

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



# ***MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE***

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique

**Option**

*Électrotechnique Industrielle*

**Thème**

***Fabrication et application des matériaux  
intelligents pour l'amélioration des  
caractéristiques des isolations  
électriques en HT***

**Présenté par :**

**M<sup>r</sup>. ALI Younes**

**M<sup>r</sup>. BAKIRI Islam**

**Encadré par :**

**M<sup>me</sup>. BELHOUL Talit**

*Année universitaire 2022-2023*

# REMERCIEMENTS

*Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années.*

*Nous tenons à remercier sincèrement et particulièrement Mme BELHOUL Talit en tant que promotrice, qui a été toujours à notre écoute et notre disposition tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude, ainsi que pour ses conseils et sa bonne humeur et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*Nous remercions également tous les membres du jury pour avoir bien voulu évaluer et examiner notre travail.*

*Enfin, tous nos respects sont adressés à nos chers parents qui nous ont encouragés et soutenu beaucoup durant nos études.*

# ***DÉDICACE***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes Chers **Parents** qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui  
m'ont*

*fourni Les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui.*

*Ma chère **Sœur**.*

*Mon chère **Frère** et à toute la **famille**.*

*Mes Chers **Amis** et tous les **étudiants** de groupe **EI**  
et l'ensemble des **enseignants** de département de génie électrique  
et les **électriciens** du monde entier .*

*Je leurs souhaite Une vie pleine de succès.*

*Que dieu les garde tous.*

*A tous les êtres chers à mon cœur*

*ALI Younes*

# ***DÉDICACE***

*Je dédié ce travail :*

*A ma très chère **mère** et mon cher **père** de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études leurs sacrifices illimités, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation et pour me voir atteindre cette étape de ma vie.*

*A ma chère **tante**.*

*A mes chères **sœurs**.*

*A mes chers **frères**.*

*A mes chers **neveux**.*

*A tous mes chers **amis** et tous les **étudiants** de groupe EI.*

# *Table de matières*

# Table de matière

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## Chapitre I

### Matériaux isolants en HT

I. 1 Introduction .....	3
I. 2 Décharge électrique.....	3
I. 2. 1 Notion sur l'électrostatique .....	3
I. 2. 2 Définition de la décharge électrique.....	5
I.2. 3 Décharge disruptive ou claquage.....	6
I.3 Isolation électrique .....	6
I.3.1 Isolants.....	7
I.3.2 Différents types d'isolants.....	8
I.3.3 Nature de l'isolation .....	9
I.3.4 Propriétés diélectriques des isolants .....	9
I.4 Matériaux superhydrophobes .....	11
I.4.1 Mouillabilité .....	12
I.4.2 Angle de contact.....	12
I.4.2.1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact.....	12
I.4.3 Surface Superhydrophobe .....	14
I.4.4 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles.....	14
I.4.4.1 Surfaces superhydrophobes naturelles.....	14
I.4.4.1.1 Insectes .....	14
I.4.4.1.2 Animaux.....	15
I.4.4.1.3 Végétaux .....	16
I.4.4.2 Matériaux superhydrophobes artificiels.....	17
I.4.4.2.1 Nano tours d'oxyde de zinc sur silicium.....	17
I.4.4.2.2 Film d'argent sur du cuivre.....	17
I.5 Conclusion .....	17

## **Chapitre II**

### **Revue des études portant sur la performance des barrières**

II. 1 Introduction.....	20
II. 2 les avancées significatives dans les technologies de barrières diélectriques.....	20
II. 3 Investigations antérieures de recherches sur la performance des barrières.....	21
L. Ming, 1993.....	21
F. Mauseth, 2004.....	23
D. van der Born, 2013.....	24
T. Mizuno, 2003.....	27
P. N. Mavroidis, 2012 .....	29
E.Foruzan,2015 .....	32
N. Bouatia, 2019.....	33
T. Belhoul, 2020.....	34
A.Mekhaldi,2021.....	35
II-4 Conclusion.....	36

## **Chapitre III**

### **Partie pratique et simulation**

III.1 Introduction.....	37
III.2 Modèles expérimentaux et techniques de mesure.....	37
III.2.1 Modèles expérimentaux.....	37
III.2.2 Fabrication d'un revêtement super hydrophobe.....	39
III.2.3 Confection et caractérisation d'une isolation multicouches superhydrophobes.....	40
III.2.4 Pollution d'une surface isolante.....	40
III.2.5 Circuit de mesure.....	41
III.2.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques.....	42
III.3 Résultats, simulation et discussion.....	43
III.3.1 Résolution par la méthode d'éléments finis.....	43

III.3.2 Présentation et propriété du model géométrique utilisé .....	44
III.4 Simulation et discussion de la configuration pointe-pointe avec une barrière de 10cm.....	45
III.4.1 Configuration pointe-pointe sans barrière .....	45
III.4.2 Configuration pointe-pointe avec une barrière tubulaire propre (lt = 10 cm) .....	47
III.4.3 Configuration pointe-pointe avec deux barrières tubulaires propre (lt = 10cm) .....	48
III.4.4 Configuration pointe-pointe avec une barrière tubulaire polluée (lt=10cm).....	49
III. 4. 5 Configuration pointe-pointe avec deux barrières tubulaires polluées (lt=10cm) .....	50
III.4.6 Configuration pointe-pointe avec une barrière tubulaire superhydrophobe (lt = 10 cm) .....	51
III.4.7 Configuration pointe-pointe avec deux barrières tubulaires superhydrophbes (lt = 10 cm) .....	52
III.6 Résultats graphiques des essais .....	54
III.6.1 Une seule barrière tubulaire propre et polluée.....	54
III.6.1. 1 Longueur de tube (lb = 5 cm) .....	54
III. 6. 1. 2 Longueur de tube (lb = 10 cm) .....	55
III. 6. 2 Deux barrières tubulaires propres et polluées.....	56
III. 6. 2. 1 Longueur de tube (lb = 5 cm) .....	56
III. 6. 2. 2 Longueur de tube (lb = 10 cm) .....	57
III. 6. 3 Une ou deux barrières tubulaires superhydrophobes .....	58
III. 6. 3. 1 Longueur de tube (lb = 5 cm) .....	58
III. 6. 3. 2 Longueur de tube (lb = 10 cm) .....	60
III.7 Conclusion .....	61
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>62</b>

*Listes des figures et des  
tableaux*

## LISTES DES FIGURES

<b>Fig. I. 1</b> : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension	10
<b>Fig. I. 2</b> : Comportement d'une goutte sur une surface	13
<b>Fig. I. 3</b> : Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface	13
<b>Fig. I. 4</b> : Angle de glissement	13
<b>Fig. I.5</b> : Gerris sur l'eau	14
<b>Fig. I. 6</b> : Cigale (a: aile de la cigale, b: images MEB de la nanostructure <i>de l'aile</i> )	15
<b>Fig. I. 7</b> : Gecko (a: Photo du gecko, b: patte du gecko, c: Nanostructure de sa peau)	15
<b>Fig. I. 8</b> : Ecaille d'un requin	16
<b>Fig. I. 9</b> : goutte d'eau sur une feuille de lotus	16
<b>Fig. I. 10</b> : Goutte d'eau sur une feuille salvinia molesta	17
<b>Fig. I. 11</b> : Film de Zno sur du silicium	17
<b>Fig. I. 12</b> : Film d'argent sur du cuivre	18
<b>Fig. II. 1</b> : Effet de la forme de la barrière (d= 50mm)	21
<b>Fig. II. 2</b> : Influence des prédécharges	22
<b>Fig. II.3</b> : Configuration de l'électrode	22
<b>Fig. II.4</b> : Configuration de l'électrode (le revêtement conducteur est pour le cas iii seulement)	23
<b>Fig. II.5</b> : Schéma de configuration pointe - plan	24
<b>Fig. II.6</b> : Configuration de l'électrode	27
<b>Fig. II.7</b> : PDV et BDV en fonction la longueur de la couche isolante dans l'espace d'air (D = 45mm, d = 100 mm, P = 0.1 MPa)	28
<b>Fig. II.8</b> : Photos de la décharge partielle pour L = 300mm	28
<b>Fig. II.9</b> : Tension impulsionnelle positive en fonction de la distance interélectrode	29
<b>Fig. II. 10</b> : Schéma du système, les valeurs numériques sont données en mm La distance interélectrode est notée par L	29
<b>Fig. II. 11</b> : 50% de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode	30
<b>Fig. II. 12</b> : Schéma du système d'électrodes	30
<b>Fig. II. 13</b> : Photographies de la décharge, longueur d'espace inter - électrodes est de 0.125 m, PTFE, (a)160 kV pour LI, (b) 173 kV pour SI. Lu : longueur extérieure du développement de la décharge	31
<b>Fig. II.14</b> : Trajectoires de la décharge dans l'intervalle d'air pointe - plan. (a) contournement avec tension de choc de foudre, (b), (c) et (d) contournements avec tension de choc de manœuvre	32
<b>Fig. II.15</b> : Distribution du champ électrique de préclaquage d'une configuration d'électrode en forme de U recouverte d'une barrière en PVC	33
<b>Fig. II.16</b> : Distribution du champ électrique durant le claquage dans le cas d'insertion d'une barrière plate en PTFE entre les deux électrodes	33
<b>Fig. II.17</b> : Schéma de la configuration pointe-plan	35
<b>Fig. III. 1</b> : Support de système d'électrode	37
<b>Fig. III. 2</b> : Électrodes haute tension et terre	38
<b>Fig. III. 3. a</b> : barrière tubulaire en verre	39
<b>Fig III. 3. b</b> : Tube superhydrophobe lb=10 cm	39
<b>Fig. III. 4</b> : Étapes de confection d'une isolation à multicouches superhydrophobes	40
<b>Fig. III. 5</b> : Schéma de mesure et de visualisation	41
<b>Fig III. 6</b> : Modèle expérimental	45

<b>Fig. III. 7 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe sans barrière (d = 05 cm)	46
<b>Fig. III.8 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe sans barrière (d = 10 cm)	47
<b>Fig. III. 9 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe avec une seule barrière propre (d = 10 cm)	48
<b>Fig. III. 10 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe-pointe avec deux barrières (d = 10 cm)	49
<b>Fig. III. 11 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe avec une seule barrière polluée (d = 10 cm)	50
<b>Fig. III. 12 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe avec deux barrières polluées (d = 10 cm)	51
<b>Fig. III. 13 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe avec une seule barrière superhydrophobe (d = 10 cm)	52
<b>Fig. III. 14 :</b> Représentation de potentiel électrique, champ électrique et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe avec deux barrières superhydrophobes (d = 10 cm) »	53
<b>Fig. III.15 :</b> Système pointe - pointe avec une barrière propre (lb=5cm)	54
<b>Fig. III. 16 :</b> $\hat{U}_{ac} = f(d)$ d'un système pointe - pointe avec barrière sous atmosphère Polluée et propre	54
<b>Fig. III. 17:</b> Système pointe - pointe avec une barrière pollué	55
<b>Fig. III. 18 :</b> $\hat{U}_{ac} = f(d)$ d'un système pointe - pointe avec barrières sous atmosphère Polluée et propre	55
<b>Fig. III. 19:</b> Système pointe - pointe avec deux barrières (lb=5 cm)	56
<b>Fig. III. 20 :</b> $\hat{U}_{ACmax} = f(lb)$ d'un système pointe - pointe avec deux barrières sous atmosphère polluée et propre	56
<b>Fig. III. 21 :</b> Système pointe - pointe avec deux barrière (lb=10cm)	57
<b>Fig. III. 22 :</b> $\hat{U}_{ac} = f(d)$ d'un système pointe - pointe avec deux barrières sous atmosphère Polluée et propre	57
<b>Fig. III. 23 :</b> Système pointe - pointe avec une barrière superhydrophobe (lb=5cm)	58
<b>Fig. III. 24 :</b> Système pointe - pointe avec deux barrières superhydrophobes (lb=5cm)	58
<b>Fig. III. 25:</b> $\hat{U}_{ac} = f(d)$ d'un système pointe - pointe avec une ou deux barrières superhydrophobes (lb=5cm).	59
<b>Fig. III. 26 :</b> Système pointe - pointe avec une barrière superhydrophobe (lb=10cm)	60
<b>Fig. III. 27 :</b> Système pointe - pointe avec deux barrières superhydrophobes (lb=10cm)	60
<b>Fig. III. 28 :</b> $\hat{U}_{ac} = f(d)$ d'un système pointe - pointe avec une ou deux barrières superhydrophobes (lb=10 cm).	60

---

***LISTES DES TABLEAUX***

<b>Tab. II. 1 :</b> Type et épaisseur du matériau de la couche isolante	25
<b>Tab. II. 2 :</b> Tension de claquage et efficacité du système avec l'utilisation du silicone	26
<b>Tab. III. 1 :</b> Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le logiciel COMSOL	45

## *Liste des symboles et des notations*

$\epsilon_r$  : Permittivité relative.

$\delta$  : Angle de perte en degré ( $^\circ$ ) .

$\theta$  : Angle de contact en degré ( $^\circ$ ).

$\sigma$  : Conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

E : Champ électrique.

F : Force électrique.

q : Charge électrique positive.

Q : Charge ponctuelle.

r : Distance entre les deux charges q et Q.

K : Constante électrostatique qui est égale à  $9 \cdot 10^9$ .

P : Pression en kPa.

J : la densité de courant de conduction.

D : la densité de courant de déplacement.

RSD : l'écart type relatif du résultat du test.

AC : Tension alternative.

DC : Tension continue.

HT : Haute tension.

PDV : Tension d'amorçage des décharges partielles.

BDV : Tension de claquage impulsionnelle.

# *Introduction générale*

### *Introduction générale :*

L'isolation électrique joue un rôle crucial dans la fiabilité et la sécurité des systèmes de haute tension. Une défaillance de l'isolation peut entraîner des décharges électriques indésirables, qui peuvent endommager les équipements et compromettre la continuité du service. Par conséquent, la compréhension des phénomènes de décharge électrique et des mécanismes d'isolation devient essentielle pour concevoir des systèmes électriques robustes et efficaces [1].

Le rôle de ces isolations est d'assurer un isolement électrique entre les parties HT elles-mêmes ou bien entre celles-ci et les parties mises à la terre, ces dernières sont nommées barrières, elles présentent un intérêt scientifique fondamental pour envisager un aspect pratique afin d'améliorer les performances des appareils et des ouvrages à haute et très haute tension [2].

Plusieurs investigations ont été faites dans l'objectif de prouver l'apport technique des barrières isolantes sur les systèmes d'isolation qui ont commencé en 1920. Ces recherches ont été dirigées par plusieurs chercheurs, qui les ont diversifiées par les géométries des barrières utilisées, les matériaux choisis, ainsi que la configuration des électrodes formant les systèmes étudiés étant donné que c'est cette configuration des électrodes qui particularise la nature du champ qui règne dans l'espace interélectrode. Certains d'entre eux ont simulé des cas d'une atmosphère polluée et humidifiée afin d'étudier l'influence de la pollution sur la barrière isolante ainsi que les mesures à entreprendre dans telles conditions pour éviter les problèmes de contournement électriques.

Comme type de matériau de la barrière insérée dans le système pointe-plan ou pointe-pointe, il est utilisé très souvent le polychlorure de vinyle, le papier dur ou la bakélite. Cependant, lorsque ces barrières hydrophiles sont installées dans des sites fermés à l'intérieur desquels règne une très forte pollution, leur surface peut être recouverte par des dépôts polluants qui provoquent la dissolution des sels et la formation de couches électrolytiques conductrices de courant électrique sur les surfaces de ces barrières quasi-uniformément contaminées, cela influe sur sa performance électrique ou elle agit comme un système sans barrières, ce qui rend leur présence inutile ou même défavorable [3, 4]. Donc le remplacement de ces matériaux hydrophiles par d'autres à degré de mouillabilité très faible, s'avère très indispensable. Pour cette raison, certains chercheurs ont orienté leurs investigations vers des matériaux isolants des barrières à caractère superhydrophobe sous conditions de pollution sévères [5, 6]. En effet, la performance électrique de la barrière en silicone superhydrophobe a fait déjà l'objet de quelques investigations sous tension alternative et continue [5, 6], tandis qu'elle est le sujet de notre étude aussi. La superhydrophobicité de la surface en particulier, est l'un des facteurs importants qui contribue à la performance supérieure des polymères de silicone pour résister au mouillage en raison de leur faible énergie libre de surface,

malgré qu'elle offre un meilleur pouvoir d'isolement vis-à-vis de son homologue hydrophile, son emploi en tant que barrière de protection des intervalles d'air à champ électrique non uniforme n'a pas encore vu le jour [7].

La présente étude est focalisée sur la simulation de distribution de champ électrique et le développement de la décharge électrique dans le chemin de disruption d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière tubulaire isolante en verre et barrière tubulaire insolente superhydrophobe à géométrie variable sous atmosphère quelconque.

Dans le premier chapitre, nous aborderons les concepts de décharge électrique, d'isolation électrique ainsi que ses différents types, et nous examinerons également les différents matériaux superhydrophobes.

Le deuxième chapitre est dédié à la synthèse des travaux de recherche antérieure sur la performance électrique des barrières isolantes de protection.

Le troisième et le dernier chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais menés dans le laboratoire et la simulation sous COMSOL multiphysics version 5.4.

Enfin, nous concluons notre mémoire par un bref rappel des principaux résultats obtenus et nous évoquons d'éventuelles perspectives pouvant être envisagées dans le sillage du présent travail.

# **Chapitre I**

## ***Matériaux isolants en HT***

## I.1 Introduction

Les phénomènes de décharge électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [1][2]. Les premières études décrivant leur évolution et proposant des mécanismes de décharges datent du début du XX<sup>ème</sup> siècle [3]. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent. Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens de diagnostic des premiers instants de la décharge et donc dans l'étude des mécanismes d'initiation. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène et d'avancer dans les applications qui ont d'ailleurs connu de bien plus larges expansions [4].

L'isolation électrique et les matériaux superhydrophobes sont deux domaines de recherche et d'application essentiels. L'isolation électrique garantit la sécurité et la performance des appareils électriques, tandis que les matériaux superhydrophobes offrent des propriétés uniques d'isolation et de résistance à l'eau et d'auto-nettoyage. Ces deux domaines jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs de l'industrie et de la technologie, ouvrant la voie à des avancées innovantes [5].

## I.2. Décharge électrique

### I.2.1 Notion sur l'électrostatique

#### A. Charge électrostatique :

La charge électrostatique est une quantité d'électricité statique  $Q$ . La notion de charge étant liée à celle de l'électron et nous pouvons quantifier cette charge électrostatique [6]

$$Q = n \cdot e^- \quad (\text{I. 1})$$

$n$  : Nombre d'électrons dans une charge ;

$e^-$  : Charge électrique élémentaire  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

Le résultat de ces charges électrostatiques a pour effet de démontrer la présence de force électrostatique  $F$ .

## B. Champ électrique

La notion de champ a été introduite par les physiciens pour tenter d'expliquer comment deux objets peuvent interagir à distance, sans que rien ne les relie. À la fois la loi de la gravitation universelle de Newton et la loi de Coulomb en électrostatique, impliquent une telle interaction à distance. Il n'y a pas de fil qui relie la terre au soleil, celui-ci exerce son attraction à distance. De même, deux charges électriques s'attirent ou se repoussent dans le vide sans que rien ne les relie, sans aucun support matériel [7].

Au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, le physicien et chimiste anglais Michael Faraday a introduit la notion de champ électrique afin d'expliquer le comportement à distance de la force électrique, selon Faraday, une charge électrique pouvait subir une force électrique uniquement si celle-ci était située à un endroit où régnait un champ électrique. Puisque c'est l'interaction de deux charges électriques qui produit la force électrique, Faraday affirma que le champ électrique mesuré en un point de l'espace était généré par l'ensemble des charges avoisinantes. Ainsi, la source du champ électrique est la charge électrique elle-même [8].

Pour définir le champ électrique en un point de l'espace, une petite charge d'essai positive  $q$  est placée et la force de Coulomb  $F$  qui s'exerce sur elle est regardée, due à la présence des charges électriques environnantes qui créent le champ électrique. Le champ électrique en ce point est défini par [5] :

$$E = \frac{F}{q} \quad , q > 0 \quad (I.2)$$

Avec :

$E$  : Champ électrique.

$F$  : Force électrique.

$q$  : Charge électrique positive.

À une distance  $r$  d'une charge ponctuelle  $Q$ , le champ électrique est donné par la loi de Coulomb [7] :

$$F = K \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad \text{Et} \quad E = K \frac{F}{q} = K \frac{Q}{r^2} \quad (I.3)$$

Avec :

Q : Charge ponctuelle.

r : Distance entre les deux charges q et Q.

K : Constante électrostatique qui est égale à  $9 \cdot 10^9$ .

### **I.2.2 Définition de la décharge électrique**

Physiquement, la décharge électrique c'est le déplacement des charges électriques (électrostatique) entre deux ou plusieurs corps séparés par un isolant (gaz, solide, liquide...) sous une différence de potentielle électrique provoquent un courant électrique.

La décharge électrique a fait l'objet de nombreuses études expérimentales et théoriques, non seulement en raison de l'intérêt scientifique du mécanisme des décharges, mais aussi en raison de ses applications importantes dans l'industrie, telles que les précipitateurs électrostatiques, générateurs d'ozone, traitement de surface et d'autres.

La décharge électrostatique est probablement le phénomène le plus important à appréhender, car il est la principale cause des nuisances dues à l'électricité statique. Ce phénomène traduit l'écoulement des charges électriques qui intervient naturellement après une phase d'accumulation, il peut se produire de différentes manières [9] :

- Dans de l'air (humidité).
- L'ionisation de l'air (effet couronne).
- L'arc (ou contact par effluve).
- L'utilisation de matières solides ou liquides conductrices.

La cause des effets des décharges électrostatiques est l'électricité statique. Il y a de nombreux modes d'électrisation possibles [10] :

- par frottement (triboélectricité).
- par contact (transfert direct de charges).
- par ionisation (émissions d'ions sous haute tension).

- par influence (à l'aide d'un champ électrique).
- par clivage (fragmentation).
- par effet photoélectrique.
- par émission thermoélectronique.

La décharge électrostatique est une soudaine décharge d'électricité statique vers la terre. Les composants fragiles, peuvent être endommagés s'ils se trouvent sur le chemin du courant au moment où la décharge se produit. C'est pourquoi vous devez toujours prendre certaines précautions quand vous manipulez des appareils que l'électricité statique peut endommager [9].

### **I.2.3 Décharge disruptive ou claquage**

Le développement de la décharge disruptive à l'intérieur des matériaux isolants solides est lié à un ou une association des phénomènes tels que la décharge intrinsèque, la décharge thermique et la décharge partielle. La décharge intrinsèque est due à la présence d'électrons libres, aptes à se déplacer dans l'isolant. Ce phénomène se manifeste préalablement par une caractéristique du courant à travers l'isolant présentant une saturation très nette à partir d'une certaine valeur de la tension, Les pertes diélectriques dues à la conductivité des diélectriques générant une énergie thermique, inférieure, égale ou supérieure aux possibilités d'évacuation thermique par conduction ou convection thermique du diélectrique si l'énergie produite est supérieure à la dissipation thermique du diélectrique dans les conditions de refroidissement données, la température du diélectrique va augmenter entraînant sa dégradation thermique progressive par décomposition chimique et fusion.

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles gazeuses du fait de la faible rigidité diélectrique des gaz ( $E < 10$ ) et de l'élévation de la permittivité des isolants solides par rapport à celle des gaz, des décharges partielles peuvent prendre naissance au sein de ces défauts pour des tensions de 20 à 60 fois plus faibles que celles qui provoqueraient la perforation du diélectrique solide [18].

### I.3 Isolation électrique

Les matériaux isolants font aujourd'hui de nombreux développements technologiques [11], plusieurs études, menées par les industriels et les laboratoires de recherches, sont focalisées sur la caractérisation de l'efficacité des matériaux isolants [12 – 16]. En électrostatique, la réponse des matériaux à la charge électrique est complexe et reste un sujet de recherche. La caractérisation de ces matériaux est bien loin de pouvoir se résumer à un ou deux paramètres, en l'occurrence, la permittivité et la conductivité. Les phénomènes de surface sont déterminants pour la génération ou l'injection de la charge dans l'isolant. La charge d'espace peut se manifester sous l'effet du champ, du rayonnement ou du frottement [15].

La compréhension des phénomènes liés à la génération de la charge d'espace et à son évolution ainsi qu'au comportement du diélectrique chargé permettra non seulement la prévention des risques électrostatiques, mais aussi l'amélioration des performances des électrets. C'est le cas des filtres à électrets dont nous voulons pousser les limites de charge et atténuer le déclin de celle-ci, pour cela, dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux mécanismes de génération de la charge d'espace et à ses effets, nous aborderons globalement les techniques expérimentales qui caractérisent l'aptitude du diélectrique à stocker ou à évacuer la charge électrique et en particulier les techniques de mesures électrostatiques, utilisées pour caractériser l'état de charge du média et son évolution dans le temps, à savoir la mesure de la charge électrique et du potentiel de surface, nous dresserons un inventaire des mécanismes physiques responsables du déclin de potentiel de surface et les modèles associés [16].

L'objectif de tout ingénieur chargé de concevoir l'isolation d'un équipement en haute tension est d'éviter l'initiation d'une décharge électrique dans son système. Pour cela il faut maîtriser les contraintes d'isolation les plus sévères et la configuration des systèmes possédant la rigidité diélectrique la plus faible [16-17].

#### I.3.1 Isolants

##### A. Isolant

Un isolant est une substance dont la conductivité pratiquement très faible. L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction électrique entre conducteur soumis à des champs électrique. On peut considérer comme isolant, tous les matériaux dont la résistivité est supérieure à  $10^{10} \Omega.cm$  [18].

## B. Isolation

L'isolation est un système composé de matériaux isolants ou d'assemblage de matériaux isolants en liaison avec les parties conductrices associées [19].

## C. Diélectrique

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel l'énergie de la zone interstitielle séparant les bandes conduction et de valence est supérieur à 5eV. Il est considéré aussi comme étant un milieu dans lequel tout volume de la substance possède un moment dipolaire ou susceptible d'en acquérir sous l'action d'un champ électrique [19].

### I.3.2 Différents types d'isolants

#### A. Isolant gazeux

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

- Rigidités diélectrique variable suivant la nature de gaze ;
- Permittivité faible, les gaz sont auto -générateurs ;
- Phénomène d'ionisation des gaz
- Légers et ininflammables

Les principaux isolants gazeux sont connus sous les noms de l'air atmosphérique, l'azote, gaz rares et l'hydrogène [18].

#### B. Isolant liquide

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

- D'améliorer le pouvoir de coupure de certains appareils électrique par l'amélioration des conditions d'extinction de l'arc électrique.
- D'assurer une bonne isolation électrique et un bon refroidissement [18].

#### C. Isolant solide

L'origine des isolants solides est minérale, organique ou résineuse :

Les isolants d'origine minérale sont des substances siliceuse et calcaires, solides à la température ordinaire, incombustibles et supportant des températures élevées, à l'exception des hydrocarbures (verre, produit céramique,).

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

Les isolants d'origine résineux sont généralement des matières organiques naturelles ou synthétiques qui peuvent se présenter à l'état solide, thermoplastique ou plastique (caoutchouc...) [21-22].

### I.3.3 Nature de l'isolation

Il existe plusieurs types de matière isolante, tel que :

- Porcelaine
- Verre
- Verres trempés
- Verres recuits
- Silicone ...

### I.3.4 Propriétés diélectriques des isolants

Les caractéristiques électriques des matériaux isolants sont réparties en deux familles :

- La première comprend la rigidité diélectrique( $E_D$ ), la permittivité( $\epsilon_r$ ) le facteur de pertes diélectrique ( $\text{tg}\delta$ ), la résistivité électrique( $\rho$ ), la décharge disruptive ou claquage ( $\hat{U}_d$ ).
- La deuxième famille regroupe les caractéristiques directement liées à l'emploi de l'isolant (température, fréquence, ...) dans une catégorie de matériel déterminé, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau ou cours de son service [20-23].

#### a. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la

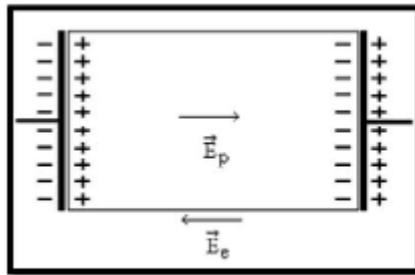
tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

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

- La rigidité diélectrique transversale, pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau
- La rigidité diélectrique longitudinale, obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant [18].

### b. 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  $E_p$  l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique  $E_e$  extérieur appliqué (Fig. I. 1). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$  [23].



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

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

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{I. 4})$$

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

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I. 5})$$

Avec  $\epsilon_0 = \frac{10^{-19}}{36 \cdot \pi}$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$$

### c. 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 courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle  $\Phi < \pi / 2$ . Son complément  $\delta$  est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation ou de pertes [18].

### d. Résistances transversale, superficielle et d'isolement

La résistance transversale ou volumique est déterminée en appliquant un champ Perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal résultant de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau. La résistance superficielle est celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante, C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une couche conductrice à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction. La résistance d'isolement fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux [18].

## I.4 Matériaux superhydrophobes

La fabrication d'une surface super hydrophobe est un processus de modification de la surface d'un matériau pour le rendre extrêmement résistant à l'eau, c'est-à-dire pour repousser l'eau de manière très efficace. Les surfaces super hydrophobes sont caractérisées par une faible énergie de surface, ce qui signifie que l'eau a une tendance naturelle à former des gouttelettes et à rouler sur la surface plutôt que de s'étaler en une fine couche.

Il existe plusieurs techniques pour fabriquer des surfaces super hydrophobes, mais la plupart d'entre elles impliquent la modification chimique ou physique de la surface du matériau. Voici quelques-unes des techniques les plus courantes pour fabriquer des surfaces super hydrophobes :

**a. Revêtements :** Les revêtements super hydrophobes peuvent être appliqués sur la surface du matériau pour créer une couche mince qui repousse l'eau. Les revêtements super hydrophobes

sont généralement fabriqués à partir de matériaux tels que les polymères fluorés ou les nanomatériaux. Ces revêtements peuvent être appliqués par pulvérisation, par immersion ou par d'autres techniques de traitement de surface.

**b. Érosion laser** : C'est une technique de modification physique de la surface d'un matériau pour créer des microstructures en relief à la surface. Ces microstructures créent une texture rugueuse qui repousse l'eau et crée une surface super hydrophobe. Cette technique est souvent utilisée pour créer des surfaces super hydrophobes sur des métaux et des polymères.

**c. Auto-assemblage** : C'est une technique de modification chimique de la surface d'un matériau qui utilise des molécules auto-assemblantes pour créer des structures en relief à la surface. Cette technique permet de créer des surfaces super hydrophobes avec une grande précision et une grande uniformité.

**d. Gravure chimique** : C'est une technique de modification chimique de la surface d'un matériau qui utilise des réactions chimiques pour créer des microstructures en relief à la surface. Cette technique peut être utilisée pour créer des surfaces super hydrophobes sur des métaux et des polymères.

Les surfaces super hydrophobes trouvent de nombreuses applications dans des domaines tels que l'optique, l'aéronautique, la construction et les sciences de la vie. Par exemple, les surfaces super hydrophobes peuvent être utilisées pour réduire la traînée et la corrosion sur les avions, pour protéger les matériaux de construction contre l'eau et les intempéries, pour créer des surfaces antiadhésives dans les applications médicales et alimentaires, et pour améliorer les performances optiques des lentilles et des écrans.

#### **I.4.1 Mouillabilité**

La mouillabilité d'une surface solide est déterminée par la capacité d'une goutte de liquide à s'étaler sur celle-ci, laquelle dépend de l'angle de contact formé par la goutte d'eau lorsqu'elle est déposée sur cette surface [31].

#### **I.4.2 Angle de contact**

L'angle de contact  $\Theta$  est défini comme l'angle formé par une goutte d'eau en contact avec une surface, et peut varier de 0 à 180° en fonction de la nature de cette surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) [31].

### I.4.2.1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact

- Si l'angle de contact est presque égal à  $0^\circ$ , alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite superhydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Fig. I. 2a) [31].
- Si l'angle de contact est inférieur à  $90^\circ$ , alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite hydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Fig. I. 2b) [31].
- Si l'angle de contact est compris entre  $90^\circ$  et  $150^\circ$ , alors la surface est hydrophobe et la goutte d'eau sera bombée (Fig. I. 2c) [30].
  - Si l'angle de contact est compris entre  $150^\circ$  et  $180^\circ$ , on dit que la surface est superhydrophobe et la goutte d'eau sera presque sphérique (Fig. I. 2d) [31].

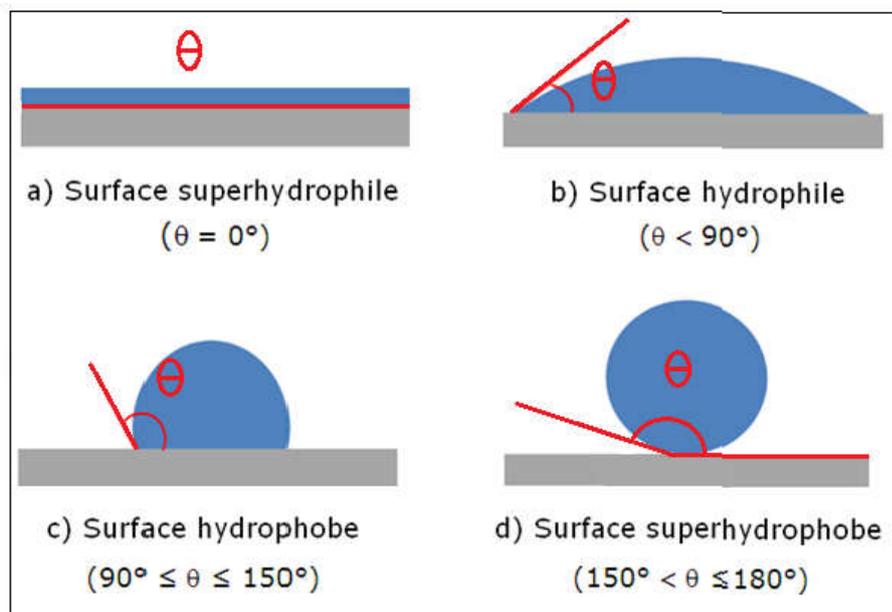


Fig. I. 2 : Comportement d'une goutte sur une surface [32]

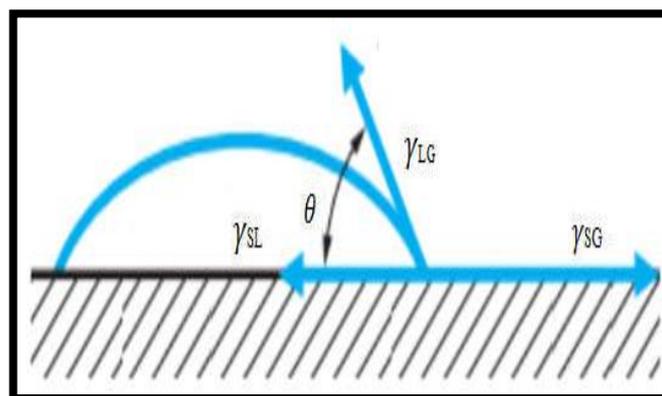
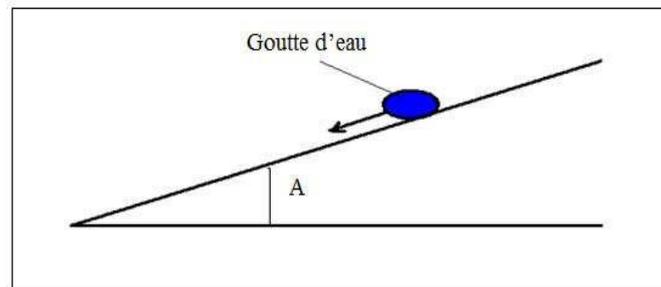


Fig. I. 3 : Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface [33]

La figure (I. 3) représente l'angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface, qui peut être différencié grâce à l'angle de glissement (A), illustré par la figure (I. 4). C'est l'angle limite (cas de superhydrophobie), avant que la goutte ne se mette en mouvement.



**Fig. I. 4** : Angle de glissement [33]

### I.4.3 Surface Superhydrophobe

Une surface superhydrophobe est une surface qui présente une très forte résistance à l'humidité, ce qui signifie qu'elle repousse complètement l'eau. Les surfaces superhydrophobes sont caractérisées par leur angle de contact très élevé avec l'eau (supérieur à  $150^\circ$ ) et leur faible énergie de surface.

Ces propriétés sont souvent obtenues par des traitements de surface spécifiques, qui créent une texture microscopique ou nanoscopique qui piège l'air et empêche l'eau de mouiller la surface [24].

### I.4.4 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles

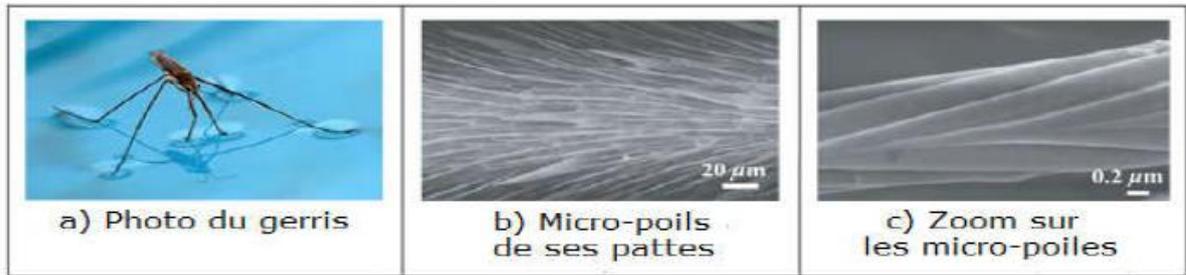
#### I.4.4.1 Surfaces superhydrophobes naturelles

La nature est une source de nombreuses espèces superhydrophobes : insectes, animaux et végétaux. Parmi ces espèces, on citera : Le gerris, le canard, le lotus, La salvinia molesta.

##### I.4.4.1.1 Insectes

###### a. Gerris

Le gerris se déplace librement sur l'eau grâce aux micros poiles hydrophobes sur ses pattes qui accentuent les effets de la tension superficielle (c'est le résultat de l'augmentation de l'énergie à l'interface entre deux fluides) entre ces dernières et la surface de l'eau ; ce qui crée une pellicule suffisante pour supporter le poids de l'insecte sur la surface de l'eau. Les pattes du gerris semblent réaliser le plus grand angle de contact avec de l'eau connu pour les systèmes naturels :  $167.6 \pm 4.4$  (Fig. I. 5) [25].



**Fig. I. 5 :** Gerris sur l'eau

### b. Ailes de cigales

Les ailes de cigales ont la capacité d'être anti-reflets en raison de leur structure nanométrique. En outre, leur texture est enduite d'une cire qui les rend extrêmement hydrophobes, lorsqu'une goutte d'eau est placée sur leur surface, l'angle de contact est très proche de  $160^\circ$  [25].

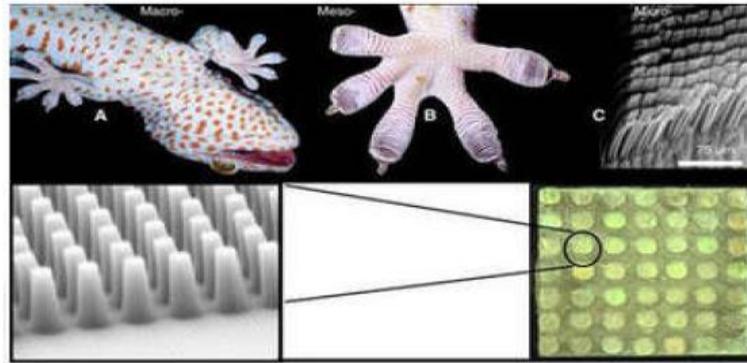


**Fig. I. 6 :** Cigale (a : aile de la cigale, b : images MEB de la nanostructure de l'aile)

### I.4.4.1.2 Animaux

#### a. Gecko

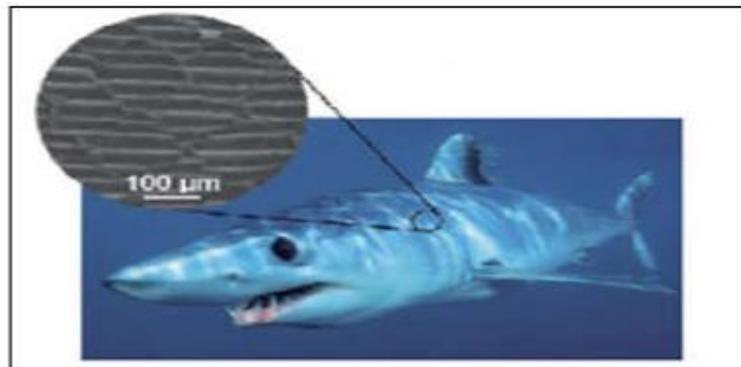
Le gecko est l'un des rares espèces de reptile vivant dans le désert possédant une peau superhydrophobe. Celle-ci est constituée de petites bosses recouvertes de poile microscopiques bien alignés, appelés soies, sur leurs pieds (Fig. I. 7). Leur longueur s'étend de 20 à 70 µm et leur diamètre de 3 à 7 µm. Ces poiles rejettent l'eau et donc le gecko s'auto-nettoie [25].



**Fig. I. 7** : Gecko (A : Photo du gecko, B : patte du gecko, C : Nanostructure de sa peau) [26].

### b. Poissons

En immersion, la propriété de superhydrophobie laisse place à celle de superoléophobie, qui s'applique aux solides et aux liquides (eau ou huile). Cette caractéristique offre une protection aux poissons et aux requins contre la pollution marine (Fig. I.8) [27].



**Fig. I. 8** : Ecaille d'un requin

#### I.4.4.1.3 Végétaux

A l'état naturel, la flore dotée de l'hydrophobie regroupe plusieurs espèces de plantes, incluant notamment les feuilles de lotus, *Salvinia molesta* et Notre Dame.

##### a. Lotus

La feuille de lotus possède une surface superhydrophobe avec un angle de contact égal ou supérieur à  $150^\circ$ . À l'échelle microscopique, cette surface est constituée de petites collines micrométriques qui, à leur tour, sont recouvertes de petits cristaux de cire nanoscopiques (Fig. I. 9). Lorsqu'une goutte d'eau tombe sur la feuille de lotus, elle se pose en réalité sur les cristaux de cire, qui sont eux-mêmes superhydrophobes et autonettoyants. Ainsi, la goutte d'eau peut rouler jusqu'au centre de la feuille, emportant avec elle toutes les saletés [28].



**Fig. I.9** : goutte d'eau sur une feuille de lotus

### **B) *Salvinia molesta***

La *Salvinia molesta*, une fougère aquatique, est connue pour sa superhydrophobie. Sa surface n'est pas lisse, mais plutôt recouverte de petits fouets hydrophiles qui, lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau, emprisonnent les molécules d'eau, créant ainsi une barrière d'air entre ces molécules et la surface de la fougère, ce qui maintient cette dernière sèche (Fig. I. 10) [29].



**Fig. I. 10** : Goutte d'eau sur une feuille *salvinia molesta*

### **I.4.4.2 Matériaux superhydrophobes artificiels**

#### **I.4.4.2.1 Nano tours d'oxyde de zinc sur silicium**

Les chercheurs ont réussi à produire des nano-tours d'oxyde de zinc sur du silicium (voir Fig. I.11) en utilisant une méthode de dépôt en bain chimique composé de  $Zn(NC>3)_2$  et  $NH_4OH$ , chauffé à 70 °C dans un four pour favoriser la croissance des tours. Les rugosités sont ensuite traitées avec de l'acide stéarique, qui les recouvre complètement et réduit l'énergie de surface. Cette méthode a permis de rendre la surface superhydrophobe, avec un angle de contact de  $173 \pm 1^\circ$  grâce à la présence d'une structure binaire qui réduit la surface de contact et favorise l'emprisonnement d'air dans la nanostructure [30].



**Fig. I. 11** : Film de ZnO sur du silicium

#### I.4.4.2.2 Film d'argent sur du cuivre

Les scientifiques ont réussi aussi à produire un film superhydrophobe en une seule étape sur du cuivre. Pour cela, ils ont immergé un coupon de cuivre dans une solution de nitrate d'argent et d'acide benzoïque pendant différentes durées. Les analyses par diffraction des rayons X ont révélé que le cuivre était couvert d'oxydes de cuivre et d'argent. Grâce à un microscope électronique à balayage, l'arrangement de la micro-nanostructure a été observé (Fig. I.12). Cette surface possède un angle de contact de  $162^\circ$ , ce qui la rend potentiellement utile pour la réduction de la traînée dans l'eau [30].



**Fig. I. 12** : Film d'argent sur du cuivre

**I.5 Conclusion :**

Dans le domaine de haute tension, les matériaux isolants sont essentiels pour prévenir les décharges électriques et garantir la sécurité des équipements et des personnes. Les matériaux isolants tels que les polymères, les céramiques et les composites ont des propriétés uniques qui les rendent adaptés aux applications de haute tension, telles que les transformateurs et les câbles électriques.

D'autre part, les matériaux superhydrophobes sont également importants dans le domaine de haute tension car ils peuvent réduire les pertes d'énergie dans les lignes électriques en minimisant l'accumulation de l'eau sur les surfaces. Les matériaux superhydrophobes peuvent également réduire les risques de décharges électriques en empêchant la formation de ponts conducteurs entre les conducteurs.

En combinant les avantages des matériaux isolants et des matériaux superhydrophobes, il est possible de développer des matériaux innovants qui répondent aux exigences de haute tension. Cependant, il est important de continuer à rechercher et à comprendre les propriétés de ces matériaux pour améliorer leur performance et leur durabilité dans les applications de haute tension. Une utilisation efficace de ces matériaux peut contribuer à améliorer la fiabilité et l'efficacité des systèmes électriques de haute tension.

# **Chapitre II**

*Revue sur les études liées à la  
performance des barrières*

## II.1 Introduction :

L'analyse du comportement des matériaux sous une tension électrique est un domaine de recherche crucial pour comprendre les phénomènes électriques et améliorer la fiabilité des systèmes électriques. L'un des aspects importants de cette analyse est l'étude de comportement de barrières isolantes dans un intervalle d'air sous tension alternative. Les paramètres clés qui influencent sur le comportement de barrières isolantes incluent la longueur de l'intervalle d'air, le nombre et la position des barrières, ainsi que les caractéristiques matérielles de la barrière elle-même. De nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation des barrières isolantes dans un intervalle d'air sous tension alternative. Dans ce chapitre, nous présenterons certaines de ces recherches par ordre chronologique, en identifiant les chercheurs et les époques correspondantes.

## II. 2 Avancées significatives dans les technologies de barrières diélectriques

Au cours des 10 dernières années, il y a eu des avancées significatives dans les technologies de barrières diélectriques pour les équipements électriques à haute tension. Voici quelques-unes des avancées les plus notables :

**1. Nouveaux matériaux :** Les matériaux isolants tels que les polymères fluorés, les composites à base de fibres de verre et les nano-composites ont été développés pour améliorer les propriétés diélectriques et mécaniques des barrières isolantes. Ces nouveaux matériaux offrent une résistance accrue aux décharges partielles et aux arcs électriques, ainsi qu'une meilleure stabilité thermique.

**2. Conception optimisée :** Les avancées dans la modélisation informatique et la simulation ont permis d'optimiser la conception des barrières isolantes pour améliorer leur performance diélectrique et leur durabilité. Les conceptions optimisées peuvent inclure des formes spéciales pour réduire le champ électrique, des revêtements spéciaux pour améliorer la résistance à l'humidité et des mécanismes de refroidissement pour réduire la température de surface.

**3. Techniques de fabrication améliorées :** Les techniques de fabrication telles que l'impression 3D, le moulage par injection et le laminage ont été améliorées pour produire des barrières isolantes plus précises et plus uniformes. Ces techniques permettent également de produire des barrières isolantes avec des géométries complexes et des propriétés diélectriques optimisées.

**4. Systèmes de surveillance en temps réel :** Des systèmes de surveillance en temps réel ont été développés pour surveiller l'état des barrières isolantes pendant leur utilisation. Ces systèmes peuvent détecter les décharges partielles et les défauts de surface en temps réel, permettant aux opérateurs de prendre des mesures préventives avant que des défaillances ne se produisent.

**5. Intégration de la connectivité :** Les barrières isolantes sont de plus en plus équipées de capteurs et de dispositifs de communication pour fournir des données en temps réel sur leur état de santé et

leur performance diélectrique. Ces données peuvent être utilisées pour optimiser la maintenance préventive et améliorer la fiabilité des équipements électriques à haute tension.

En résumé, les avancées technologiques des barrières diélectriques au cours des 10 dernières années ont permis d'améliorer leur performance diélectrique, leur durabilité et leur fiabilité. De plus, ces avancées ont permis de réduire les coûts de fabrication et de maintenance, tout en offrant une meilleure sécurité pour les opérateurs et les équipements. Les barrières isolantes sont des composants essentiels des équipements électriques à haute tension, et leur évolution continue contribue à assurer une alimentation électrique fiable et efficace dans le monde entier.

### II. 3 Investigations antérieures de recherches sur la performance des barrières

#### b. Barrière hémisphérique

##### - L. Ming, 1993

L. Ming confirma que l'augmentation de la tension disruptive de l'intervalle d'air pointe - barrière - plan a une relation étroite avec l'augmentation de la largeur de la barrière. Pour les petites largeurs de la barrière, la tension disruptive est faiblement améliorée [31].

Sous tension impulsionnelle, il a obtenu une augmentation de 30 à 45% la tension disruptive en système pointe - plan pour une barrière de forme hémisphérique et dont la cavité est en face de la pointe, par rapport à la valeur de la tension de claquage d'une barrière plane [31] (Fig. II. 1).

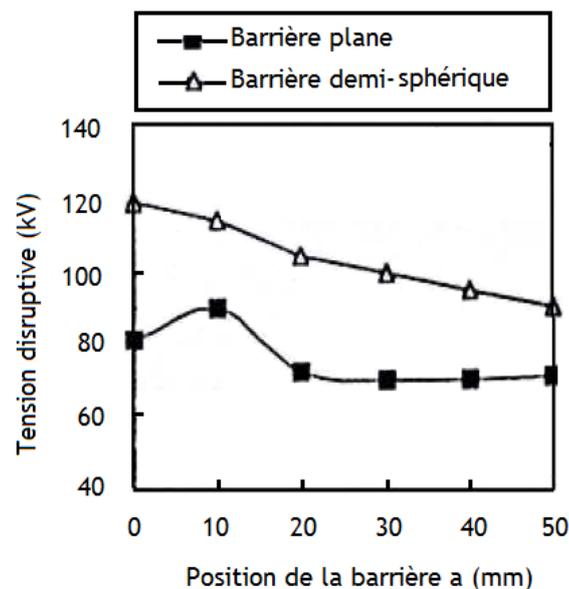


Fig. II. 1 : Effet de la forme de la barrière (d= 50mm)

L. Ming a étudié la propagation des streamers qui influe sur la tenue diélectrique sans avoir le claquage. Les décharges préliminaires accélèrent le vieillissement de la barrière et augmentent la quantité de la charge superficielle qui facilite les décharges glissantes. Dans ce cas, la tension de rupture est inférieure à celle obtenue dans un système sans barrière (Fig. II. 2) [32]. L'auteur a également étudié le comportement de l'intervalle d'air pointe - plan avec des barrières trouées au centre. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure II. 3.

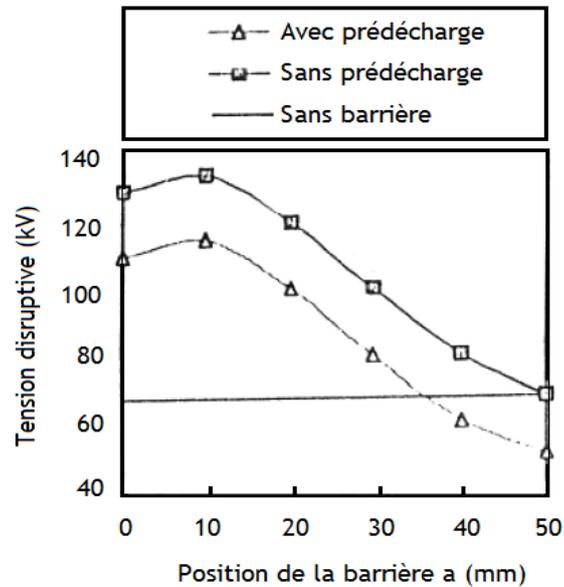


Fig. II. 2 : Influence des prédécharges

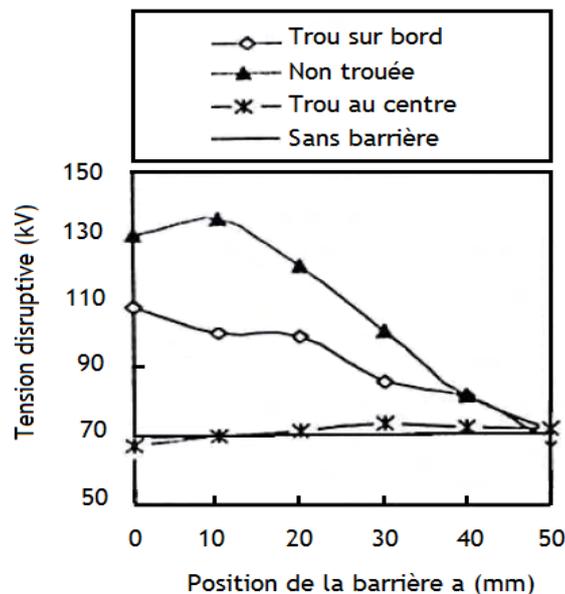
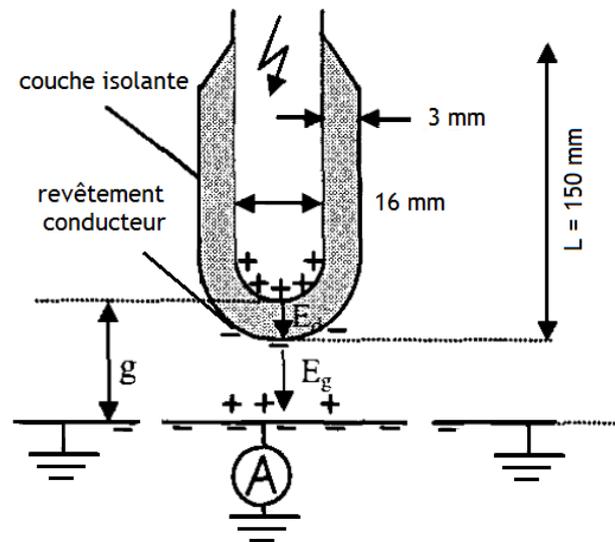


Fig. II. 3 : Influence des barrières trouées

## - F. Mauseth, 2004

F. Mauseth [33] a utilisé une tige hémisphérique avec un rayon de courbure de 8 mm sous tension impulsionnelle. Trois cas ont été examinés (Fig. II.4) :

- i) Tige en aluminium nue.
- ii) Tige recouverte d'une couche isolante en silicone de 3 mm d'épaisseur (SIR).
- iii) Tige recouverte d'une couche de silicone (SIR) de 3 mm d'épaisseur, avec un revêtement conducteur mince juste à l'extrémité de la pointe.



**Fig. II. 4 :** Configuration de l'électrode (le revêtement conducteur est pour le cas iii seulement)

Les résultats présentés montrent un bon accord avec les travaux antérieurs sur la décharge partielle d'une barrière. Dans le cas du champ non - uniforme, la décharge et la forme d'onde du courant sont similaires aux résultats obtenus dans le cas homogène. Avec l'introduction d'une couche conductrice, la charge totale déposée est réduite, mais les décharges sont concentrées à proximité de la pointe de la tige. Le mécanisme de relaxation dominante de la charge de surface enveloppe complètement l'isolation solide.

Lors de l'application d'une tension impulsionnelle proche de la tension de seuil, l'initiation de la décharge est observée au niveau de la pointe hémisphérique de la tige. L'émission d'une lumière a été observée et semble être répartie uniformément le long de la pointe de l'hémisphère comprenant un certain nombre de décharges indépendantes similaires aux décharges dans une configuration homogène. L'application d'une couche conductrice à la pointe de la tige réduit considérablement l'activité de la décharge électrique, elle se concentre à proximité de l'extrémité de la tige.

Les résultats obtenus par l'auteur montrent que la tension de seuil de la décharge pour une configuration tige recouverte / plan est d'environ 1,4 fois supérieure à celle d'utilisation d'une tige nue. Dans le cas d'une électrode nue, un claquage de l'espace d'air aura lieu immédiatement.

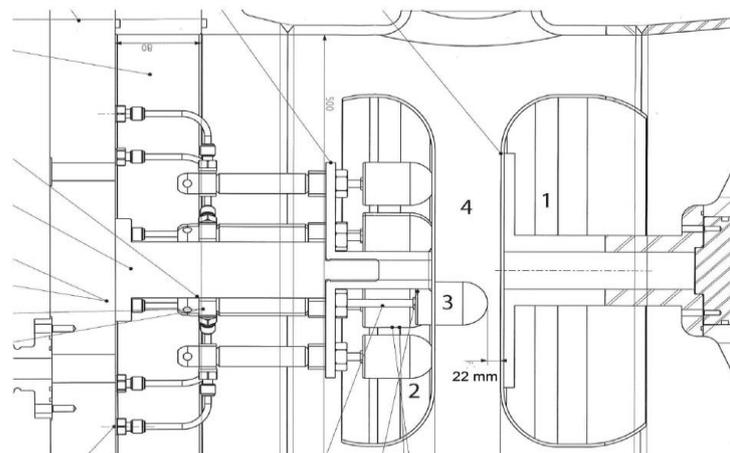
- **D. van der Born, 2013**

D. van der Born [34] a effectué des essais de claquage sur une configuration d'électrodes pointe - plan qui est représentée sur la figure II.5. Le système est composé d'une électrode plane fixe en aluminium et de 12 tiges en aluminium indiquées respectivement par 1 et 3, celles - ci sont encastrées dans un plan indiqué par 2. La distance d'isolement de gaz est indiquée par 4.

Le système d'électrodes est placé à l'intérieur d'un récipient à pression qui est rempli d'air sec à 0,9 MPa de pression absolue ou de SF<sub>6</sub> à 0,34 MPa. A ces pressions et aux champs électriques appliqués, l'ionisation effective des deux gaz est comparable.

L'intervalle de gaz est fixé à 22 mm pour acquérir la distribution du champ électrique désirée qui est comparable à la distribution du champ à l'intérieur d'un appareillage électrique isolé par le gaz de 420 kV de tension.

L'objet d'essai est soumis à deux tensions, AC à 50 Hz et tension impulsionnelle de foudre (1,2 / 50 μs). Les essais sur les électrodes nues sont considérés comme référence.



**Fig. II. 5 :** Schéma de configuration pointe - plan [34]

Les matériaux de revêtement utilisés dans les essais de claquage sont présentés dans le tableau 3. L'épaisseur des couches revêtues varie de 40 μm à 1,9 mm. Tous les revêtements sont constitués d'une seule couche mince à l'exception du caoutchouc de silicone qui est appliqué sur une couche conductrice et semi-conductrice.

**Tab. II. 1** : Type et épaisseur du matériau de la couche isolante

Matériau	Épaisseur de la couche
Tufram	50 $\mu\text{m}$
Nuflon	40 $\mu\text{m}$
Parylene C	40 $\mu\text{m}$
Couches multiples en Silicone	1.9 mm

D. van der Born [34] a constaté que l'application d'une tension alternative de 50 Hz sur le système d'électrode qui est composé d'une pointe revêtue influe légèrement sur l'amélioration de la tension disruptive.

Lorsque le claquage en tension alternative se produit sur le Tufram, la perforation produite ne crée pas un point lumineux. Les claquages consécutivement répétitifs créent des crevaisons à différents endroits.

En tension de choc de foudre négative, le système d'électrodes isolé avec de l'air et composé de pointes recouvertes du Tufram ne montre aucune amélioration par rapport à celui avec électrodes nues. Il a supposé que ce comportement soit provoqué par le fait que le claquage est initié dans la couche revêtue en Tufram qui a été mis à la place de l'air, a une faible rigidité électrique.

Dans les deux isolations (gaz et SF<sub>6</sub>), l'amélioration de la tension de claquage en tension de choc de foudre négative pour un système d'électrodes revêtues de Nuflon et de Parylène C, varie entre 17.2 % et 32.2 %.

Le fait que l'amélioration de la tension de claquage sous tension de choc de foudre négative soit supérieure à celle obtenue avec la tension alternative, veut dire que celle-là est provoquée par l'existence de charges de surface de polarité opposée et la réduction de l'émission du champ par le recouvrement de la cathode.

Il a soupçonné que la grande différence de la tension de claquage de Nuflon à LI négative est causée par des défauts de matériau. Un exemple d'un tel défaut est le fait que le matériau de revêtement peut ne pas recouvrir complètement l'électrode laissant des vides sur la surface recouverte.

La tension de claquage des électrodes nues soumises à une tension de choc de foudre positive dans l'air sec et SF<sub>6</sub> est entre 33 % et 43 %. Dans ce cas elle est supérieure à celle obtenue en tension de choc de foudre négative.

Ce comportement de polarité peut être dû au fait que, lors d'une émission d'électrons en tension de choc de foudre négative, ils ont occupé une place dans les zones à champ électrique fort et augmentent la probabilité de formation d'avalanche et ensuite le claquage aura lieu. Avec une tension de choc de foudre positive, les électrons sont émis dans les régions de faible champ électrique, ce qui entraîne un manque d'électrons dans les régions critiques du gaz pour l'initiation du phénomène de claquage.

La tension de claquage des électrodes revêtues de Nuflon et de Parylène C à des chocs de foudre positive dans l'air sec est inférieure à la tension de claquage d'une électrode nue. La diminution varie de 3,3 % à 18,7 %.

Cette diminution pourrait être causée par le fait que la cathode n'est pas totalement recouverte. La réduction de l'émission du champ n'est donc pas présente. De plus, les charges de surface accumulées peuvent entraîner un claquage transversal du revêtement avant le gaz, résultant d'une augmentation de l'ionisation et donc une rupture complète de l'espace.

Avec l'utilisation d'un revêtement en silicone les résultats obtenus sont résumés en (tableau II.2).

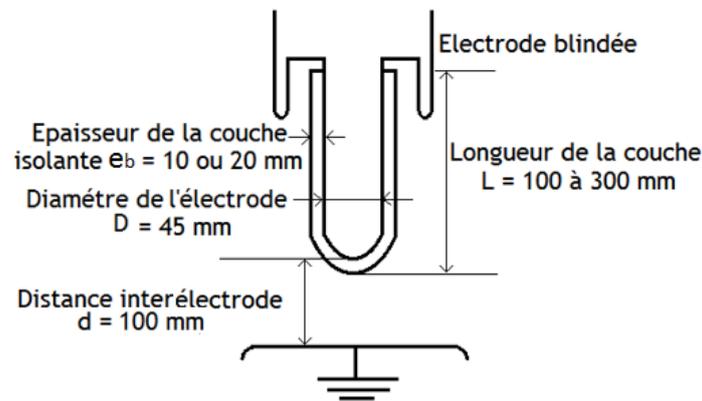
**Tab. II. 2 :** Tension de claquage et efficacité du système avec l'utilisation du silicone

Type de tension appliquée	U <sub>50</sub> % [kV]	Efficacité
AC 50 Hz à air sec, électrode nue	290	0 %
AC 50 Hz à air sec, électrode avec silicone	310	6,9 %
Tension de choc de foudre négative à air sec, électrode nue	296	0 %
Tension de choc de foudre négative à air sec, électrode avec silicone	323	9,1 %
Tension de choc de foudre positive à air sec, électrode nue	423	0 %
Tension de choc de foudre positive à air sec, électrode avec silicone	344	-18,7 %

### c. Barrière tubulaire

#### - T. Mizuno, 2003

T. Mizuno [35], a étudié l'influence des deux caractéristiques : la longueur et l'épaisseur d'une isolation (caoutchouc liquide), d'un système d'électrodes constitué d'une coupôle recouverte du matériau isolant mise sous tension de choc de foudre et d'un plan mis à la terre. L'auteur [35] a proposé l'application d'un système d'isolation hybride (Fig. II.6) dans les appareillages électriques.

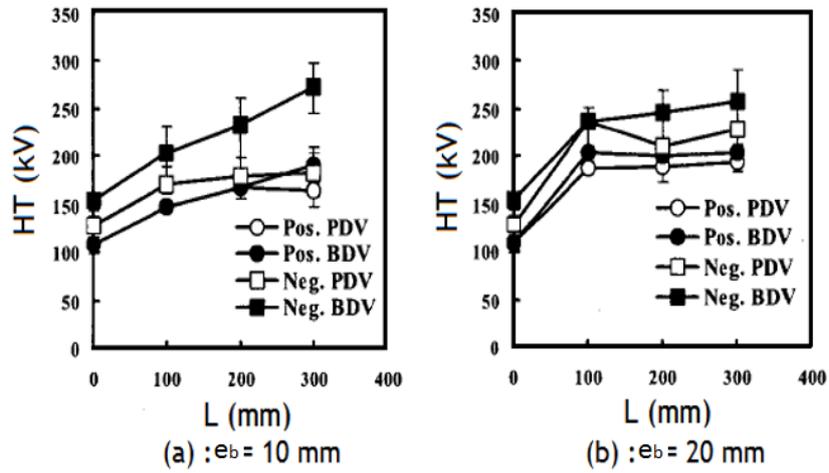


**Fig. II. 6 :** Configuration de l'électrode

Il a constaté que la performance électrique d'un système d'isolation va être améliorée par une composition (gaz / polymère) ainsi que la polarité de la tension appliquée influe sur le processus de la décharge électrique.

Pour une épaisseur  $e_i = 10$  mm de la couche isolante, il a constaté que la tension de claquage croît linéairement en fonction de la longueur de la couverture déposée sur la tige à cause de l'allongement du chemin de décharge électrique. Celle - là est légèrement plus élevée dans le cas des impulsions négatives que positives, alors que la tension de la décharge partielle était constante pour les deux types de charge d'impulsion.

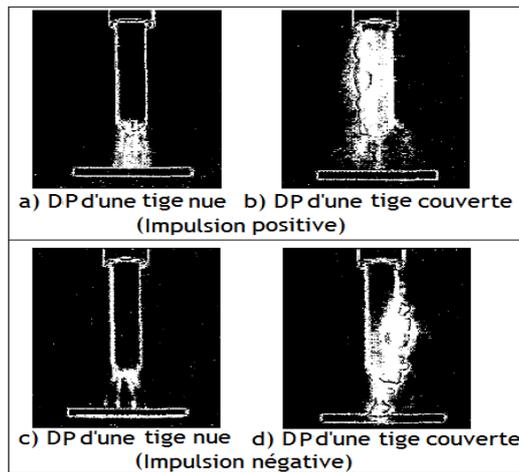
T. Mizuno a étudié la tension d'amorçage des décharges partielles (PDV) et la tension de claquage impulsionnelle (BDV). Il a constaté que les deux grandeurs sont pratiquement constantes (Fig. II.7), pour une épaisseur  $e_b = 20$  mm [35].



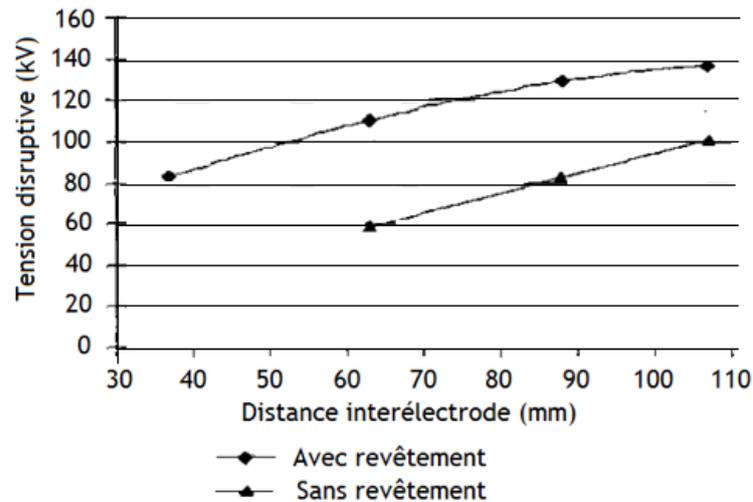
**Fig. II.7 :** PDV et BDV en fonction la longueur de la couche isolante dans l'espace d'air ( $D = 45$ mm,  $d = 100$  mm,  $P = 0.1$  MPa)

De plus, l'émission d'une décharge partielle impulsionnelle lumineuse a été observée (Fig. II. 8). Pour le cas d'une électrode nue, la décharge aura lieu entre la pointe de la tige et l'électrode plane, et dans le cas d'une électrode couverte, la décharge partielle aura lieu à l'extrémité de la tige pointue qui progresse dans l'air vers le plan.

La tension du système avec électrode protégée par une isolation est plus élevée que celui obtenue avec une électrode nue (Fig. II.9).



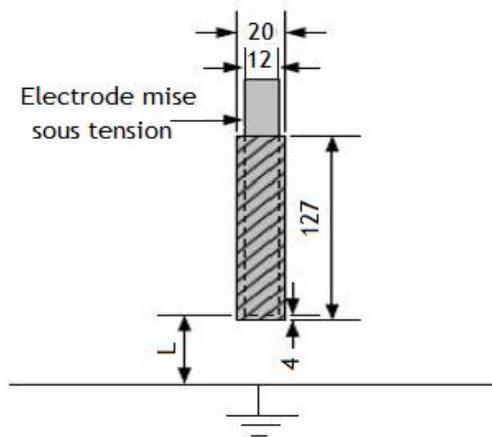
**Fig. II. 8 :** Photos de la décharge partielle pour  $L = 300$ mm



**Fig. II.9 :** Tension impulsionnelle positive en fonction de la distance interélectrode

- **P. N. Mavroidis, 2012**

P. N. Mavroidis [36] a étudié 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 manœuvre impulsionnelle positive et tension de choc de foudre (Fig. II.10).



**Fig. II. 10 :** Schéma du système, les valeurs numériques sont données en mm

La distance interélectrode est notée par L [36]

La distance interélectrode a été considérée comme paramètre d'influence sur la tension de claquage. Le système d'électrodes sans barrières est utilisé comme cas de référence. Une augmentation de la performance électrique est due à l'introduction de la couverture isolante en PTFE 'polytétrafluoroéthylène' (Fig. II.11) surtout dans le cas de la tension impulsionnelle de foudre.

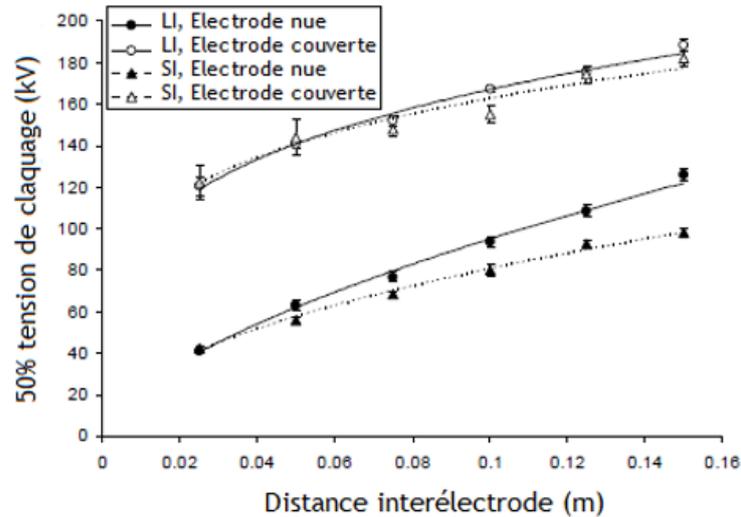


Fig. II.11 : 50% de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode [36]

P. N. Mavroidis [37] a utilisé une sonde de Meek et de Collins [38], positionnée au centre du plan mis à la terre (Fig. II.12), et un oscilloscope digital de 400 MHz permet la surveillance de l'intensité du champ électrique au niveau du plan mis à la terre.

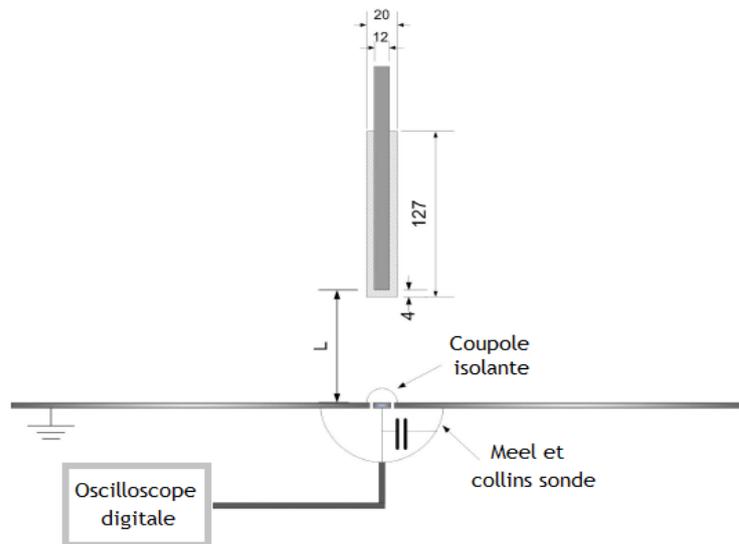
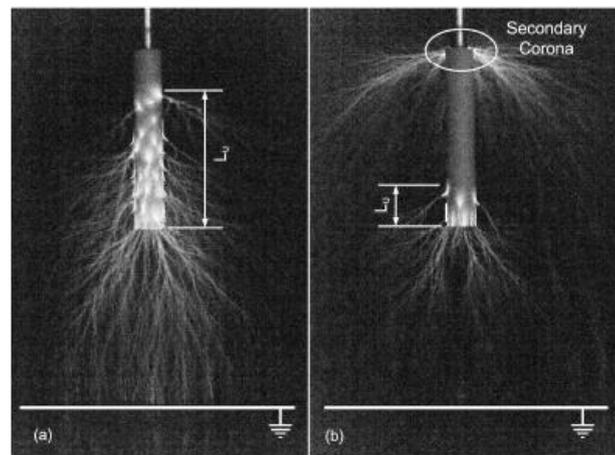


Fig. II. 12 : Schéma du système d'électrodes [37]

L'effet de la couverture isolante sur la rigidité diélectrique peut être expliqué par l'influence de la variation temporelle du champ électrique qui est due à l'accumulation de charges sur la surface de la barrière et aux décharges superficielles et dans l'intervalle d'air. D'avantage, ce travail a montré que pour faire une étude sur le claquage d'un système en présence des couvertures diélectriques [37], il est nécessaire d'utiliser une technique de mesure de charges de surface.

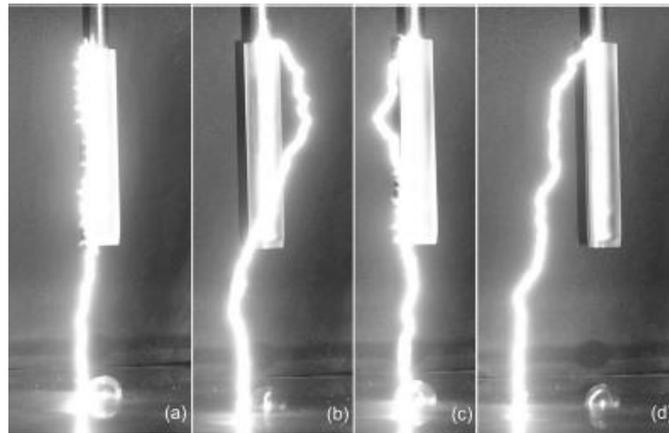


**Fig. II. 13** : Photographies de la décharge, longueur d'espace inter - électrodes est de 0.125 m, PTFE, (a)160 kV pour LI, (b) 173 kV pour SI.  $L_p$  : longueur extérieure du développement de la décharge [37]

Dans le cas d'une tige couverte, la tension est plus élevée que celle obtenue avec une tige nue. Cela est étroitement liée aux décharges couronnes, à savoir la décharge couronne initiale est à proximité de l'extrémité de la couverture isolante, d'autres décharges couronnes émergent le long de la surface de la couverture diélectrique et se développent principalement dans l'air, et la décharge couronne secondaire à proximité de l'extrémité supérieure de la couverture. Les répartitions couronne et les probabilités de claquage sous tension de choc de foudre positive sont dérivées pour des intervalles d'air pointe - plan avec une couverture diélectrique de l'électrode pointe, tout en variant sa longueur [37]. La première et la deuxième décharge couronne ainsi que la tension de claquage sont significativement plus élevée par rapport à celles qui se rapportent au simple intervalle pointe - plan, qui a été considéré comme une référence.

La première décharge couronne de streamers n'est pas un critère suffisant pour la disruption du système. La deuxième décharge couronne et la tension de claquage de l'intervalle d'air pointe - plan avec la couche diélectrique recouverte est significativement plus élevée que celle obtenue dans le cas d'un système pointe - plan en fonction de la distance interélectrode, à cause de l'effet de la longueur de la couverture diélectrique. Cela a été discuté sur la base du modèle de la progression de la décharge jusqu'au claquage (Fig. II.14).

Pour une isolation en PTEF, une décharge couronne secondaire à l'extrémité supérieure de la couverture a été observé. Le claquage se fait sans perforation de la barrière isolante. Elle se produit par une étincelle développant le long de la surface de la couverture (Fig. II.14a) ou en partie (Fig. II.14b et II. 14c) ou seulement en air libre (Fig. II. 14d), elle se développe dans l'air et elle fait une jonction avec le plan mis à la terre.



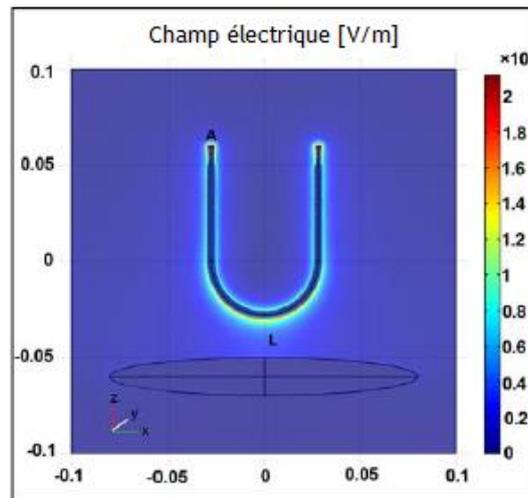
**Fig. II. 14 :** Trajectoires de la décharge dans l'intervalle d'air pointe - plan. (a) contournement avec tension de choc de foudre, (b), (c) et (d) contournements avec tension de choc de manœuvre [37]

- **E. Foruzan, 2015**

E. Foruzan [39] a étudié l'impact des barrières diélectriques en polytétrafluoroéthylène (PTFE) et chlorure polyvinylique (PVC) sur la tension de claquage sous tensions AC et DC avec le développement de deux modèles géométriques. Dans le premier modèle, il a supposé que l'électrode sous tension a été recouverte du matériau diélectrique PVC. Dans le deuxième modèle, il a inséré une barrière diélectrique en PTFE dans l'espace d'air entre l'électrode sous tension en forme U recouverte du PTFE et le plan mis à la terre. Les deux modèles ont été simulés avec le logiciel COMSOL Multiphysiques. Les résultats de simulation ont été vérifiés par l'expérimentation dans le laboratoire. L'auteur [68] a montré qu'un écran diélectrique en PTFE ou en PVC se comporte comme un obstacle mécanique, et il allonge le chemin de la décharge électrique. En outre, les charges surfaciques de la barrière changent la distribution du champ électrique, résultantes de l'augmentation considérable de la tension de claquage.

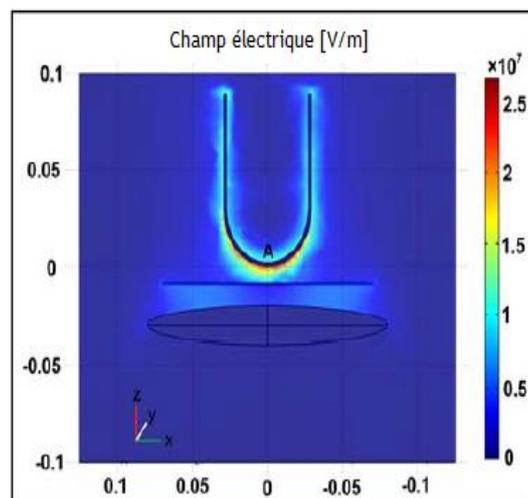
Dans le cas d'un système composé d'une électrode sous forme U recouverte du PVC et un plan mis à la terre avec une barrière diélectrique en PTFE de  $18 \times 18 \text{ cm}^2$  et d'une épaisseur de 1 mm, la tension de claquage croît de 18.5 kV à 70 kV en DC et de 25 kV à 90 kV en AC.

La simulation représentée en figure II.15, montre la distribution du champ électrique de la tension de pré-claquage. Les streamers prennent naissance au point A (Fig. II.16), puis ils se propagent le long de la surface de la barrière traversant une ligne L vers l'électrode mise à la terre.



**Fig. II. 15 :** Distribution du champ électrique de préclaquage d'une configuration d'électrode en forme de U recouverte d'une barrière en PVC [39]

Lorsqu'une barrière diélectrique rectangulaire plate en PTFE de 1 mm d'épaisseur est insérée dans un espace d'air entre les deux électrodes, le chemin critique des streamers commence du point plus bas de l'électrode HT (Fig. II. 16) et se propage directement au centre de la barrière, puis aux bords de la barrière. Ce dernier continue sa propagation vers l'électrode mise à la terre. A partir de la figure II.16, il est évident que le champ électrique est plus intense au point A.



**Fig. II. 16 :** Distribution du champ électrique durant le claquage dans le cas d'insertion d'une barrière plate en PTFE entre les deux électrodes [39]

**-N. Bouatia, 2019**

Les résultats essentiels issus de l'étude expérimentale sur la performance électrique d'un système pointe - plan avec barrière tubulaire en verre à revêtement en suie superhydrophobe, en silicone hydrophobe et enveloppant la pointe sous tension continue positive, peuvent être résumés comme suit :

- Sous atmosphère propre et sèche, la tension disruptive de l'intervalle d'air du système avec barrière tubulaire croît avec sa taille et la distance interélectrode, indépendamment de la nature du matériau de revêtement de la barrière. Cette performance électrique est de loin plus élevée pour une barrière à revêtement en suie que ses deux homologues en silicone et en verre à cause de l'allongement du chemin de disruption du système, dû à l'écartement assez important de la décharge de contournement de sa surface.
- Sous conditions très sévères de pollution, la tension disruptive de l'espace d'air du système avec barrière tubulaire en suie est de loin très grande devant celle en verre à cause de l'existence de la décharge électrique de contournement dans le cas de la barrière en suie et de sa suppression totale dans le cas de celle en verre.
- Dans l'intervalle d'air compris entre 2 et 14 cm, la performance électrique d'une barrière tubulaire à revêtement en suie est plus élevée que celle d'une barrière plane en verre de même surface sous une atmosphère quelconque, pour des raisons de faible ligne de contournement de la barrière plane en verre sous atmosphère propre et sèche et de l'annulation de la tension de contournement de sa surface du fait de son comportement très conducteur sous conditions de pollution très sévères. De plus les moyens de fixation de cette dernière sont plus coûteux par rapport à la première. Donc techniquement et économiquement parlant, il est vivement souhaitable de remplacer la barrière plane hydrophile par celle tubulaire superhydrophobe [40].

#### - T. Belhoul, 2020

L'étude de la disruption d'un espace d'air à champ électrique alternatif non uniforme avec barrières tubulaires hydrophobes et hydrophiles a mené aux résultats essentiels suivants :

- Un modèle de disruption d'un espace d'air à champ électrique non uniforme sous atmosphère propre et/ou polluée a été développé dans cette étude. Moyennant les résultats expérimentaux de rupture diélectrique des systèmes considérés, ce modèle caractérise la tension de contournement en fonction du matériau de la barrière. De plus, il permet une comparaison aisée de son pouvoir d'isolement électrique dans ces conditions.
- Sous conditions très sévères de pollution, aucune protection n'est assurée par une barrière en verre aux deux systèmes et par deux barrières au système pointe-pointe à cause de l'absence de la décharge de leur contournement. Ceci est dû au comportement très conducteur de la couche de pollution recouvrant leur surface. Par contre, la protection offerte à ces systèmes par une barrière en silicone est de loin la meilleure, grâce à la présence de la décharge de contournement de sa surface sous pollution très forte.

- Sous une atmosphère propre, le pouvoir d'isolement électrique est plus performant pour la barrière en silicone hydrophobe que celle en verre hydrophile. Ceci est dû à la possession d'une tension de contournement très élevée grâce à ses propriétés diélectriques plus avantageuses sans oublier sa légèreté par rapport au verre [41].

#### - A. Mekhaldi, 2021

Dans cette recherche, la distribution du champ électrique dans des lacunes d'air point-barrière-plan a été étudiée en utilisant le logiciel COMSOL Multiphasique basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Une comparaison entre le champ électrique dans les cas propre et pollué a été effectuée. L'effet de l'état de surface de la barrière sur le champ électrique pour un système point-plan donne les résultats suivants :

- La pollution du côté du point réduit considérablement la qualité d'isolation de la barrière.
- Le champ électrique de la configuration point-barrière-plan augmente avec l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution recouvrant la barrière.
- L'influence de la permittivité de la fine couche de pollution sur le champ électrique est remarquable pour les petites valeurs de conductivité.
- À partir de nos résultats avec différentes épaisseurs de couche de pollution, nous pouvons déduire que ce paramètre a une influence importante sur la distribution du champ électrique et donc sur la résistance diélectrique du système.
- Il existe une valeur limite de la conductivité à partir de laquelle la barrière polluée donne presque le même résultat que la barrière conductrice. Dans notre étude, cette valeur est égale à 2,25 mS/cm [42].

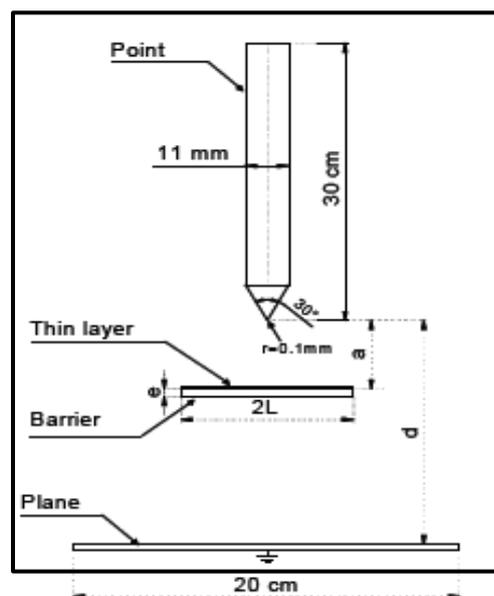


Fig. II. 17 : Schéma de la configuration pointe-plan

**II-4 Conclusion :**

En résumé, les propriétés isolantes des barrières dépendent de paramètres tels que leur rigidité diélectrique, leur permittivité et les décharges partielles. L'utilisation de ces barrières dans les intervalles d'air pointe-plan ou pointe-pointe permet d'augmenter leur tenue diélectrique d'un facteur 2 à 3 selon le type de tension appliquée. La position optimale de la barrière correspond à 20% de la longueur de l'intervalle.

L'évolution de la décharge dans ces intervalles dépend de la position de la barrière. Une décharge directe a lieu lorsque la barrière est suffisamment éloignée des électrodes. Une décharge progressive par étapes est observée lorsque la barrière est proche de l'électrode positive ou pour une électrode négative quelle que soit la position de la barrière.

Les paramètres influençant le plus les performances électriques des barrières dans les intervalles d'air ont été mis en évidence à travers une synthèse des travaux de plusieurs chercheurs.

En conclusion, que les barrières isolantes présentent des propriétés variables selon leurs caractéristiques. Leur utilisation permet d'augmenter de manière significative la tenue diélectrique des intervalles d'air. Les paramètres les plus influents sur leurs performances électriques ont été identifiés.

# **Chapitre III**

*Partie pratique et simulation*

### III.1 Introduction

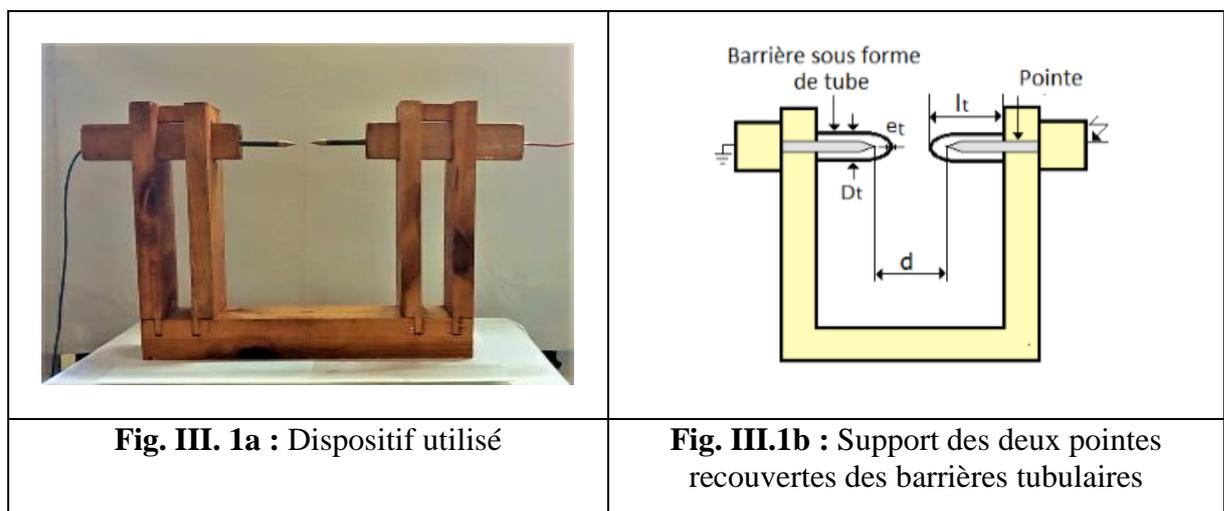
La recherche des conditions d'exploitation optimales des barrières isolantes est une condition essentielle pour leur utilisation dans l'industrie. L'étude de la distribution du champ dans ce cas est impérative. Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais menés dans le laboratoire et la simulation sous COMSOL multiphysics. L'objectif visé à travers ce présent chapitre consiste en la prédiction du chemin de disruption de l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme au moyen de la distribution du champ et du potentiel électrique alternatif résultant au niveau de cet espace, à l'aide du logiciel COMSOL multiphysics version 5.4. Lors de cette étude, les paramètres d'influence de champ et du potentiel électrique, comme la distance interélectrode ' $d$ ' et la nature de l'atmosphère (propre et sèche ou polluée) ainsi que la nature du matériau de la barrière ont été pris en considération.

À la fin de ce chapitre, une comparaison a été réalisée entre les systèmes contenant des barrières en verre de forme tubulaire avec l'utilisation des matériaux superhydrophobe et intelligent et celle hydrophiles en verre. Ces résultats vont nous permettre de caractériser et d'évaluer le comportement d'une barrière en verre et une barrière superhydrophobe dans des conditions très défavorables sous AC.

## III. 2 Modèles expérimentaux et techniques de mesure

### III. 2. 1 Modèle expérimental

Le système d'électrode et leur support ont été réalisés au niveau du hall technologie et au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia. Les deux électrodes de ce système sont encastrées sur les deux faces opposées d'un support en bois en forme de U (Fig. III. 1).



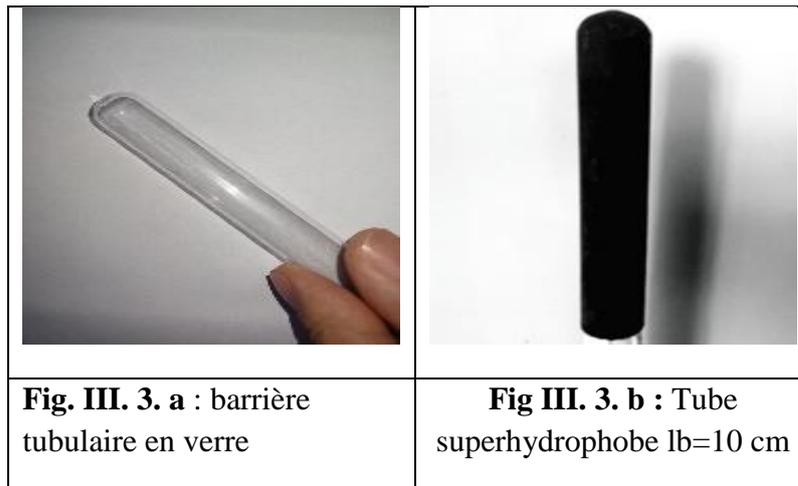
**Fig. III. 1** : Support de système d'électrode

Les électrodes haute tension et terre sont constituées chacune d'une tige cylindrique en acier de 12 mm de diamètre ( $D_r$ ) et 200 mm de longueur ( $L_r$ ). Les deux tiges situées du côté haute tension et terre est terminées par une pointe conique en Bronze, ayant un angle de  $30^\circ$  et 0.00145 mm de rayon de courbure. La taille de l'intervalle d'air 'd' compris entre ces deux électrodes varie entre 0 et 100 mm. Les dimensions de ce modèle expérimental ont été déterminées sur la base du respect des distances de sécurité entre l'appareillage de haute tension et le dispositif d'essai lors de son emplacement dans la cellule de mesure dédiée à ce sujet (Fig. III. 2).



La barrière tubulaire en verre et l'isolation superhydrophobe ont été exploitées dans cette investigation. La barrière tubulaire en verre (Fig. III. 3.a) et l'isolation superhydrophobe (Fig.III.3. b) en verre hydrophile utilisée pour titre de comparaison a été exploitée par d'autres chercheurs. Le matériau de la barrière tubulaire en verre commercialisée sous le produit de marque Powersil 567 par la société Wacker Chemie (Allemagne).

Les tubes ont pour longueur  $L_t = (50 \text{ et } 100) \text{ mm}$ . Leur diamètre intérieur est de 15 mm et extérieur ( $D_t$ ) de 16.5 mm. Les barrières tubulaires enveloppent très étroitement les électrodes au moyen d'un ou plusieurs anneaux en plastique de telle manière qu'elles ne soient pas soufflées par la décharge électrique au moment du contournement de leur surface. Les supports en bois coulisse sur la base du dispositif supportant les deux électrodes. Ainsi, la position de la barrière par rapport à l'électrode sous tension peut être aisément variée au moyen de ce modèle expérimental, représentent un tube superhydrophobe.



### III. 2. 2 Fabrication d'un revêtement super hydrophobe

La fabrication d'un revêtement super hydrophobe sur une barrière diélectrique peut être réalisée en utilisant diverses techniques de revêtement. Voici quelques étapes générales pour créer un revêtement super hydrophobe sur une barrière diélectrique :

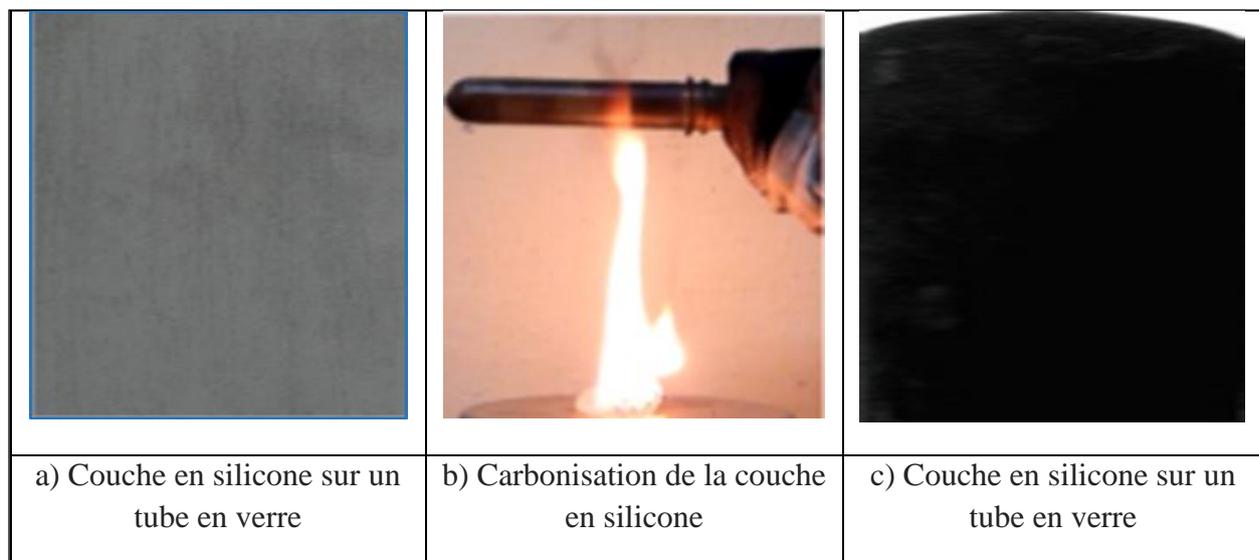
- a. Préparation de la surface :** La surface de la barrière diélectrique doit être nettoyée et séchée complètement avant l'application du revêtement. Toute impureté ou contamination peut affecter négativement la performance du revêtement.
- b. Application du revêtement :** Le revêtement super hydrophobe peut être appliqué sur la surface de la barrière diélectrique en utilisant des techniques telles que la pulvérisation, l'immersion ou le dépôt de couche mince. Les matériaux de revêtement couramment utilisés pour créer des surfaces super hydrophobes sont les polymères fluorés, les nanomatériaux et les silanes.
- c. Traitement thermique :** Pour améliorer la performance du revêtement, un traitement thermique peut être appliqué pour faire fusionner les molécules du revêtement et les lier à la surface de la barrière diélectrique. Le traitement thermique peut être réalisé à une température adaptée à la composition chimique du revêtement.
- d. Test de performance :** Une fois le revêtement appliqué, il est important de tester la performance de la surface super hydrophobe. Les tests de performance peuvent inclure l'évaluation de la stabilité à long terme du revêtement, la capacité à repousser l'eau et la résistance à l'abrasion et à l'usure.

Il est important de noter que le choix du revêtement et de la technique de revêtement dépendent des exigences spécifiques de l'application et des propriétés de la barrière diélectrique.

Des tests et des essais en laboratoire peuvent être nécessaires pour déterminer la méthode la plus appropriée pour créer une surface super hydrophobe sur une barrière diélectrique spécifique.

### III.2.3 Confection et caractérisation d'une isolation multicouches superhydrophobes

La première couche de revêtement superhydrophobe est obtenue en étalant, dans un premier temps, manuellement et uniformément une quantité de gel de silicone fraîche sous forme d'une couche très fine sur la face supérieure des tubes en verre de deux longueurs différentes 10 cm et 5 cm (Fig. III. 4a). Dans un deuxième temps, une autre quantité du même produit est déposée sur un morceau de bois et est ensuite enflammée. Enfin, les tubes en verre sont approchés de la flamme pour recouvrir leur surface de suie provenant de la carbonisation de la silicone (Fig. III. 4b). La figure (III. 4c) montre les tubes totalement noircis et nettoyés à l'eau du robinet. Les couches suivantes sont appliquées de la même manière que la première, mais à des intervalles d'environ 24 heures.



**Fig. III. 4 :** Étapes de confection d'une isolation à multicouches superhydrophobes

### III. 2. 4 Pollution d'une surface isolante

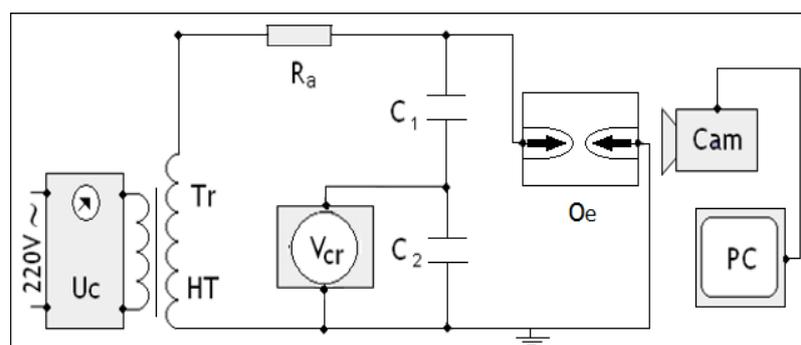
La solution polluante utilisée pour la surface superhydrophobe contient essentiellement de l'eau distillée, et du chlorure de sodium dont la proportion est déterminée selon la conductivité volumique désirée de la solution. Une quantité de 40g de kaolin est rajoutée à la solution dans le cas de la contamination de la surface hydrophile, cette dernière est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile. La valeur de la conductivité volumique ( $\sigma_v$ ) de la solution utilisée dans le cadre de cette étude est égale à 30 mS/cm [44]. Celle-ci correspond à un niveau de pollution très défavorable d'un site intérieur [45]. Avant que nous procédions à la mesure de la tension de

contournement de la surface de l'isolant dans les cas sans et avec dépôt de pollution, les échantillons hydrophobes ont été dans un dessiccateur contenant du gel de silicone, pendant au moins 24 heures pour éliminer toute présence d'humidité et lui faire récupérer son hydrophobicité. A la fin de chaque essai l'échantillon en silicone est nettoyé à l'aide d'un mouchoir en papier et l'isopropanol. Il est à noter que la valeur mesurée est la moyenne d'une série de 25 essais et la pause entre deux séries consécutives est de 10 heures. La conductivité volumique d'eau est vérifiée et maintenue constante avant chaque série d'essai. Un dessiccateur désigne un équipement servant à protéger des échantillons contre l'humidité. Au préalable une quantité suffisante de gel de silice est déposée au fond du dessiccateur. Ce gel permet de vous soutirer l'humidité absorbée par les échantillons lors du dépôt des gouttes d'eau sur leur surface.

La couche de pollution est appliquée sur la barrière en verre par trempage de celle-ci dans un récipient assez profond pour qu'elle soit mouillée complètement et uniformément. Pour que le verre soit totalement hydrophile, il doit être conditionné avant le début des essais, c'est à dire, trompé plusieurs fois dans la solution polluante jusqu'à ce que sa surface soit complètement mouillée. Cette condition défavorable est nécessaire pour que la surface du verre soit conductrice et sa tension de contournement correspondante soit égale à zéro [43, 44 et 45]. Elle est retirée ensuite du récipient et laissée égoutter au maximum une minute avant sa mise sous tension.

### III.2.5 Circuit de mesure

Le schéma synoptique globale de l'expérimentation réalisé est représenté en figure (III. 5). Le circuit de mesure de la tension disruptive du système contient un transformateur Tr, délivrant à son secondaire une tension alternative maximale de 135 kV. La variation temporelle de sa rampe peut être obtenue automatiquement à l'aide de l'appareil de commande manuelle ou automatique. Un diviseur de tension capacitif  $C_1/C_2$  est connecté aux bornes du transformateur par le biais de la résistance de protection  $R_a$ . L'objet d'essai est relié aux extrémités du diviseur capacitif  $C_1/C_2$  et le voltmètre de crête  $V_{cr}$  à affichage numérique aux bornes de  $C_2$ .



**Fig. III. 5** : Schéma de mesure et de visualisation

### III.2.6 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques

Pour chacun des paramètres d'influence investigués dans ce travail, une série de 25 essais a été réalisée. La valeur moyenne arithmétique de la tension disruptive de l'intervalle d'air du système a été déterminée. La valeur moyenne et l'écart type de la tension de disruption de l'espace d'air du système pointe – barrière – pointe sont déterminés par ces formules :

$$U_{em} = \sum_1^N \frac{U_{iem}}{N} \quad (\text{III. 1})$$

$$RSD = \sqrt{\frac{\sum_1^N (U_{iem} - U_{em})^2}{N - 1}} \cdot \frac{100\%}{U_{em}} \quad (\text{III. 2})$$

Où :

$U_{em}$  : Moyenne de la tension disruptive mesurée (kV) ;

$U_{iem}$  : Tension appliquée obtenue à partir du test (kV) ;

$N$  : le total des tests valide,  $N = 25$ ;

$RSD$  : l'écart type relatif du résultat du test.

La tension disruptive de l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière est liée à la température ambiante, à la pression et à l'humidité de l'air régnant dans le laboratoire et que les différents tests n'ont pas été effectués pendant la même période. Afin de comparer la tension alternative de disruption de l'espace d'air suscitée, tous les résultats obtenus ont été ramenés aux conditions normales de température  $\theta_0$ , pression  $P_0$  et humidité  $H_0$  ( $\theta_0 = 20^\circ \text{C}$ ,  $P_0 = 100 \text{ kPa}$  et  $H_0 = 11 \text{ g/m}^3$ ) en utilisant les relations données à la référence [46].

$$U_i = \frac{K_H}{K_d} U_{em} \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

$U_{im}$  : Tension disruptive de l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière, mesurée à la température  $\theta$  et à la pression  $P$  et à l'humidité  $H$ : donnée par la formule (III. 1) ;

$U_i$  : Tension disruptive de cet intervalle d'air dans des conditions normales ( $\theta_0$ ,  $P_0$  et  $H_{i0}$ ).

$K_d$ : Facteur de correction relatif à la température et à la pression dont l'expression a la forme:

$$K_d = \frac{2.93 * P}{(273 + \theta)} \quad (\text{III. 4})$$

Ou

P : Pression en kPa

$\theta$ : Température en ° C.

$K_H$  : Facteur de correction relatif à l'humidité. Sa valeur est déduite des graphiques donnés en référence [46].

La bonne répétition des techniques de mesure utilisée dans ces travaux ont donné une erreur relative maximale égale à 5% de la valeur moyenne arithmétique.

### III. 3 Résultats de simulation et discussion

#### III. 3. 1 Résolution par la méthode d'éléments finis

Le modèle de barrière a été simulé dans un module AC/DC en utilisant un solveur de courant électrique quasi-statique, qui permet à l'utilisateur de spécifier la conductivité ainsi que la permittivité d'un matériau. En quasi-statique, les courants et les champs électromagnétiques varient lentement, ce qui est valable pour de nombreuses applications en haute tension, y compris les isolateurs extérieurs fonctionnant à des fréquences de 50 Hz. Le courant induit par les champs magnétiques B et les champs électriques E, le couplage est négligé dans le calcul. Cette approximation peut être représentée par une expression mathématique :

$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (\text{III. 5})$$

Les équations de bases utilisées pour calculer le potentiel et champ électrique sont soient les équations de Maxwell.

Le potentiel électrique crée par le champ électrique s'écrit :

$$\vec{E} = -\nabla \cdot V \quad (\text{III. 6})$$

En appliquant la divergence à la loi de Maxwell-Ampère :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = \vec{\nabla} \cdot \left[ \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right] \quad (\text{III. 7})$$

Où  $J$  et  $\partial D / \partial t$  représentent respectivement la densité de courant de conduction ( $J = E$ ) et la densité de courant de déplacement ( $D = \epsilon_r \epsilon_0 E$ ). Avec la loi de Gauss,  $\nabla \cdot D = \rho$  et l'équation de

continuité, le logiciel résout l'équation III. 7 en utilisant le domaine des pas de temps pour obtenir le potentiel électrique et les distributions de champ.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{III. 8})$$

Où  $\rho$  est la densité de charge,  $\varepsilon$  est la permittivité du matériau diélectrique ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ),  $\varepsilon_0$  la permittivité du vide ( $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ) et  $\varepsilon_r$  est la permittivité relative du matériau diélectrique. L'équation de Poisson peut être obtenue en substituant la relation III. 6 dans l'équation III. 8.

$$\nabla^2 \cdot V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{III. 9})$$

L'équation de Laplace peut être obtenue en faisant la charge d'espace  $\rho = 0$  ;

$$\nabla^2 \cdot V = 0 \quad (\text{III. 10})$$

Dans le domaine électrostatique, la conductivité électrique pour les zones isolantes  $\sigma = 0$  et pour des zones conductrices  $\sigma = \infty$ , donc la distribution du potentiel électrique dans le domaine électrostatique est obtenue de la résolution de l'équation de Laplace, où la charge électrique dans l'espace est nulle.

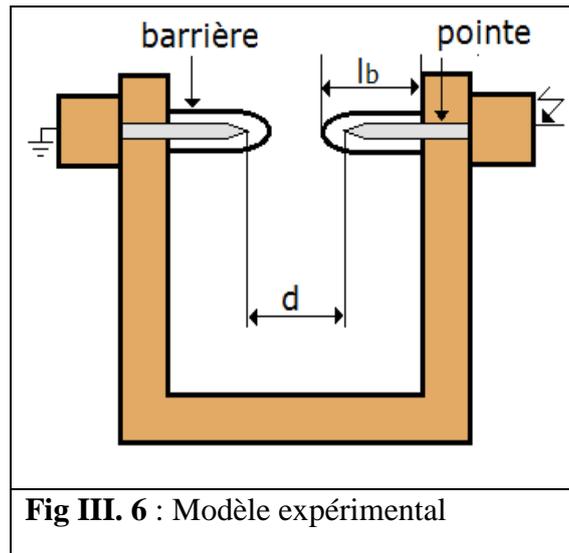
$$\nabla \cdot \varepsilon \cdot \nabla \cdot V = 0 \quad (\text{III. 11})$$

$$-\nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \nabla \cdot V) - \nabla \cdot (\delta \cdot \nabla \cdot V) = 0 \quad (\text{III. 12})$$

Dans notre étude on néglige la variation de la densité de charge d'espace.

### III.3.2 Présentation et propriété du model géométrique utilisé

Le modèle géométrique utilisé est basé sur le modèle expérimental (Fig. III. 6) La figure ( III. 6) représente les barrières utilisées comme le modèle de simulation, celui-ci est conçu sous la forme d'un tube en verre. Deux électrodes en bronze sont placées aux deux extrémités, deux tiges pointues, de manière à obtenir un champ E non uniforme dans l'air. La distance séparant les deux électrodes est prise égale à 5 ou 10 cm. Les propriétés physiques des matériaux utilisés dans ce modèle sont résumées dans le tableau ( III. 1).



**Tab. III. 1 :** Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le logiciel COMSOL

Matériaux	Permittivité relative	Conductivité électrique
Air	1	$10^{-9} S/m$
Verre	4.2	$10^{-14} S/m$
Silicon	2.8	$10^{-12} S/m$
Bronze (la tige)	1	$5.9^7 S/m$
La solution polluante	$\ll$	3 S/m

### III. 4 Simulation et discussion de la configuration pointe-pointe avec une barrière de 10cm

Dans toute l'étude, les lignes de courant sont en couleur noire, le champ électrique E en bleu et la couleur du potentiel V varie dans le domaine visible (le rouge vers le bleu) dépendamment de l'intensité du champ de chaque point de l'espace d'air.

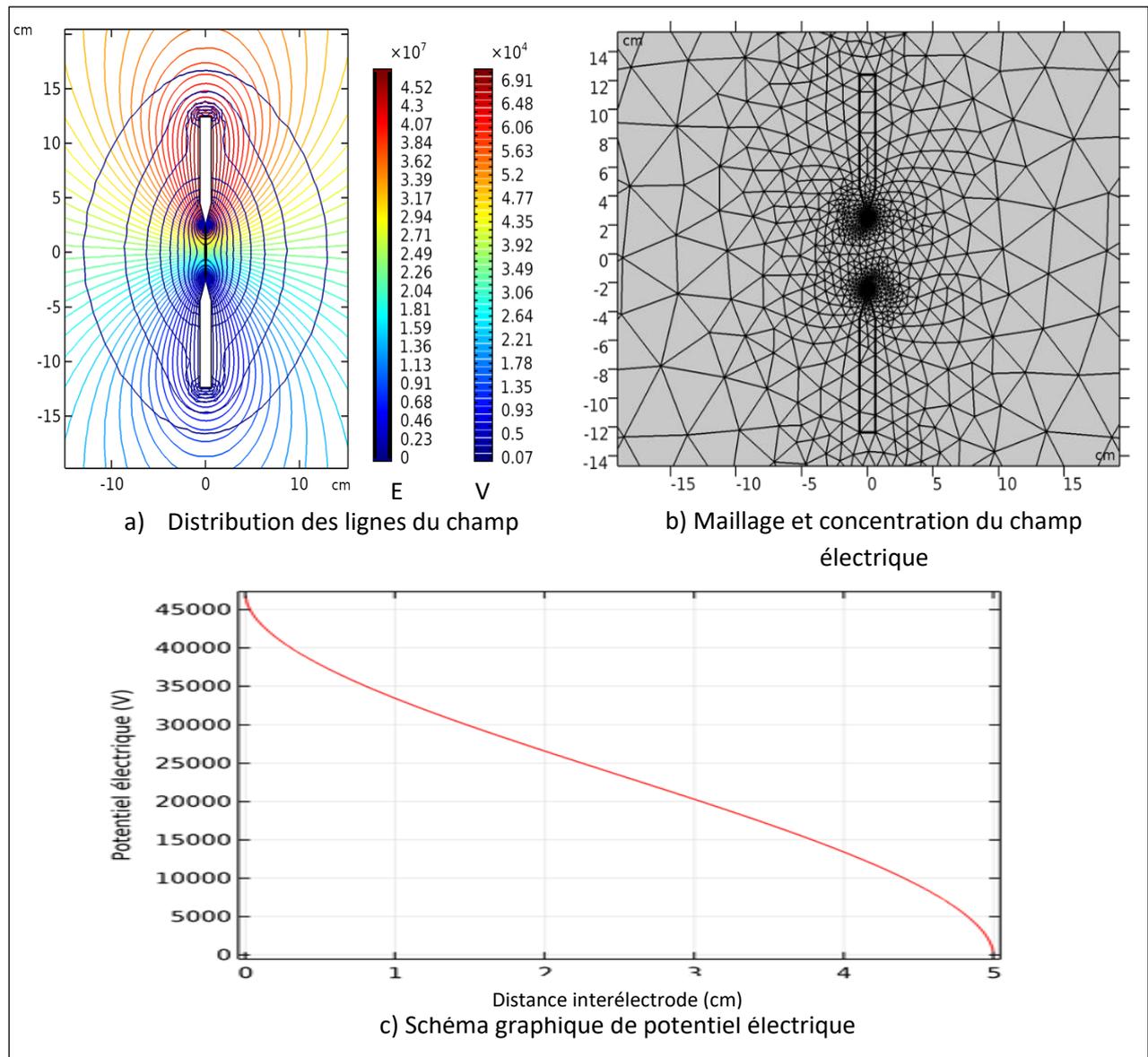
#### III.4.1 Configuration pointe-pointe sans barrière

Les figures suivantes représentent le champ électrique (Fig. III. 7a et III. 8a), le maillage (Fig. III. 7b et III. 8b) et le potentiel électrique (Fig. III. 7c et III. 8c) dans la configuration pointe – pointe sans barrière avec la distance inter électrodes de 5et 10 cm.

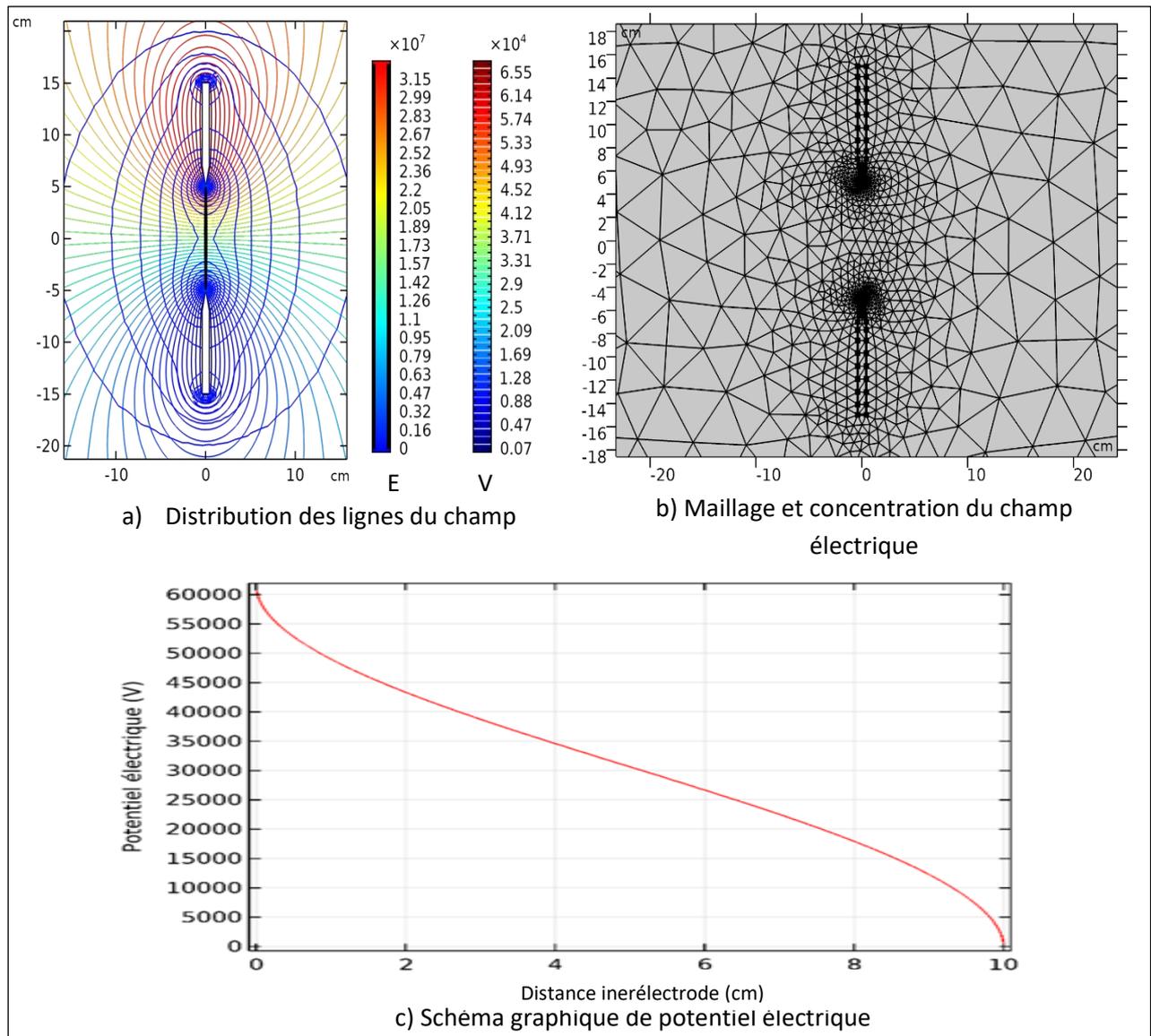
Nous remarquons que les lignes de champ dans ce système suivent un chemin direct allant de l'électrode haute tension vers la pointe mise à la terre (Fig. III. 7a et III. 8a). Ceci est confirmé pratiquement par le chemin de la décharge qui part également de l'extrémité de la pointe vers

l'autre pointe. Par conséquent, nous remarquons aussi que la concentration du champ est très forte entre l'extrémité de la pointe haute tension et la pointe mise à la terre, ce qui est clair dans le maillage qui est très intense aux extrémités des deux pointes (Fig. III. 7b et III. 8b).

Une valeur maximale du potentiel électrique est atteinte au niveau de l'électrode mise sous tension. Celle diminue le long de la distance interélectrode jusqu'à l'obtention d'une valeur nulle au niveau de l'électrode mise à la terre (Fig. III. 7c et III. 8c).



**Fig. III. 7 :** Représentation de potentiel électrique V, champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe – pointe sans barrière (d = 05 cm)

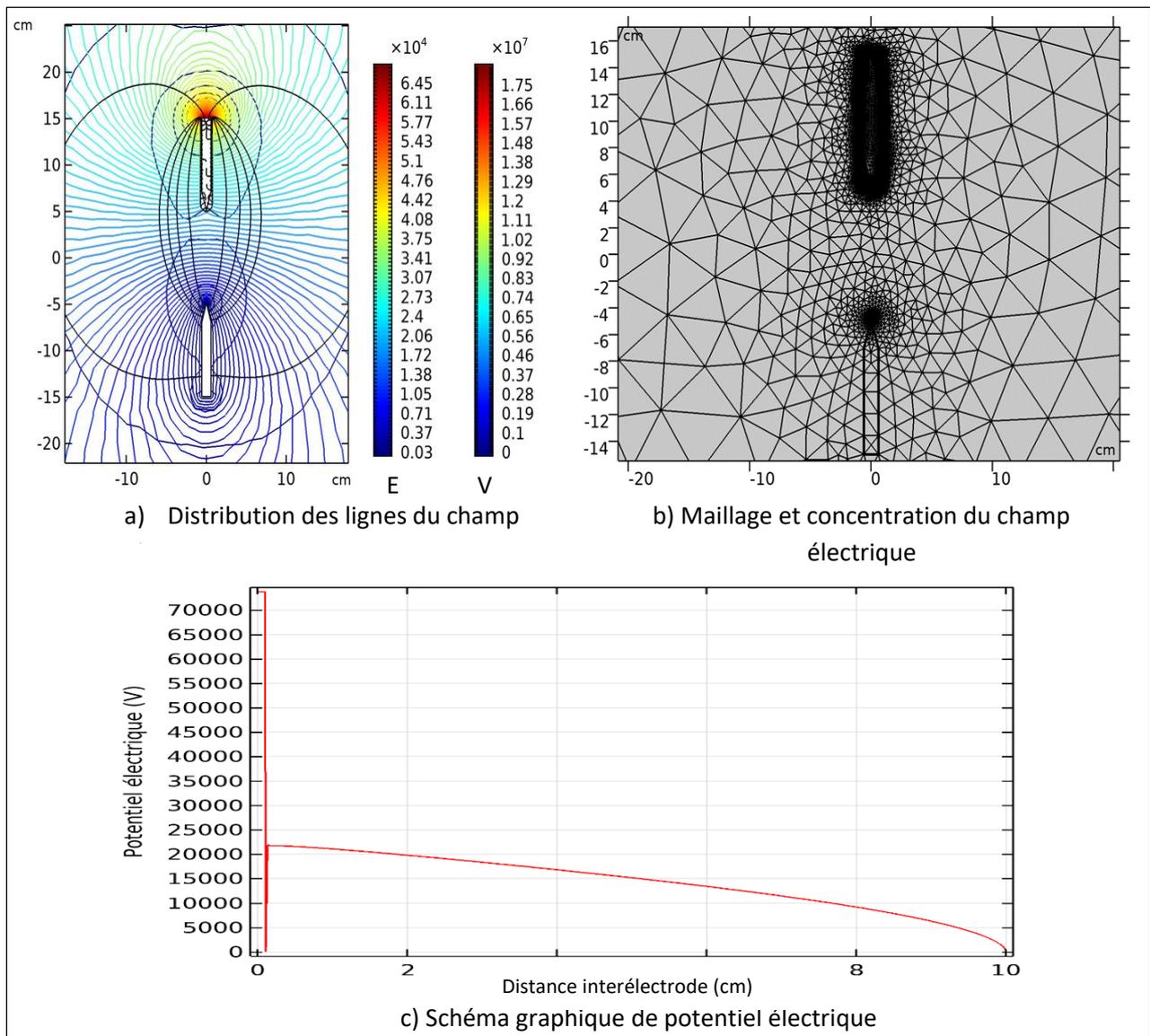


**Fig. III.8** : Représentation de potentiel électrique V, champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration point –pointe sans barrière ( $d = 10$  cm)

#### III.4.2 Configuration pointe-pointe avec une barrière tubulaire propre ( $l_t=10$ cm)

Les figures ci-dessous illustrent le champ électrique, le maillage et le potentiel électrique dans le système étudié. Dans une atmosphère propre et sèche, nous avons observé que les lignes de champ s'éloignent de la barrière et progressent vers l'autre pointe dans le cas d'une seule barrière (Figs. III. 9a et III. 10a). Ces lignes de champ sortent de l'extrémité ouverte du tube en verre et se propagent de manière non uniforme vers la pointe de l'électrode mise à la terre. Dans le maillage, nous avons constaté une intensité élevée du champ dans les alentours du tube et à l'extrémité pointue de l'électrode (Figs. III. 9b et III. 10b). Ce phénomène se reproduit quel que soit la distance entre électrodes. Le du potentiel électrique au niveau de l'extrémité ronde de la barrière est nul ce

qui explique l'effet de l'isolation de la pointe sous HT, il reprend sa valeur maximale en s'éloignant de celle-ci et elle diminue en fonction de la distance interélectrode jusqu'à avoir un potentiel nul au niveau de l'électrode terre (Fig. III. 10c).



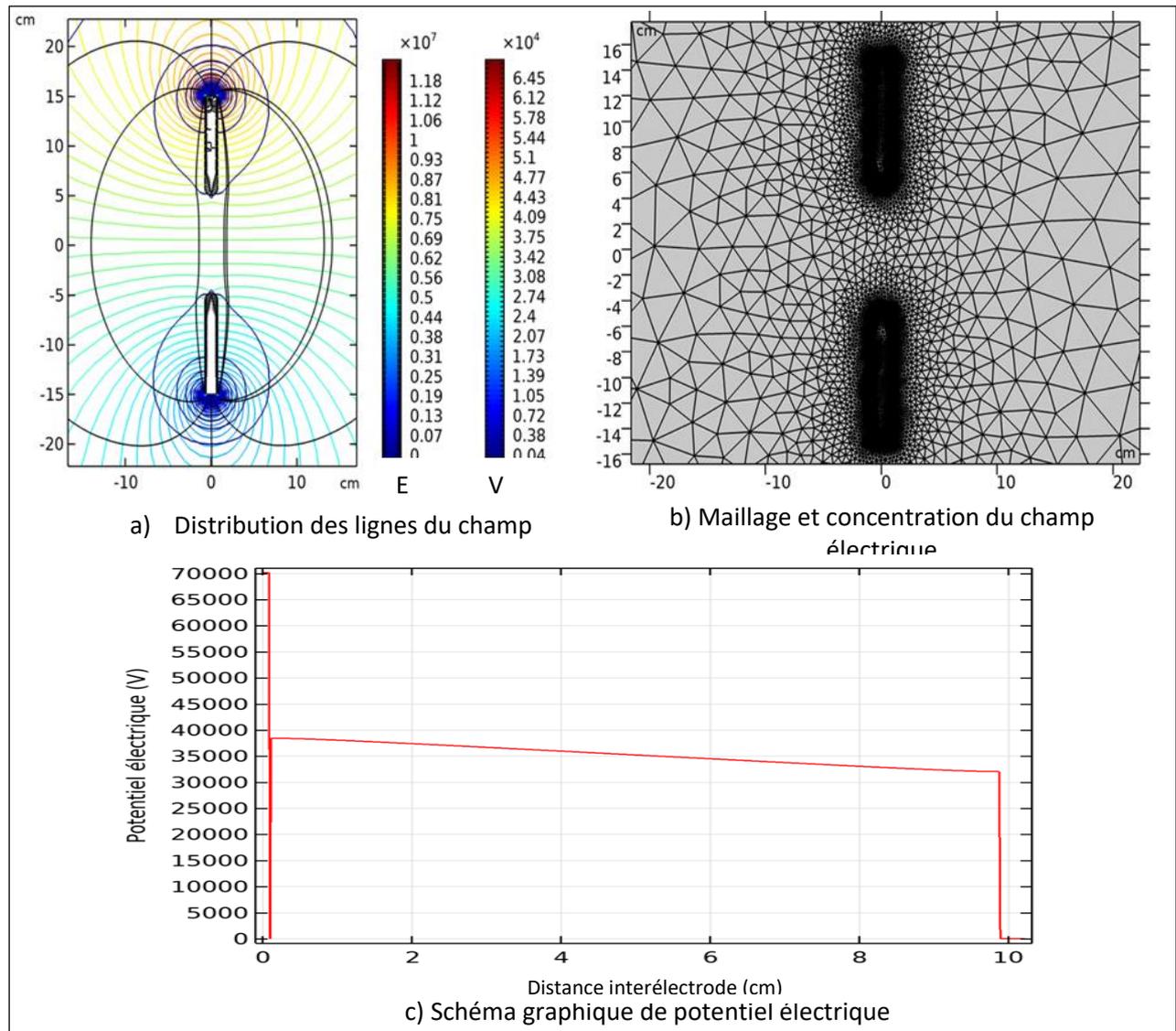
**Fig. III. 9** : Représentation de potentiel électrique V, champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe –pointe avec une seule barrière propre (d = 10 cm)

### III.4.3 Configuration pointe-pointe avec deux barrières tubulaires propres (lt=10cm)

Dans une atmosphère propre et sèche, nous avons observé que les lignes de champ s'éloignent de la barrière et progressent vers l'autre tube, vu son état de surface qui est propre et sèche (Fig. III. 10a). Ces lignes de champ sortent de l'extrémité ouverte du tube en verre et se propagent de manière non uniforme vers l'extrémité ouverte du tube de la pointe de l'électrode

mise à la terre. Comme il est évident dans le maillage, que l'intensité élevée du champ est concentrée dans les alentours des tubes (Fig. III. 10b).

Une protection du système est très claire vu l'obtention des potentiels nuls au niveau de l'extrémité des barrières tubulaires et une variation très claire entre les deux qui est en fonction de la distance interélectrode (Fig. III. 10c).



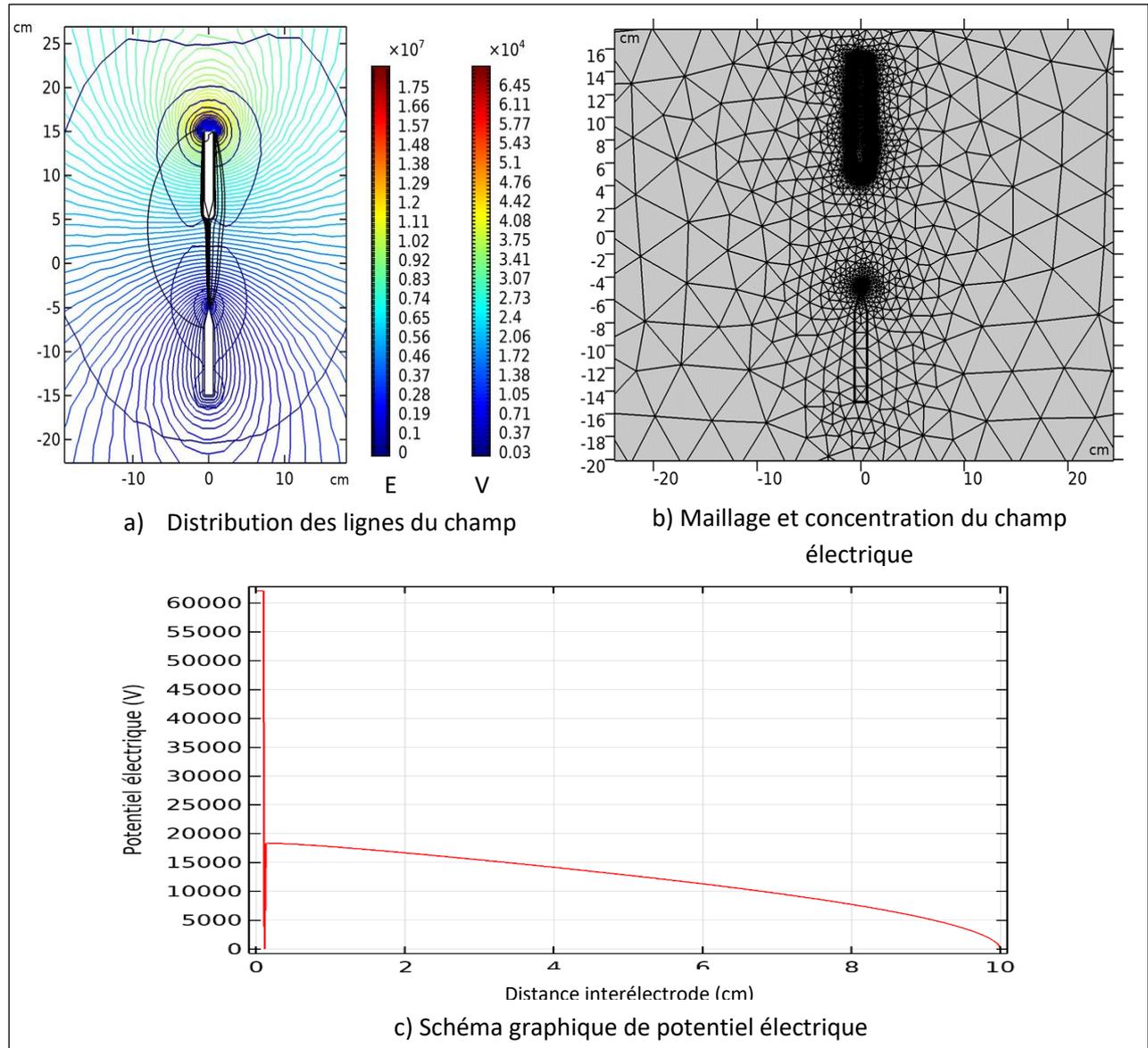
**Fig. III. 10 :** Représentation de potentiel électrique V, champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe-pointe avec deux barrières tubulaires propres ( $d = 10$  cm)

#### III.4.4 Configuration pointe-pointe avec une barrière tubulaire polluée ( $l_t=10$ cm)

Une couche de pollution ( $\sigma_v = 30$  mS/cm) a été appliquée sur la surface du tube. Les lignes du courant électrique se collent sur cette dernière parcequ'elle se comporte comme un matériau conducteur puis elles se propage de l'extrémité fermée du tube recouvrant la pointe sous tension vers la pointe de l'électrode mise à la terre (Fig. III. 11a). Par conséquent, il est clair dans le

maillage que le champ électrique est très intense sur la surface de tube pollué et concentre aussi à la pointe de l'électrode mise à la terre ce qui explique l'effet de pointe (Fig. III. 11b).

Une valeur de tension très petite a été appliquée pour ce système vu la non-performance de celui-ci pointe (Fig. III. 11c).



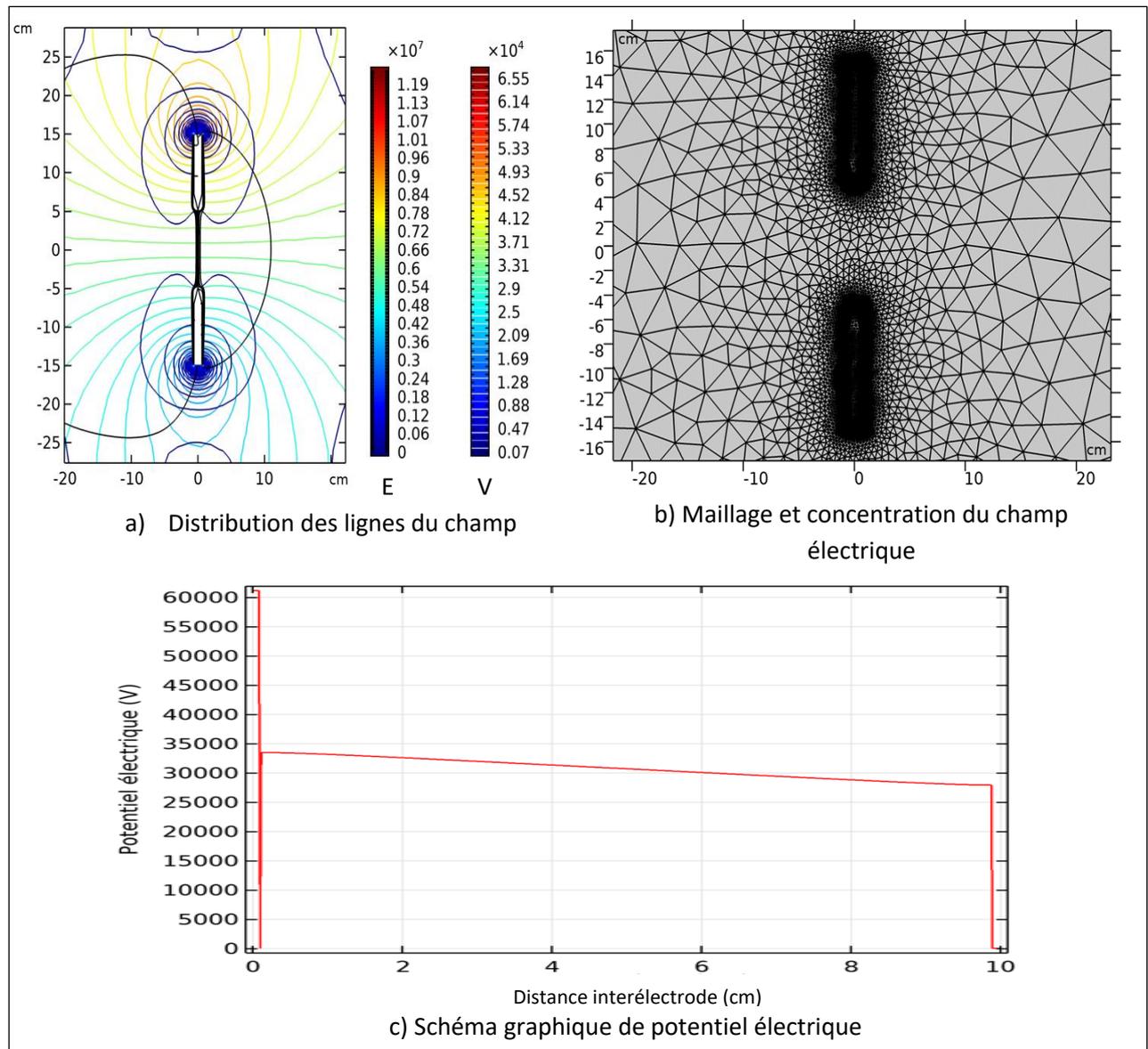
**Fig. III. 11 :** Représentation de potentiel électrique V, champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe –pointe avec une seule barrière polluée ( $d = 10$  cm)

### III. 4. 5 Configuration pointe-pointe avec deux barrières tubulaires polluées ( $l_t=10$ cm)

Une concentration claire des lignes de courant entre les de extrémités des tubes pollués (Fig. III. 12a). Ce qui explique le passage de la décharge électrique dans ce chemin dans le cas pratique.

Une énorme intensité du champ électrique est obtenue au niveau des surfaces des tubes, vu leur état de surface conducteur (Fig. III. 12b).

Les mêmes phénomènes se reproduisent quel que soit la distance interélectrode.



**Fig. III. 12 :** Représentation de potentiel électrique V, champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe –pointe avec deux barrières polluées ( $d = 10$  cm)

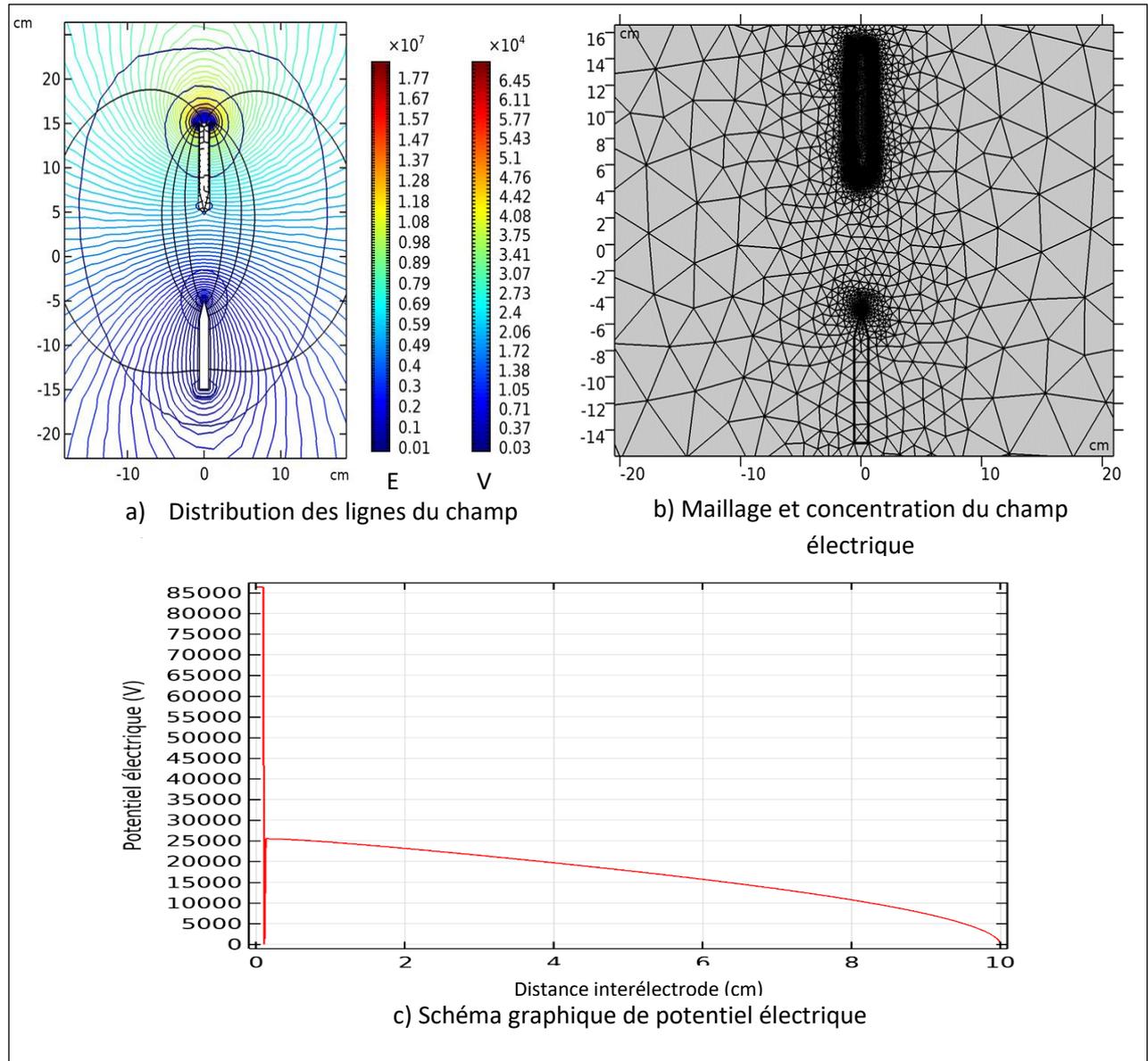
#### III.4.6 Configuration pointe-pointe avec une barrière tubulaire superhydrophobe ( $l_t=10$ cm)

On observe dans les différentes figures suivantes, que la présence du tube superhydrophobe a un effet significatif sur le chemin des lignes de courant.

Celles-ci sont très éloignées de la surface de tube superhydrophobe. Ceci est confirmé par le chemin de la décharge électrique de rupture du système, qui ne sort jamais de la pointe de la tige

sous tension. Elle émane toujours d'un point de la tige conductrice se trouvant à l'extrémité ouverte du tube et se propage dans l'air (Fig. III. 13a).

L'utilisation d'une couche superhydrophobe sur les barrières peut avoir plusieurs effets bénéfiques sur la résistance diélectrique du système, ce qui est montré par le maillage de ce système (Fig. III. 13b).

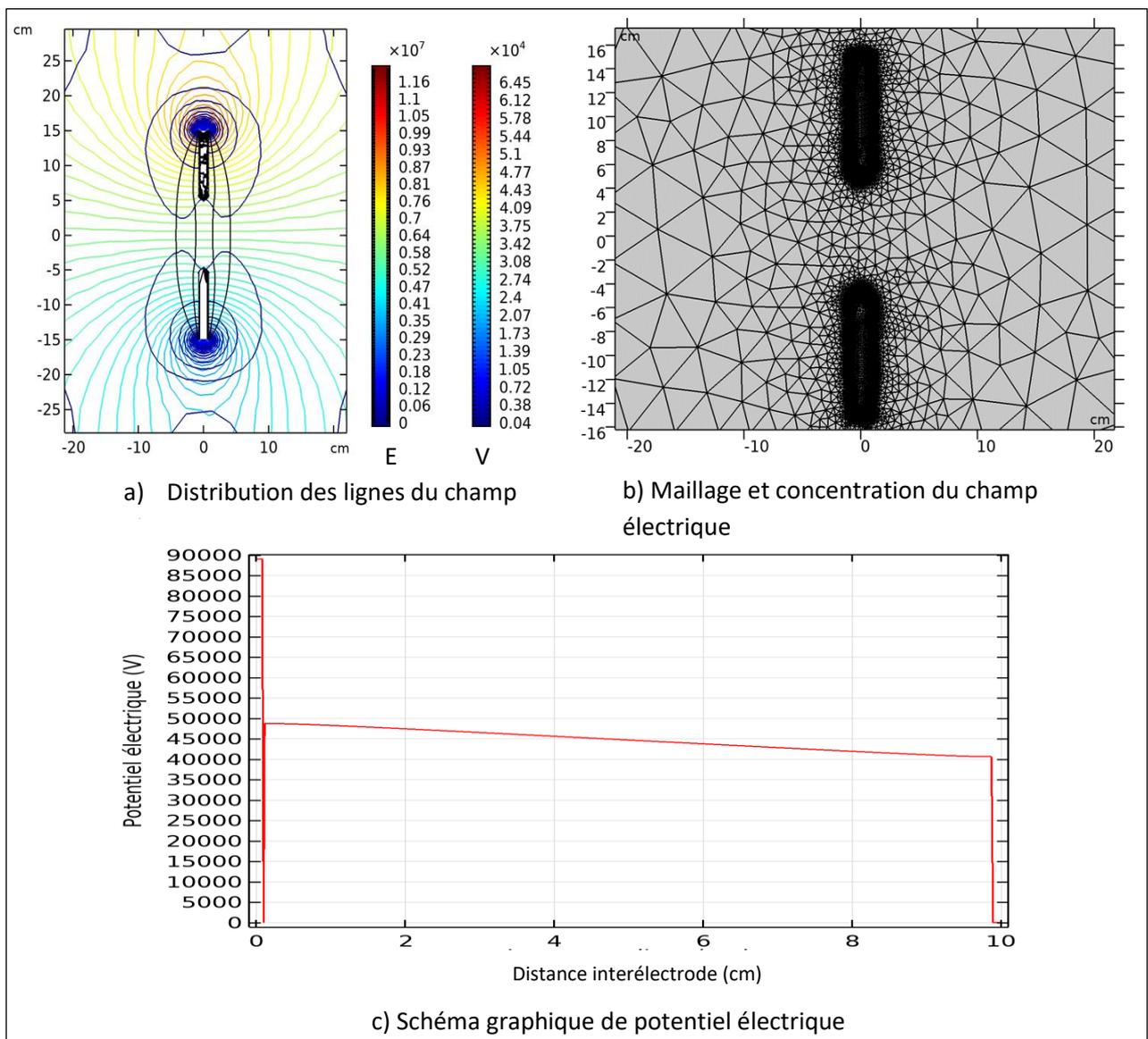


**Fig. III. 13 :** Représentation de potentiel électrique V ,champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe –pointe avec une seule barrière superhydrophobe (d = 10 cm)

### III.4.7 Configuration pointe-pointe avec deux barrières tubulaires superhydrophobes (lt=10cm)

Les simulations suivantes représentent les différents cas où deux barrières superhydrophobes sont utilisées à différentes distances. Dans ces cas, on observe que le champ électrique émerge de

l'extrémité du tube sous haute tension et pénètre dans l'extrémité du tube mise à la terre (Fig. III. 14a). De plus, dans le maillage, on remarque une concentration du champ électrique autour des tubes (Fig. III. 14b). Ces observations sont similaires à ce que l'on observe dans le cas des tubes propres. Cependant, les résultats que nous avons obtenus mettent en évidence les avantages de l'utilisation de barrières superhydrophobes dans les configurations pointe-pointe à haute tension. Ils confirment que ces barrières offrent une meilleure résistance diélectrique et une plus grande capacité à résister aux décharges électriques par rapport à d'autres types de barrières utilisées dans nos essais.



**Fig. III. 14 :** Représentation de potentiel électrique V, champ électrique E et les lignes de courant, le maillage et le graph de potentiel électrique dans la configuration pointe –pointe avec deux barrières superhydrophobes ( $d = 10$  cm)

### III.6 Résultats graphiques des essais

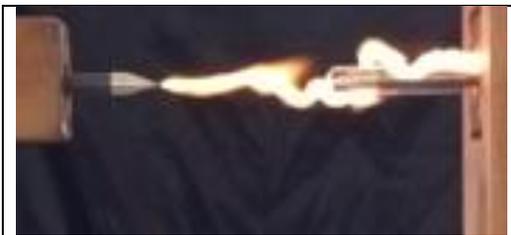
Des essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de haute tension. Les résultats de notre étude sont représentés dans la suite de ce manuscrit.

#### III. 6. 1 Une barrière tubulaire propre et polluée

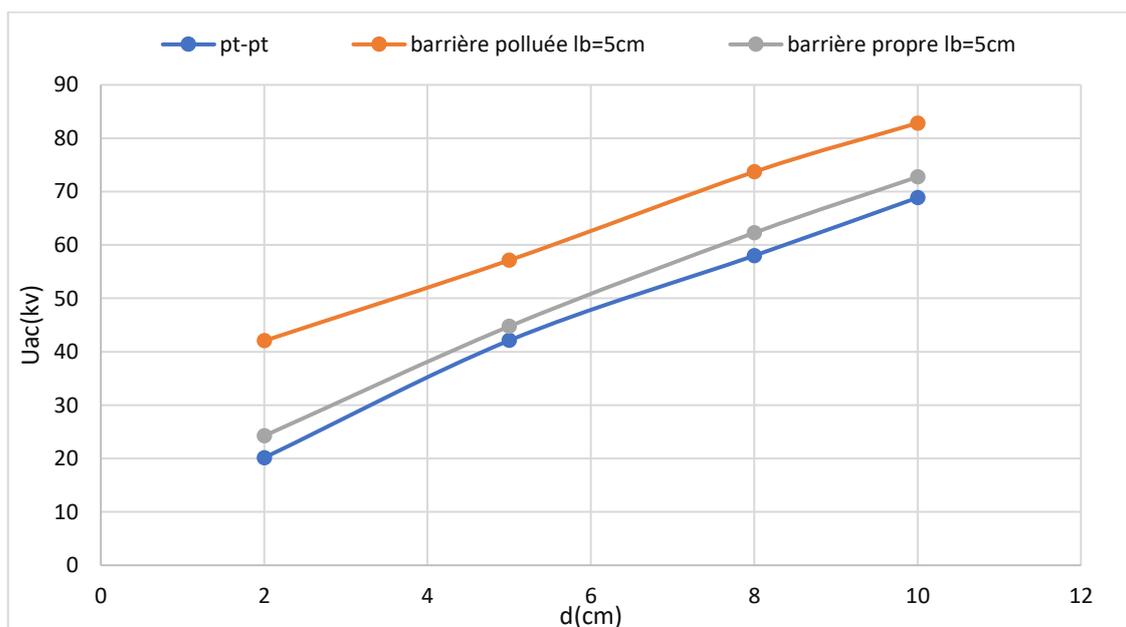
Les figures suivantes donnent l'allure de la tension de disruption de l'espace d'air du système avec barrière tubulaire en verre, de longueur égale à 5 cm et 10 cm, en fonction de la distance interélectrode sous atmosphère propre et polluée. Il en découle un écart considérable entre les tensions disruptives de l'intervalle d'air du système avec ou sans barrière.

##### III.6.1. 1 Longueur de tube ( $l_b = 5 \text{ cm}$ )

###### ➤ Une barrière recouvrant l'électrode Haute Tension



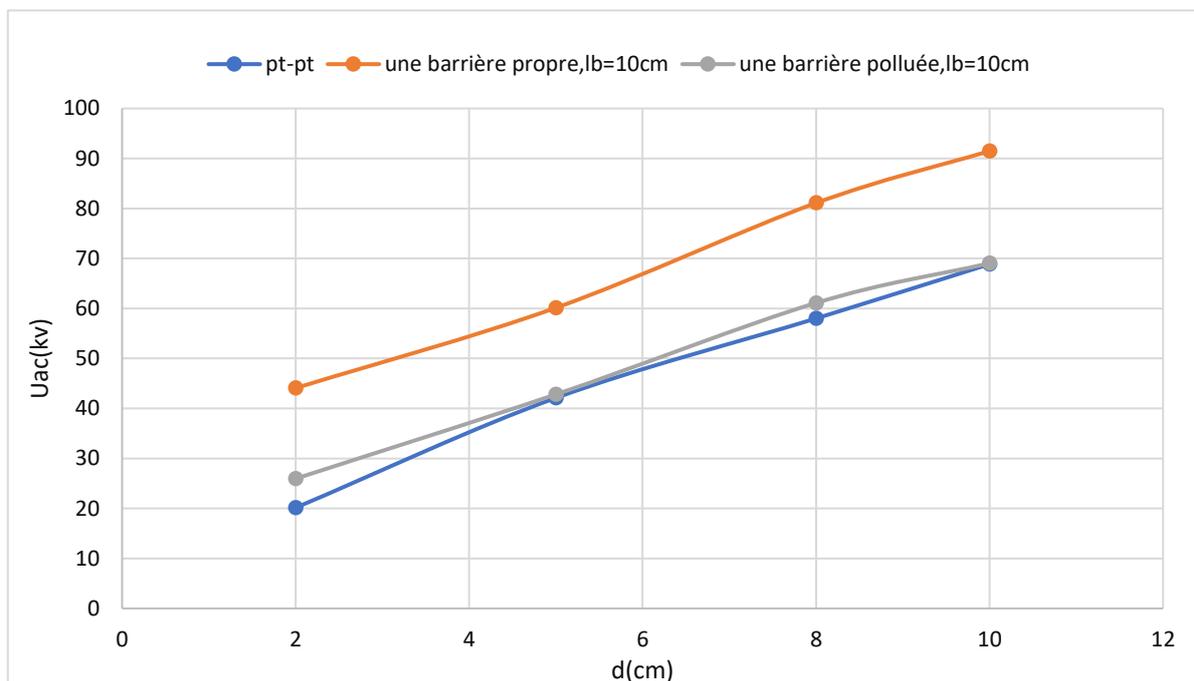
**Fig. III.15 :** Système pointe - pointe avec une barrière propre ( $l_b=5\text{cm}$ )



**Fig. III. 16 :**  $\hat{U}_{ac} = f(d)$  d'un système pointe - pointe avec barrière sous atmosphère Polluée et propre

III. 6. 1. 2 Longueur de tube ( $l_b = 10 \text{ cm}$ )

**Fig. III. 17 :** Système pointe - pointe avec une barrière polluée ( $l_b = 10 \text{ cm}$ )



**Fig. III. 18 :**  $\hat{U}_{ac} = f(d)$  d'un système pointe - pointe avec barrières sous atmosphère Polluée et propre

Dans le cadre de ce système pointe-pointe, les deux dernières figures présentent les essais de claquage des barrières propres et polluées. Nous avons observé, à partir des graphiques basés sur les essais, que la tension disruptive diminue lorsque les barrières sont polluées, tandis qu'elle augmente lorsque les barrières sont propres. En conséquence, nous pouvons conclure que l'amélioration de l'isolation est réalisée par l'amélioration de la propreté des matériaux. Cela suggère que la présence de contaminants ou de pollution sur les barrières peut réduire leur efficacité en tant qu'isolants électriques. Lorsque les barrières sont propres, elles sont capables de mieux isoler les électrodes et de résister à des tensions plus élevées sans claquage. Par conséquent, il est crucial de maintenir les barrières propres et de prévenir l'accumulation de contaminants afin

de garantir une isolation optimale et un fonctionnement sûr du système à haute tension. Et on constate que la pollution du côté de la pointe réduit considérablement la qualité de l'isolation de la barrière.

Il découle que la tension de disruption du système étudié croît avec l'élévation de la distance interélectrode et sa performance électrique augmente en fonction de la longueur de la barrière tubulaire quelle que soit la taille de l'intervalle considéré. Ceci est lié d'une part à l'allongement du canal de la décharge électrique de rupture du système pointe - pointe généré par le contournement de la barrière tubulaire. D'autre part, la longueur de ce chemin de glissement de la décharge électrique sur la longueur de la barrière tubulaire croît avec sa longueur indépendamment de la distance interélectrode.

### III. 6. 2 Deux barrières tubulaires propres et polluées

#### III. 6. 2. 1 Longueur de tube ( $l_b = 5\text{ cm}$ )

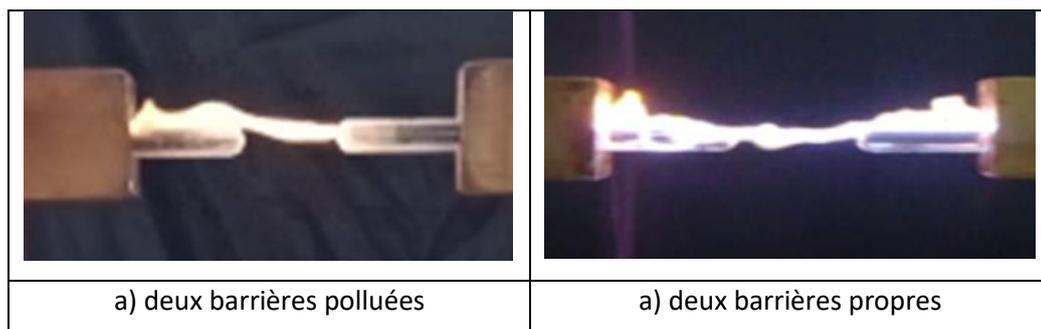


Fig. III. 19 : Système pointe - pointe avec deux barrières ( $l_b=5\text{ cm}$ )

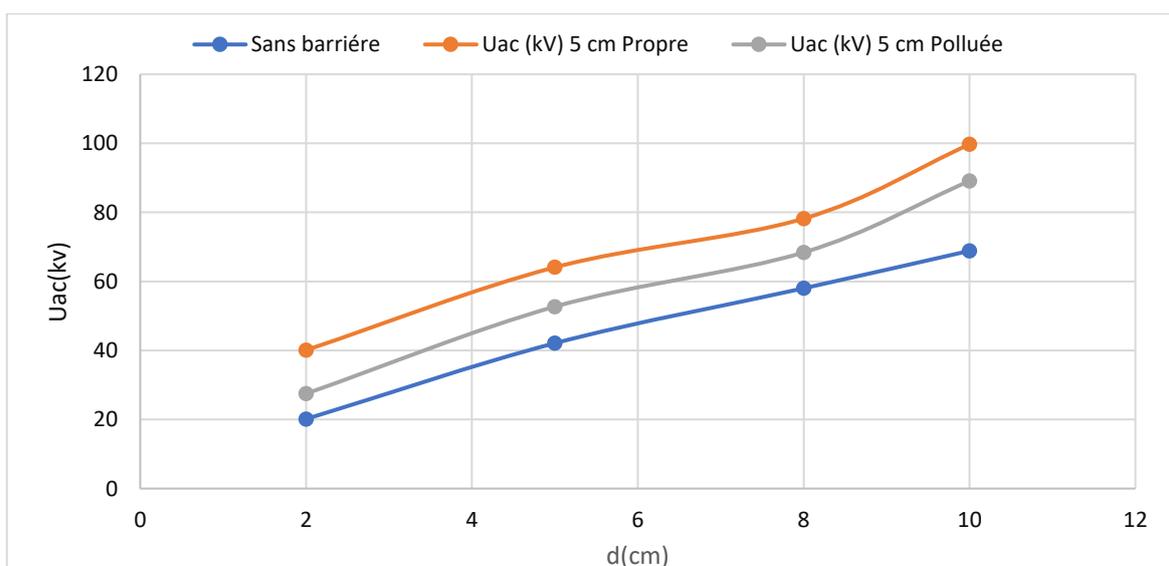
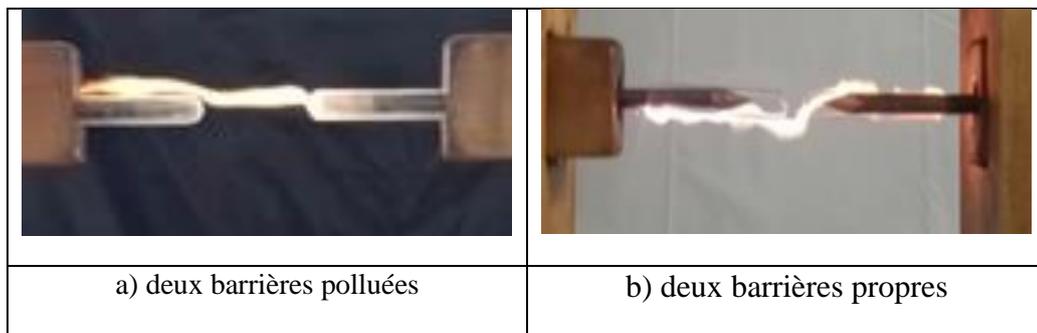


Fig. III. 20 :  $\hat{U}_{ACmax} = f(l_b)$  d'un système pointe - pointe avec deux barrières sous atmosphère Polluée et propre

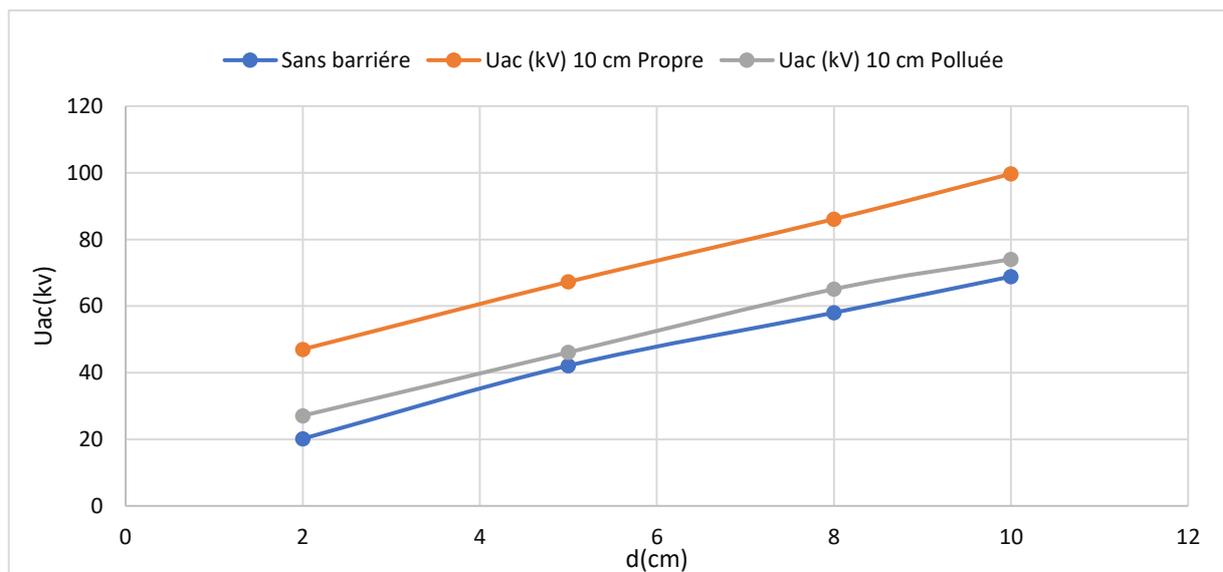
L'utilisation de deux barrières propres sur les deux électrodes entraîne une augmentation de la tension disruptive par rapport aux barrières polluées ou à une seule barrière. Cela démontre une amélioration significative de l'isolation lorsqu'on utilise deux barrières. Cette observation souligne les avantages de l'utilisation de deux barrières propres pour renforcer l'isolation électrique. En ajoutant une deuxième barrière, le risque de contamination ou de présence de particules indésirables est considérablement réduit, ce qui se traduit par une performance isolante améliorée.

Et on constate que La résistance diélectrique d'un système avec deux barrières propres et sèches en contact avec les électrodes est d'environ une fois et demi celle du même système avec une seule barrière dans les mêmes conditions. Dans ce cas, la rupture de l'espace d'air est régie par des décharges dans l'intervalle d'air entre les deux barrières suivant des streamers positifs et négatifs se propageant sur les faces respectives des deux barrières face aux électrodes.

### III. 6. 2. 2 Longueur de tube ( $l_b = 10 \text{ cm}$ )



**Fig. III. 21 :** Système pointe - pointe avec deux barrière ( $l_b=10\text{cm}$ )



**Fig. III. 22 :**  $\hat{U}_{ac} = f(d)$  d'un système pointe - pointe avec deux barrières sous atmosphère Polluée et propre

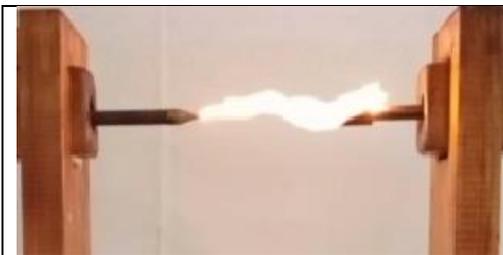
Lorsque deux barrières propres sont utilisées de 10 cm sur les deux électrodes, une augmentation de la tension disruptive est observée par rapport aux barrières polluées qu'elles soient de 10 cm ou 5 cm, ainsi qu'à une seule barrière de 10cm ou 5cm, ce qui démontre une amélioration accrue de l'isolation lorsqu'on utilise deux barrières.

Cette observation met en évidence l'effet bénéfique de l'utilisation de deux barrières propres dans le renforcement de l'isolation électrique. On peut observer que lorsque la distance entre les deux électrodes est augmentée, la tension de claquage augmente également. En ajoutant une deuxième barrière, les chances de contamination ou de présence de particules indésirables sont réduites de manière significative, ce qui contribue à une meilleure performance isolante.

L'augmentation est justifiée par la tension de contournement de la barrière recouvrant l'électrode mise à la terre s'ajoutant ainsi à la tension disruptive de l'intervalle d'air compris entre les deux extrémités formées par les deux barrières tubulaires, en plus bien sûr de la tension de contournement de la barrière enveloppant la pointe HT.

### III. 6. 3 Une ou deux barrières tubulaires superhydrophobes

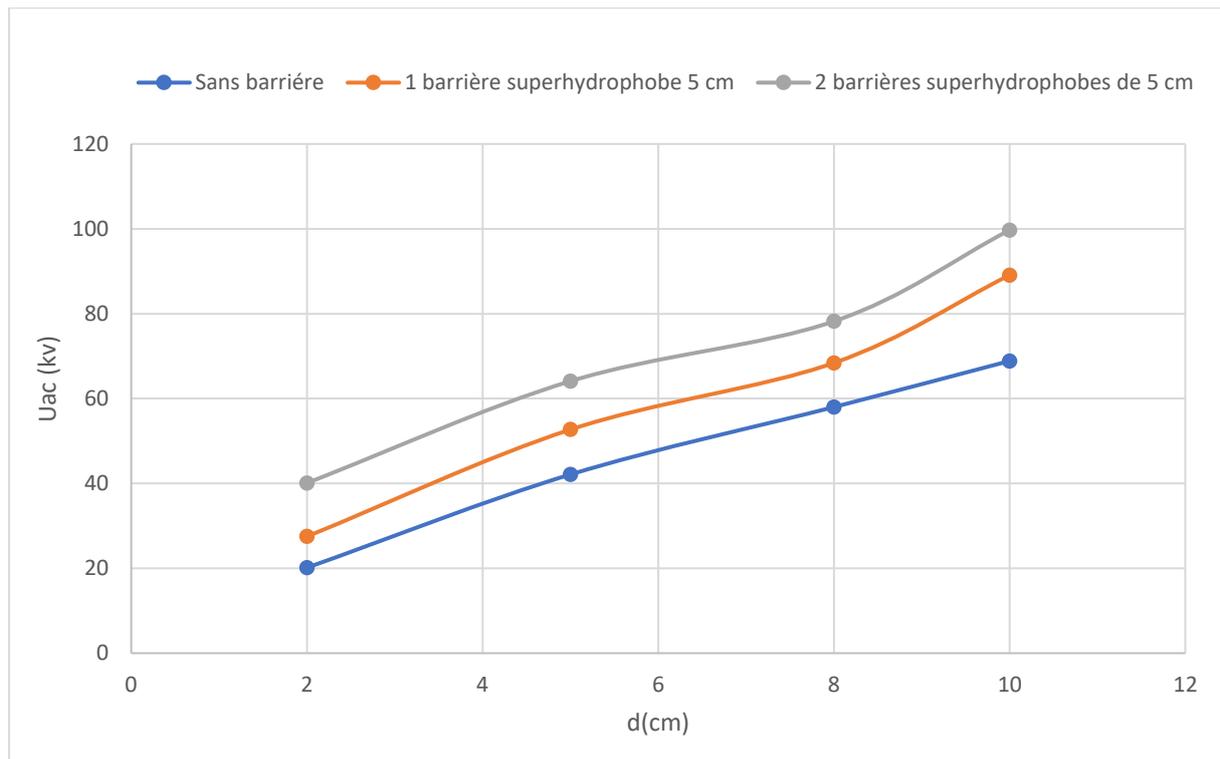
#### III. 6. 3. 1 Longueur de tube ( $l_b = 5\text{ cm}$ )



**Fig. III. 23** : Système pointe - pointe avec une barrière superhydrophobe ( $l_b=5\text{cm}$ )



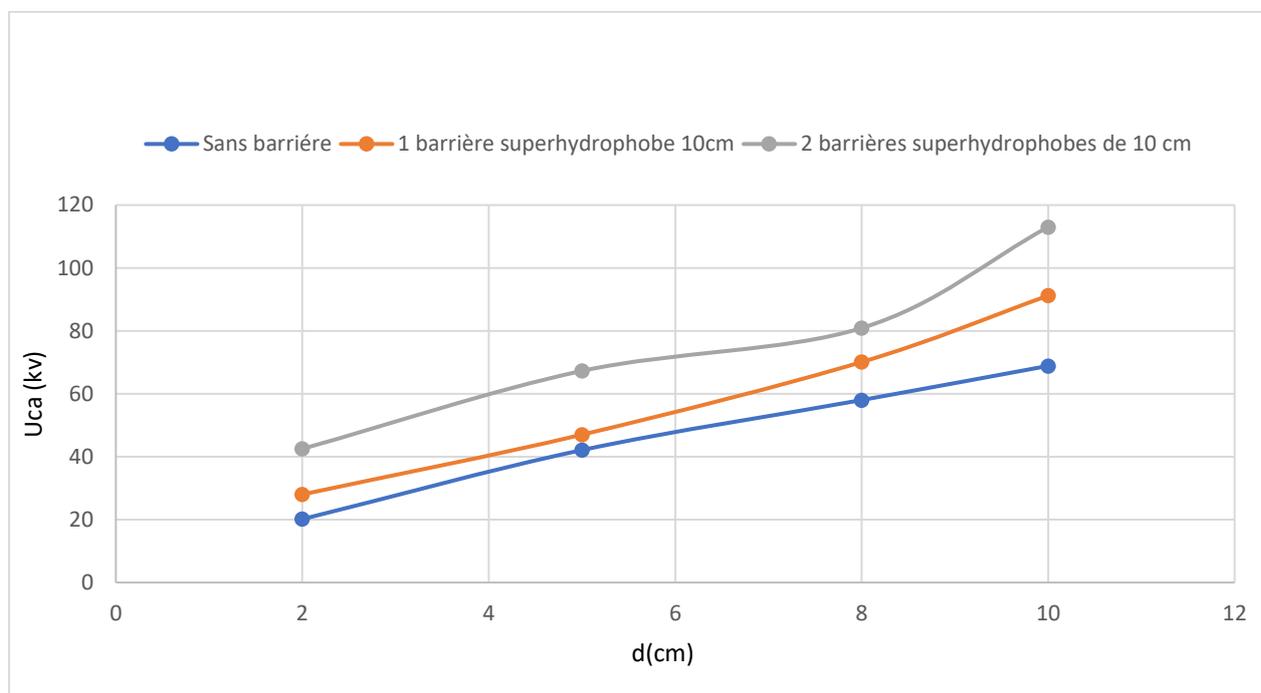
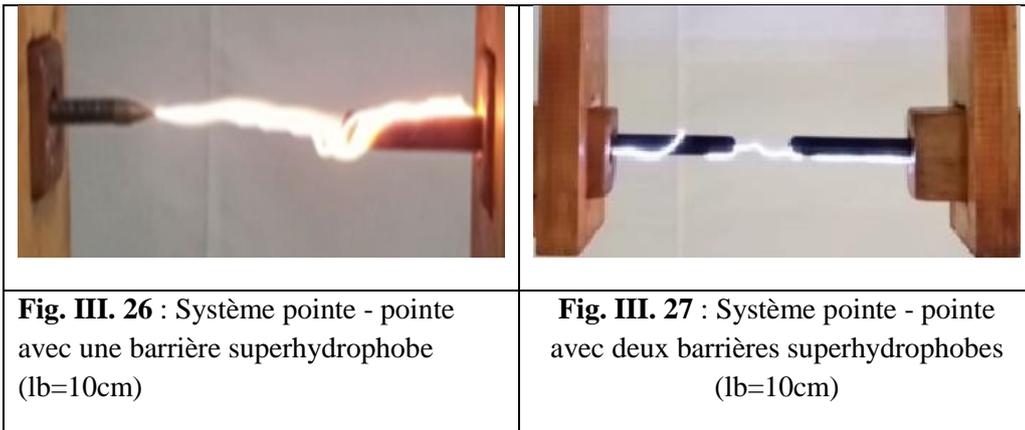
**Fig. III. 24** : Système pointe - pointe avec deux barrières superhydrophobes ( $l_b=5\text{cm}$ )



**Fig. III. 25 :**  $\hat{U}_{ac} = f(d)$  d'un système pointe - pointe avec une ou deux barrières superhydrophobes ( $l_b=5\text{cm}$ ).

On remarque dans cette figure que Lorsque deux barrières superhydrophobes sont utilisées de 5 cm sur les deux électrodes, une augmentation de la tension disruptive est observée par rapport à une barrière superhydrophobe de 5 cm, ce qui démontre une amélioration accrue de l'isolation lorsqu'on utilise deux barrières.

Cette observation met en évidence l'effet bénéfique de l'utilisation de deux barrières superhydrophobes dans le renforcement de l'isolation électrique. On peut observer que lorsque la distance entre les deux électrodes est augmentée, la tension de claquage augmente également. En ajoutant une deuxième barrière, les chances de contamination ou de présence de particules indésirables sont réduites de manière significative, ce qui contribue à une meilleure performance isolante.

III. 6. 3. 2 Longueur de tube ( $l_b = 10$  cm)

**Fig. III. 28 :**  $\hat{U}_{ac} = f(d)$  d'un système pointe - pointe avec une ou deux barrières superhydrophobes ( $l_b=10$  cm).

L'utilisation de deux barrières superhydrophobes sur les deux électrodes entraîne une augmentation de la tension disruptive par rapport à une seule barrières. Cela démontre une amélioration significative de l'isolation lorsqu'on utilise deux barrières. Cette observation souligne les avantages de l'utilisation de deux barrières propres pour renforcer l'isolation électrique. En ajoutant une deuxième barrière, le risque de contamination ou de présence de particules indésirables est considérablement réduit, ce qui se traduit par une performance isolante améliorée.

Et on constate que La résistance diélectrique d'un système avec deux barrières superhydrophobes en contact avec les électrodes est d'environ une fois et demi celle du même

---

système avec une seule barrière dans les mêmes conditions. Dans ce cas, la rupture de l'espace d'air est régie par des décharges dans l'intervalle d'air entre les deux barrières suivant des streamers positifs et négatifs se propageant sur les faces respectives des deux barrières face aux électrodes.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé un outil de calcul basé sur la méthode des éléments finis (logiciel COMSOL) pour décrire la distribution des lignes de champ dans un système non uniforme protégé par des barrières tubulaires propres, polluées et superhydrophobes de différentes distance interélectrode dans une atmosphère quelconque et mises sous tension alternative ensuite les confirmé avec les résultats pratiques. Les résultats essentiels issus de cette étude sont résumés comme suit :

- Sous atmosphère propre et sèche, la tension disruptive de l'intervalle d'air du système avec barrière tubulaire croît avec l'élévation de la distance interélectrode et avec le nombre de barrières utilisées, et les lignes de champs s'éloignent de la barrière et progressent vers la pointe, et dans le cas de deux barrières les lignes de champ s'éloignent vers l'intérieur de l'autre tube, cette performance électrique est obtenue à partir de l'allongement du chemin de disruption du système, dû à l'écartement assez important de la décharge de contournement de sa surface.
- Sous conditions très sévères de pollution, les lignes de champ collent sur la surface de la barrière dans les deux cas (une et deux barrières). Ceci est dû au chemin de contournement de la décharge de la barrière polluée reliant les différentes gouttes très conductrices se trouvant le long de la longueur du tube.
- La performance électrique de la barrière tubulaire superhydrophobe sous atmosphère quelconque, est supérieure à toutes les barrières de déférente formes et matières étudiées précédemment. Par conséquent, techniquement et économiquement, il est très souhaitable de remplacer la barrière plane hydrophile par une barrière tubulaire superhydrophobe.

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

L'objectif principal de notre étude expérimentale est la recherche de l'équivalence de système pointe-pointe protégé par une ou deux barrières tubulaires en verre et barrières tubulaires superhydrophobes mises en contact avec les deux pointes sous tension et à la terre dans un système métalliques sous conditions de propretés et de pollution très sévères sous une tension alternative 50 Hz.

Les résultats de recherche bibliographique sur les barrières tubulaire propres, polluées et superhydrophobe, on fait ressortir de cette étude que malgré leur fort pouvoir d'isolement, l'application de ces dernières est encore à l'état embryonnaire bien que, sur la base de leur profil très adéquat, ils offrent une très grande opportunité à l'exploitation de cet avantage dans le domaine de l'énergie électrique.

La combinaison des expériences obtenues à partir de l'étude de la tension disruptive d'un système pointe – pointe en fonction de la distance inter électrodes, nous permet de caractériser la capacité d'isolement du système dans n'importe quelle atmosphère, en quantifiant la tension de contournement de la barrière.

Dans une atmosphère propre et sèche, les lignes de champs s'éloignent de la barrière et progressent vers l'autre pointe pour le cas d'une seule barrière, et pour le cas de deux barrières tubulaires Ces dernières sortent de l'extrémité ouverte de tube en verre et se propagent d'une façon non uniforme vers l'extrémité ouverte de tube sur l'électrode mise à la terre, le même phénomène se reproduit quel que soit la distance interélectrode. La tension de claquage de l'intervalle d'air du système avec barrière tubulaire dans ces deux cas, augmente avec l'élévation de la distance inter électrode et avec la longueur de tube. Cette performance électrique est obtenue à partir de l'allongement du chemin de disruption du système, dû à l'écartement assez important de la décharge de contournement de sa surface.

Dans des conditions de pollution très sévères, les lignes de champ adhèrent à la surface de la barrière. Ceci est dû au fait que le chemin de contournement de décharge de la barrière polluée relie diverses gouttelettes hautement conductrices le long de la longueur du tube. Ainsi, même en cas de pollution sévère, il peut maintenir la résistance et assurer une bonne protection du système.

Dans un intervalle d'air quelconque, la performance électrique de la barrière tubulaire superhydrophobe sous atmosphère quelconque, est supérieure à toutes les barrières de déférente formes et matières étudiées précédemment. Par conséquent, techniquement et économiquement, il est très souhaitable de remplacer la barrière plane hydrophile par une barrière tubulaire superhydrophobe.

## **Conclusion générale**

---

Malgré l'application des barrières tubulaire est encore limitée dans le domaine de l'énergie électrique. Ces résultats suggèrent que les barrières tubulaires en verre, en particulier les barrières superhydrophobes, offrent une meilleure protection et une plus grande capacité d'isolement dans des conditions sévères, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour leur utilisation dans les systèmes d'énergie électrique.

## *Références bibliographiques*

## Bibliographie

- [1] R. Farhi, C. Morel, G. Chéron " Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité". INRS, ED638, Octobre 2006.
- [2] M. Handala and Mohand-Amokrane " Étude de la décharge de surface sous tension Alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air/solide". Thèse de doctorat d'Etat, UMM T.O, décembre 2007.
- [3] Julien. Jarrige " Étude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface". Thèse de doctorat de l'université de Rouen, février 2008".
- [4] Stéphan. Eymerie "Etude expérimentale des décharges atmosphériques générées par impulsions nanosecondes : application aux traitements des particules de suie Diesel ". Thèse de doctorat de l'université de Rouen, avril 2003".
- [5] P. Sattari, G.S.P. Castle, K. Adamiak, "FEM-FCT Based dynamic simulation of corona discharge in point-plane configuration", Conf. Presentation – P1.17, Natural Science and Engineering Research Council (NSERC) of Canada, pp 1-7, 2009.
- [6] E.Levy, " Dictionnaire de physique" , Paris, Presses universitaires de France, 892 p. (ISBN 978-2-130-39311-5, notice BnFn o FRBNF34928543), p.193 ,1988.
- [7] J.C.Sabonnadière and J.L.Coulomb : " Calcul des champs électromagnétiques " : Techniques de l'ingénieur, D 3020, 2000.
- [8] Marc Seguin, Physique XXI Tome B Note de cours rédigée par Simon Vézina.
- [9] I.K.Seung, "A study on the partial discharge characteristics according to the distribution pattern of voids with an insulation", IEEE, 1995.
- [10] F.H. Kreuger, "Partial discharge detection in high voltage equipment " Butterworth-Heinemann, pp. 78-85, 1990.
- [11] M. Pouard, "Amorçage dans l'air aux grandes distances", demi-journée d'études organisée le 29 avril 1974, Société des Électriciens, des Électroniciens et des Radioélectriciens.
- [12] Les Renardières, " L'amorçage des Grands Intervalles d'Air en Polarité Positive", Conférence Internationale des Grands Réseaux, 1977.
- [13] M. Giralt, " Adaptation d'un Modèle de Décharge en vue de son Application à la Conception de l'Isolation Aérienne H.T et T.H.T", Thèse Présentée à l'École Centrale de Lyon, France, 1999.
- [14] A. Boundiou and I. Gallimberti, " Theoretical Modeling of the Development of the Positive Spark in Long Gap"s, J. Phys. D: Appl. Phys., No.27, 1994.

- [15] I. Fofana and A. Beroual, "A New Proposal for Calculation of the Leader Velocity Based on Energy Considerations", J. Phys. D: Appl. Phys., No.29, 1996.
- [16] B. Hutzler and D. Hutzler-Barre, "Leader Propagation Model for Predetermination of Switching Surge Flashover Voltage of Large Air Gaps", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol.Pas-7, No.4, July/August 1978.
- [17] Thèse de doctorat de l'université de Khemis Miliana Présentée par KACI Meziane Pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES Filière : Electrotechnique Option : Systèmes électro-énergétiques " Thème étude et caractérisation des electrets par la méthode de cartographie de surface" 2015/2016.
- [17] M. NEMAMCHA, polycopie de cours " claquage des isolants haute tension" ,2001
- [18] G.le roy ,C.Gray, "les propriétés diélectriques de l'aire et les très hautes tensions "
- [19] MAXIME DUBOIS, IGEE-403 Matériaux de l'électrotechnique, chapitre 4 Matériaux isolants ,2006
- [20] A. KUECHLER, HOCHSPANNUNGS-TECHNIK 3, neu bearbeitete auflage, Springer, VDI, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [21] Thèse de doctorat de l'université PARIS VI Pierre et Marie CURIE Spécialité : GENIE DES PROCÉDES ET HAUTE TECHNOLOGIE Présentée par Mademoiselle Laure MARTIN Pour obtenir le grade de docteur de l'université PARIS VI Sujet de la thèse : "Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Marquage isotopique et simulation du procédé"2005.
- [22] A Mekhaleli, "étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des isolants sous tension alternative 50 Hz, thèse de doctorat, école nationale polytechnique, Alger, Algérie,1999
- [23] G. Marrone, F. Marinoni, "set up of a dust chamber providing artificiel insulator contamination suitable to reproduce conditions occurring in the field", paper presented at 5 th international symposium on high voltage engineering,N 52,1987]
- [24] Ozcan, O., & Bayindir, M. (2018). Superhydrophobic surfaces and emerging applications : a review. Journal of Materials Chemistry A, 6(18), 8367-8386.
- [25] Melle.SMATI bahia, Melle. SOUDANI sarah " Impact du dépôt de gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative", PFE Master "A I", U. A. M. Bejaïa 27/06/2017.
- [26] Y. Cai, et al. Adv. Funct. Mater. 24 (6) (2014) 809.
- [27] W. Barthlott and C. Neinhuis. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. Planta, 202:1–8, 1997.

- [28] Zdenek Cerman, Boris F Striffler, and Wilhelm Barthlott. Dry in the water: the superhydrophobic water fern salvinia—a model for biomimetic surfaces. In *Functional surfaces in biology*, pages 97–111. Springer, 2009.
- [29] "Thermal effect on superhydrophobic performance of stearic acid modified ZnO Nanotowers", Saleema, N. Farzaneh, M., *Appl Surf. Sci.* (2007), 254, 6.
- [30] " One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings", Sarkar, D.K. Saleema, N., *Surf.Coat. Technol.* (2010), 204, 2483-2486.
- [30] F. Beroual et al". Dielectric properties of polypropylene/carbon nanotubes nanocomposite barriers for high voltage insulation", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* Vol. 23, no. 3, pp. 1378-1383.
- [30] Srivastava, K. D., Singh, S. P., & Srivastava, S. K. " Degradation Analysis of Polymeric Insulating Materials under AC Voltage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(3), 1453-1461. doi: 10.1109/TDEI.2017.006110".
- [31] L. Ming, T. Bengtsson, "Barrier effects air insulates systems under DC voltage". Session 4303, 8th ISH, pp. 1-4. Japan 1993.
- [32] L. Ming, M. Leijon, T. Bengston, "Factors influencing barrier effects in air gaps". *International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH)*, session 2168, pp. 1-4, Graz 1995.
- [33] F. Mauseth, A. Nysveen and E. I. Norwegian, "Charging of Dielectric Barriers in Rod-Plane Gaps". *International Conference on Solid Dielectrics*, Toulouse, France, July 5-9 2004.
- [34] D. van der Born, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit et A. Girodet, "The Influence of Thin Dielectric Coatings on LI and AC Breakdown Strength in SF6 and Dry Air". 2013 *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Bologna, Italy, June 30 - July 4, 2013
- [35] T. Mizuno, K. Morita, Y. Kurata, K. Nagatake and H. Saitoh, "Electrical Insulation Performance in Air gap with Covered Electrode". *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, June 1-5 2003 Nagoya P1-6.
- [36] P. N. Mavroidis, P. N. Mikropoulos, C. A. Stassinopoulos, P. Rafailidis et G. Smaragdakis, "Impulse Breakdown of Short Rod - plane Air Gaps with a Dielectric Covered Rod". 1070-9878/12/\$25.00 © 2012 IEEE.
- [37] 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*, pp 632-640, Vol. 19, No. 2; April 2012.
- [38] J. Meek et M. M. Collins, " Measurement of electric fields at electrode surfaces". *Electronics Letters*, Vol. 1, p. 110, 1965.

- [39] E. Foruzan et H. Vakilzadian, "The Investigation of Dielectric Barrier Impact on the Breakdown Voltage in High Voltage Systems by Modeling and Simulation". 978-1-4673-8040-9/15/\$31.00 ©2015 IEEE.
- [40] N. Bouatia, S. Messad, R. Boudissa "Comparative study of the electrical performance of superhydrophobic, hydrophobic, and hydrophilic tubular and flat insulating barriers under DC voltage and any atmosphere"2022.
- [41] T. Belhoul, R. Boudissa, Klaus Dieter Haim "Performance of an Air Gap in Non-Uniform Electric Field with Silicone Tubular Barriers under AC", Conference SFE'18, France.
- [42] A. Boubakeur, A. Mekhaldi "Polluted Barrier Effect on the Electric Field Distribution in Point-Plane Air Gaps under AC Applied Voltage: Based on Experimental Model" ENP Engineering Science Journal, Vol. 1, No. 2, December, 2021
- [43] R. Boudissa, A. Bayadi, R. Baersch, Li. "AC Performance of silicone and glass barriers in clean and polluted atmosphere", Electric Power Systems Research 108 (2014), pp.170-177.
- [44] T. Belhoul, R. Boudissa, K. D. Haim, "Comparison of the Performance of Silicone and Glass Barriers under Direct Current and Very Severe Conditions of Pollution", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 24, No.1, pp. 471 - 482, 2017.
- [45] N. Bouatia, S. Messad, F. Bouchelga, T. Belhoul, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim, «Comparative study of the electrical performance of superhydrophobic and hydrophilic tubular and plane insulating barriers under DC voltage", Electrical Engineering, 2021.
- [46] E. Phillipow, "Systems of Electrical Power Engineering", Taschenbuch Elektrotechnik, Vol. 6, Hochspannungstechnik, Carl Hanser, VEB Verl, Berlin, Muenchen, Wien, 1982