnée de cet espace d'air, la tension de disruption du système pointe - plan croît avec l'augmentation de la distance interélectrode sous atmosphère sèche ou humide, et cela peut être expliqué par le fait que les deux électrodes sont métalliques et conducteurs.

D'après la figure IV 28, une seule décharge négative s'évoluant dans l'air de la pointe au plan sans gouttes d'eau. Concernant la configuration pointe - plan avec gouttes d'eau la décharge négative s'évolue toujours de la même manière.

**IV. 3. 2. 5 Equivalence de la performance électrique entre plan – plan métalliques et pointe – barrière polluée - plan sous tension continue négative**

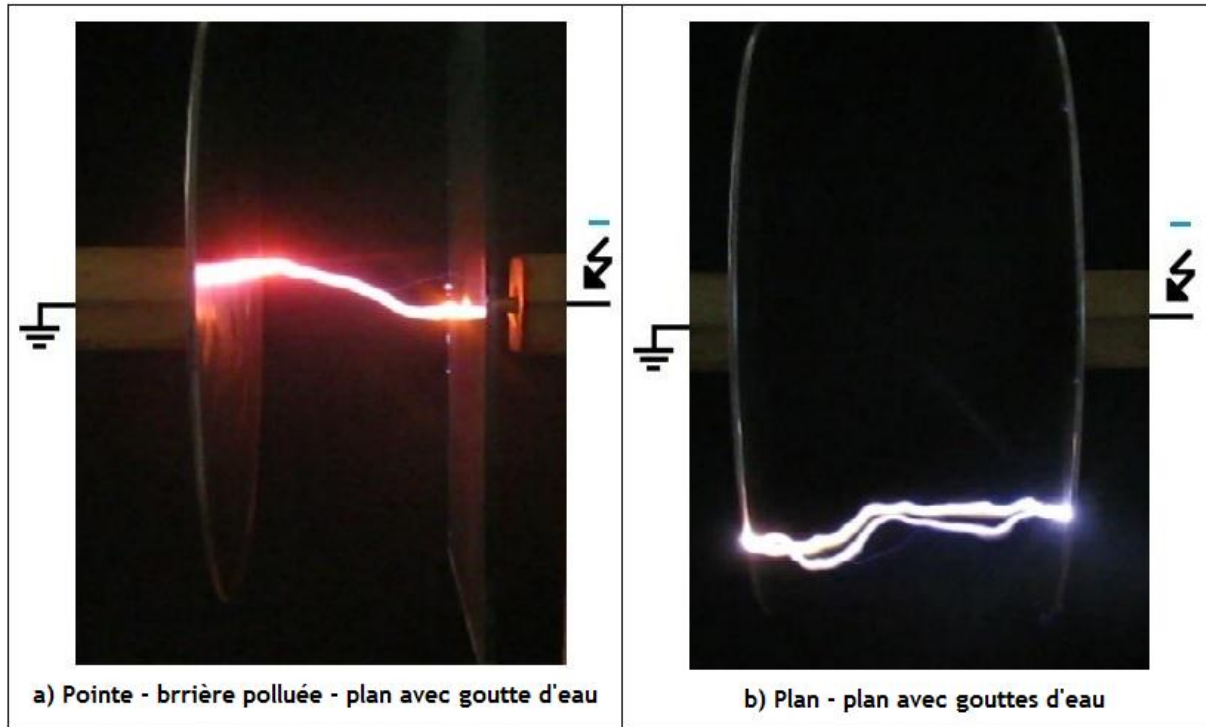
L'allure de la tension disruptive de l'espace d'air du système plan – plan avec gouttes d'eau et celui du système pointe - plan protégé par une barrière polluée mise en contact avec la pointe sous tension, est illustré par la figure IV. 29.



**Fig. IV. 29** : Comparaison de la performance électrique entre un système pointe – barrière polluée – plan avec gouttes d'eau et plan – plan métalliques avec gouttes, sous tension continue négative ( $\sigma_v = 25$  mS/cm)



Il en résulte que les courbes de tension d'amorçage de ces deux systèmes sont pratiquement superposables dans l'espace d'air suscité. D'où l'équivalence de performance électrique entre ces deux configurations dans l'intervalle d'air susmentionné, sous conditions de pollution très sévères.



**Fig. IV. 30 :** Chemin de la décharge électrique en fonction de la position relative de la barrière, sous tension continue négative

Il en résulte de la figure IV. 30 que la décharge électrique dans le cas d'une barrière polluée, mise en contact avec la pointe sous tension que la disruption d'un tel espace d'air est régie pratiquement par une seule décharge négative reliant les bords de la barrière fortement polluée et le plan comme si celles-ci sont équivalentes à des électrodes métalliques. Pour le système plan - plan avec gouttes d'eau, la décharge négative s'évolue du bord au bord des électrodes planes.

#### IV. 4 Conclusion

L'étude de la disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme pointe – plan protégé par une barrière fortement polluée et soumis à une tension continue positive et négative a mené aux résultats essentiels suivants :

- La position optimale de la barrière polluée dans le système pointe - plan pour laquelle sa performance électrique est maximale lorsque  $a/d = 0\%$  pour  $d = 5\text{ cm}$  et  $d = 10\text{ cm}$ , sous tension



continue positive, contrairement à la polarité négative où sa performance électrique est maximale lorsque  $a/d = 90\%$  et  $a/d = 95\%$  pour  $d = 5\text{ cm}$  et  $10\text{ cm}$ .

- La position optimale de la barrière polluée dans le système plan – pointe pour laquelle sa performance électrique est maximale lorsque  $a/d = 0\%$  pour  $d = 5\text{ cm}$  et  $d = 10\text{ cm}$ , sous tension continue positive, contrairement à la polarité négative où sa performance électrique est maximale lorsque  $a/d = 90\%$  pour  $d = 5\text{ cm}$  et  $a/d = 95\%$  pour  $d = 10\text{ cm}$ .

- La performance électrique du système pointe - plan est la même pour un plan recouvert de gouttes d'eau ou sans celles-ci pour les deux polarités positive et négative.

- 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 celle-ci pour les deux polarités positive et négative.

- Existence d'une équivalence de la performance électrique des systèmes pointe – barrière polluée – plan métallique avec gouttes et plan – plan métalliques avec gouttes, sous tension continue positive et négative, pour une distance interélectrode variant entre 4 à 16 cm a été mise en évidence.

# Conclusion générale

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

L'objectif principal de notre étude expérimentale est la recherche de l'équivalence électrique entre un système pointe – plan protégé par une barrière en verre sous tension continue et condition de pollution très sévère.

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

- La position optimale de la barrière fortement polluée dans le système pointe sous tension – plan mis à la terre a été établie lorsqu'elle se rapproche de la pointe ou en contact avec celle-ci pour la polarité positive pour  $d = 5$  cm et  $d = 10$  cm, contrairement à la polarité négative qui est maximale lorsqu'elle se rapproche de l'électrode mise à la terre pour les mêmes distances.
- La position optimale de la barrière fortement polluée dans le système plan sous tension – pointe mise à la terre a été déterminée lorsqu'elle se rapproche du plan ou en contact avec celui-ci pour la polarité positive, contrairement à la polarité négative qui est maximale lorsqu'elle se rapproche de l'électrode mise à la terre pour les mêmes distances.
- La performance électrique du système pointe - plan est la même pour un plan recouvert de gouttes d'eau ou sans celles-ci.
- La tension de rupture de l'intervalle d'air plan – plan métallique avec gouttes est largement inférieure à la tension disruptive de celui-ci sans gouttes.
- L'équivalence de la performance électrique entre un système pointe – plan protégé par une barrière polluée 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 pour les deux polarités positive et négative pour une distance interélectrode allant de  $4$  à  $16$  cm.

## Bibliographie

---

- [1] T. Belhoul, N. Bouatia, R. Boudissa, K. D. Haim and S. Kornhuber, "Performance of Air Gaps in Non-Uniform Fields Under Pollution and AC Voltage", Papier proposé à IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Décembre 2016.
- [2] T. Belhoul, "Performance d'un Intervalle d'Air avec Barrière Isolante Recouvrant l'Electrode Haute Tension sous Pollution très Forte et Tension Alternative", Thèse de doctorat (en voie d'achèvement), U. A. M. Bejaia, 2017.
- [3] P. N. Mavroidis, P. N. Mikropoulos and C. A. Stassinopoulos, "Impulse Behavior of Dielectric-covered Rod-plane Air Gaps", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 2, 2012, pp. 632 – 640.
- [4] B. Azedine, "Mesure du champ électrique en géométrie - plan par une sonde polarisée", Mémoire d'ingénieur, UAMB, juin 2001.
- [5] H. Hallil, "Effet de la pollution sur la disruption d'un système pointe - barrière isolante - plan", Mémoire de DEUA, U. A. M. Bejaia, 2010.
- [6] 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> Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l'Electrotechnique (CIMGLE'12), ENSET Oran, Algérie, 2012.
- [7] 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.
- [8] F. Amir et KH. Namaoui, "Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative". Mémoire d'ingénieur, UAM, Juin 2004.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

## Bibliographie

---

- [12] 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.
- [13] [http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro\\_isolateur.html](http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro_isolateur.html).
- [14] P. S. Ghosh, N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage". IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, N°. 1, pp. 128-136, February 1995.
- [15] 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.
- [16] R. Baersch, "Elektrisches Verhalten von polymeren Isolierstoffen unter Freiluft- und erschwerten klimatischen Innenraumbedingungen". RCC-Fachtagung Tagungsband S. 29-47, Deutschland, 2006.
- [17] 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.
- [18] Georges Le Roy, Cloude Gary, Bernard Hutzier, Jacques Lalot, Christien Dubanton, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions". P 298. Paris, Eyrolles, Juillet 1984.
- [19] 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.
- [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] 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.
- [23] "méthode d'essai recommandées pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériau isolant 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.

## Bibliographie

---

- [26] W. Mosch, E. Lemke, M. Eberhardt, "Einführung in die Hochspannungstechnik: Luftisolation". VEB Kongress- und Werbedruck, Oberlungwitz, mars 1984, Dresden, RFA.
- [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] 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.
- [30] R. Boudissa, "performance des écrans sous tension alternative et continue", CNHT 2009, Sidi Bel Abbés, 2009, Algérie
- [31] D. Djemai, "Etude de la propagation des streamers à l'interface liquide/solide sous tension alternative 50 Hz". Mémoire de Magister, 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.