

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Électrique
Option : Maintenance industrielle

Thème

Maintenance préventive des installations électriques en haute tension

Réalisé par :

Mr. KERKADENE Hichem

Mr. BETTOUCHE Faouzi

Encadré par :

Dr. T. BELHOUL

Promotion 2023

Remerciement

*Avant tout on tient nos remerciements à notre dieu
Tout puissant De nous avoir donné la force, le courage et la santé pour
compléter ce modeste travail.*

*On adresse nous remerciements aussi aux personnes qui nous ont aidés dans
la réalisation de ce projet de fin d'étude*

En premier lieu, on tien a remercié, Notre promoteur

Mme BELHOUL Talit

*Comme on tien a nous enseignants qui ont était une source infatigable De
Savoir Et d'encouragement*

*Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de
Notre travail se voient remerciés.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- *A mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements, et bien sûr pour m'avoir permis de réaliser les études dans les meilleures conditions*
- *A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir un jour un master en maintenance industriel.*
- *À mes amis et collègues qui étaient avec moi dès le début de mon parcours.*
- *A mon binôme Faouzi*
- *A tous les autres membres de ma famille*
- *A mes frères Amine et Rayan*

Hichem

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

- *A mes parents, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements, et bien sûr pour m'avoir permis de réaliser les études dans les meilleures conditions*
- *A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir un jour un master en maintenance industriel.*
- *À mes amis et collègues qui étaient avec moi dès le début de mon parcours.*
- *A mon binôme Hichem.*
- *A tous les autres membres de ma famille.*
- *A mes frères et sœurs : Chaabane ,Oualid,Noria et Ryma.*

Faouzi

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I	
I. 1 Introduction	3
I. 2 Historique et évolution de la maintenance industrielle	3
I. 3 Définition de la maintenance industrielle.....	5
I. 4 Objectifs de la maintenance industrielle	5
I. 4.1 Objectifs financiers.....	5
I. 4.2 Objectifs opérationnels	5
I. 5 Type de la maintenance industrielle.....	6
I. 5.1 Maintenance corrective.....	6
I. 5.1.1 La maintenance corrective Palliative	7
I. 5.1.2 La maintenance corrective Curative.....	7
I. 5.2 La Maintenance préventive	8
I. 5.2.1 La maintenance préventive Systématique	8
I. 5.2.2 La maintenance préventive Conditionnelle	9
I. 5.2.3 La maintenance préventive Prévisionnelle	10
I. 6 Rôle de la maintenance industrielle	10
I.7 Niveaux de maintenance industrielle	11
I. 7. 1 Définition des niveaux de maintenance	11
I. 8 Fonctions de la maintenance [8]	12
I. 8.1 La fonction Méthode.....	12
I. 8.2 La fonction Ordonnancement.....	12
I. 8.3 La fonction Réalisation.....	12
I. 9 Conclusion.....	12
Chapitre II	
II.1 Introduction	13
II.2 Définitions.....	13
II.2.1 Isolants.....	13

II.2.2 Isolation	14
II.2. 3 Isolement.....	14
II.2. 4 Diélectrique.....	14
II.2. 5 Système d'isolation [18].....	14
II. 3 Différents types d'isolants utilisés dans notre étude.....	14
II. 3. 1 Isolants gazeux [14,19].....	14
II.3.1.1 Domaines d'application des isolants gazeux.....	15
II.3. 2 Les isolants solides.....	15
II. 3. 2. 1 Verre.....	15
II. 3. 2. 2 Matériau superhydrophobe.....	16
II. 3. 2. 3 Domaine d'application des diélectriques solides.....	17
II. 4 Caractéristiques des matériaux isolants (Diélectriques)	18
II.4.1 Propriétés électriques	18
II.4.1.1 Résistivité	18
II.4.1.2 Rigidité diélectrique.....	18
II.4.1.3 Permittivité	19
II.4.1.4 Facteur de pertes.....	19
II. 5 Propriétés super hydrophobe	20
II.5.1 Définition de la mouillabilité	20
II.5.1.2 Non-mouillabilité.....	20
II.5.1.3 Angle de contact	20
II.5.2 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact	20
II.5.2.1 Surface super hydrophile.....	21
II.5.2.2 Hydrophile.....	21
II.5.2.3 Hydrophobicité	21
II.5.2.4 Super hydrophobicité	22
II.5.3 Modèles de surfaces super hydrophobes	22
II.5.3.1 Selon Wenzel (1936) [34]	22
II.5.3.2 Selon Cassie (1944) [35].....	23
II.5.4 Techniques de préparation de surfaces super hydrophobes.....	23
II.5.4.1 Dépôt par vapeur chimique	23

II.5.4.2 Dépôt électrochimique	23
II. 5.4.3 Photolithographie.....	24
II.5.4.4 Techniques utilisant le plasma.....	24
II. 6 Décharge dans l'intervalle d'air protégé par une barrière isolante.....	24
II.7 Contournement	24
II. 7. 1 Tension de tenue.....	25
II.7. 2 Ligne de fuite	25
II.7. 3 Courant de fuite.....	25
II. 8 Conclusion.....	25
Chapitre III	
III.1 Introduction.....	28
III.2 Circuit de mesure et de visualisation.....	28
III.3 Préparation de la surface isolante.....	30
III.3.1 Préparation de la pollution.....	30
III.3.2 Mode d'application de la solution polluante	30
III.3.3 Réalisation d'une surface super hydrophobe.....	30
III.4 Dispositif expérimental et techniques de mesure.....	31
III.4.1 Modèles expérimentaux	31
III.4.1.1 Modèle pointe-pointe.....	31
III.4.1.2 Modèle pointe-plan.....	31
III.4.2 Protocole expérimental.....	32
III.4.2.1 Modèle pointe-pointe.....	32
III.4.2.2 Modèle pointe-plan.....	32
III.5 Configuration pointe-pointe.....	33
III.5.1 Configuration pointe-barrière tubulaire propre-pointe.....	33
III.5.2 Configuration pointe-barrière polluée-pointe.....	35
III. 5.3 Configuration pointe - barrière tubulaire avec revêtement superhydrophobe – pointe	37
III.6 Configuration Pointe – plan	39
III. 6. 1 Configuration pointe - barrière tubulaire propre - plan.....	39
III. 6.2 Configurations pointe - barrière tubulaire polluée - plan.....	41
III. 6.3 Configuration pointe - barrière tubulaire avec revêtement super hydrophobe - plan	42

III. 7 Comparaison de la valeur de la tension disruptive entre système avec barrières propre et celui avec revêtement superhydrophobe	43
III. 8 Conclusion	45
Chapitre IV	
IV. 1 Introduction.....	47
IV.2 Présentation des étapes de simulation sous COMSOL	47
IV.2.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5	47
IV. 2. 3 Création du modèle de simulation	48
IV.3 Vue 2D des modèles étudiés et résultats	49
IV.3.1 modèle pointe-pointe à vide	49
IV. 3. 2 Modèle pointe-plan	50
IV. 3. 3 Maillage du modèle proposé	50
IV. 3. 1. 2 Résultats de la simulation et discussions	51
IV. 4 Conclusion	64
Conclusion générale	65

Liste des figures

CHAPITRE I

FIGURE I.1 : EVOLUTION DE LA MAINTENANCE DEPUIS 1940	4
FIGURE I.2 : LES TYPES DE MAINTENANCE (AFNOR).....	6
FIGURE I.3 : PROCESSUS DE DEROULEMENT D'UNE MAINTENANCE CORRECTIVE SUR UN SYSTEME OU UN EQUIPEMENT.....	7
FIGURE I.4 : DEROULEMENT CHRONOLOGIQUE DES ACTIONS DE MAINTENANCE SYSTEMATIQUE	8
FIGURE I.5 : PRINCIPE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE	9

CHAPITRE II

FIGURE II. 1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE SIMPLIFIEE DES STRUCTURES DU VERRE (GAUCHE) ET DU SiO ₂ CRISTALLIN	16
FIGURE II.2 : CHAMP ELECTRIQUE PROPRE A L'INTERIEUR D'UN MATERIAU ISOLANT SOUS TENSION	19
FIGURE II. 3 : CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT SERIE ET PARALLELE.....	20
FIGURE II.4 : COMPORTEMENT D'UNE GOUTTE SUR UNE SURFACE	21
FIGURE II. 5 : FEUILLE DE LOTUS	22
FIGURE II.6 : SCHEMA DES GOUTTES D'EAU DEPOSEES SUR DES SURFACES SUPER HYDROPHOBES DONT LA RUGOSITE EST FAITE DE PILIERS MICROMETRIQUES, EN ETAT WENZEL (A) ET EN ETAT CASSIE-BAXTER (B)	23

CHAPITRE III

FIGURE III. 1 : SCHEMA DE MESURE ET DE VISUALISATION.....	28
FIGURE III. 2 : PHOTO DE LA SOURCE HAUTE TENSION	29
FIGURE III. 3 : PHOTO DE LA SOURCE BASSE TENSION SG1.....	29
FIGURE III. 4 : PHOTO DU VOLTMETRE DE CRETE	29
FIGURE III. 5 : ETAPES ESSENTIEL DE FABRICATION D'UN REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE.....	30
FIGURE III. 6 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL (POINTE-POINTE)	31
FIGURE III. 7 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL (POINTE-PLAN)	31
FIGURE III. 8 : TRAJET DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DISRUPTIVE DE SYSTEME POINTE – POINTE SANS BARRIERE ET AVEC BARRIERE PROPRE	33
FIGURE III. 9 : TENSION CONTINUE POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE-POINTE (SANS BARRIERE ISOLANTE ET PROTEGEE AVEC UNE BARRIERE ISOLANTE ET DEUX BARRIERE ISOLANTE EN VERRE PROPRE (LB = 10 CM)).....	34
FIGURE III. 10 : TENSION CONTINUE POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE-POINTE (SANS BARRIERE ISOLANTE ET PROTEGEE AVEC UNE BARRIERE ISOLANTE ET DEUX BARRIERE ISOLANTE EN VERRE PROPRE (LB = 5 CM)).....	35
FIGURE III. 11 : TRAJET DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DISRUPTIVE DE SYSTEME POINTE – POINTE SANS BARRIERE ET AVEC BARRIERE POLLUEE	35
FIGURE III. 12 : TENSION CONTINU POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE - POINTE (SANS BARRIERE ISOLANTE, PROTEGER AVEC 1 BARRIERE ISOLANTE POLLUEE OU 2 BARRIERE ISOLANTE EN VERRE POLLUEE (LB = 10CM))	36

FIGURE III. 13 : TENSION CONTINU POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE - POINTE (SANS BARRIERE ISOLANTE, PROTEGER AVEC 1 BARRIERE ISOLANTE POLLUEE OU 2 BARRIERE ISOLANTE EN VERRE POLLUEE (LB = 5 CM)).....	37
FIGURE III. 14 : TRAJET DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DISRUPTIVE DE SYSTEME POINTE – POINTE SANS BARRIERE ET AVEC BARRIERE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE	37
FIGURE III. 15 : TENSION CONTINU POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE -POINTE (SANS BARRIERE ISOLANTE, PROTEGER AVEC 1 BARRIERE ISOLANTE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE OU 2 BARRIERE ISOLANTE EN VERRE AVEC REVETEMENT SUPE SUPERHYDROPHOBE (LB = 10 CM)).....	38
FIGURE III.16 : TENSION CONTINU POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE -POINTE (SANS BARRIERE ISOLANTE, PROTEGER AVEC 1 BARRIERE ISOLANTE AVEC COUCHE SUPERHYDROPHOBE OU 2 BARRIERE ISOLANTE EN VERRE AVEC COUCHE SUPERHYDROPHOBE (LB = 5 CM))	39
FIGURE III. 17 : TRAJET DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DISRUPTIVE DE SYSTEME POINTE – PLAN SANS BARRIERE ET AVEC BARRIERE PROPRE	40
FIGURE III. 18 : TENSION CONTINU POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE-PLAN (SANS BARRIERE ISOLANTE ET PROTEGER AVEC BARRIERE ISOLANTE EN VERRE PROPRE (LB = 10CM, LB = 5CM))	40
FIGURE III. 19 : TRAJET DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DISRUPTIVE DE SYSTEME POINTE – PLAN SANS BARRIERE ET AVEC BARRIERE POLLUEE	41
FIGURE III. 20 : TENSION CONTINU POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE-PLAN (SANS BARRIERE ISOLANTE ET PROTEGER AVEC BARRIERE ISOLANTE EN VERRE POLLUEE (LB = 10 CM, LB = 5 CM)).....	42
FIGURE III. 21 : TRAJET DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DISRUPTIVE DE SYSTEME POINTE – PLAN SANS BARRIERE ET AVEC BARRIERE SUPERHYDROPHOBE	42
FIGURE III. 22 : TENSION CONTINU POSITIVE DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODE POINTE- PLAN (SANS BARRIERE ISOLANTE ET PROTEGEE PAR BARRIERE ISOLANTE EN VERRE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE (LB = 10 CM, LB = 5 CM))	43
FIGURE III. 23 : TENSION DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER ELECTRODES POINTE - POINTE POUR LES CAS DE 2 BARRIERES TUBULAIRES PROPRE ET AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE	44
FIGURE III. 24 : TENSION DISRUPTIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER ELECTRODES POINTE-PLAN POUR LES CAS D’UNE BARRIERE TUBULAIRE PROPRE ET AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE.....	44
<u>CHAPITRE IV</u>	
FIGURE IV. 1 : INTERFACE UTILISATEUR DE COMSOL 5.5	48
FIGURE IV. 2 : CREATION DU MODELE GEOMETRIQUE.....	49
FIGURE IV.3 : MODELE POINTE-POINTE.....	49
FIGURE IV.4 : MODULE POINTE-PLAN	50
FIGURE IV.5 : MAILLAGE DU MODELE POINTE-POINTE	51
FIGURE IV.6 : MAILLAGE DU MODELE POINTE-PLAN	51
FIGURE IV. 7 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-POINTE POUR LA DISTANCE INTER ELECTRODE D = 10 CM.....	52

FIGURE IV. 8 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-PLAN POUR LA DISTANCE INTER ELECTRODE $D = 10$ CM.....	53
FIGURE IV. 9 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-1BARRIERE PROPRE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM)	54
FIGURE IV. 10 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-1BARRIERE PROPRE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	54
FIGURE IV. 11 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-2BARRIERE PROPRE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM)	55
FIGURE IV. 12 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-2BARRIERE PROPRE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	55
FIGURE IV. 13 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-BARRIERE PROPRE-PLAN POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM)	56
FIGURE IV. 14 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-BARRIERE PROPRE-PLAN POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	56
FIGURE IV. 15 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-1BARRIERE POLLUEE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM)	57
FIGURE IV. 16 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-1BARRIERE POLLUEE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	58
FIGURE IV. 17 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-2BARRIERE POLLUEE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM)	58
FIGURE IV. 18 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-2BARRIERE POLLUEE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	59
FIGURE IV. 19 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-BARRIERE POLLUEE-PLAN POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM)	59
FIGURE IV. 20 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-BARRIERE POLLUEE-PLAN POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	60
FIGURE IV. 21 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-1BARRIERE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM) ...	61
FIGURE IV. 22 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-1BARRIERE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	61
FIGURE IV. 23 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-2BARRIERE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM) ...	62
FIGURE IV. 24 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-2BARRIERE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE-POINTE POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	62
FIGURE IV. 25 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-BARRIERE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE-PLAN POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 10$ CM)	63
FIGURE IV. 26 : REPARTITION DU POTENTIEL ET CHAMP ELECTRIQUE DANS LE CAS DE LA CONFIGURATION POINTE-BARRIERE AVEC REVETEMENT SUPERHYDROPHOBE-PLAN POUR ($D = 10$ CM ET $LB = 5$ CM)	63

Liste des tableaux

TABLEAU I. 1 : ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE D'UN ELASTOMERE DE SILICONE	17
---	----

Liste des abréviations

AFNOR : Association française de normalisation.

MC : Maintenance corrective.

MP : Maintenance préventive.

I_{pc} : Intervention maintenance préventive.

U_{Ac} : Tension alternative.

U_{Dc} : Tension continue.

E : Champ électrique.

V : Volt.

HT : Haute tension.

BT : Basse tension.

R_s : Résistivité superficielle.

R_t : Résistance transversale.

R_i : Résistance d'isolement.

RDT : Rigidité diélectrique transversale.

RDL : Rigidité diélectrique longitudinale,

E_p : Champ électrique propre.

E_{ext} : Champ électrique externe.

ε_r : Permittivité relative.

θ : Angle de contact

γ_{SL} : Tension de surface Solide-Liquide (N/m).

γ_{SV} : Tension de surface Solide-vapeur (N/m).

θ_e : Angle de Young

θ* : Angle de contact avec la rugosité en degré (°)

T_r : Transformateur.

V_c : Voltmètre de crête.

R_a : Résistance de protection.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'électricité est une forme d'énergie indispensable dans notre société moderne, elle est indissociable des activités quotidiennes des êtres humains. L'importance de l'électricité se caractérise dans la diversité de domaines d'usage notamment celui de la haute tension qui regroupe le fonctionnement de nombreuses industries et infrastructures intéressantes, telles que les usines de production, les centrales électriques, les aéroports, les hôpitaux, etc. Elle permet ainsi de soutenir le développement industriel, la croissance économique et l'amélioration de la qualité de vie humaine et rend leur pratique plus facile. Cependant, les installations électriques en haute tension présentent des dangers liés aux arcs électriques qui peuvent causer des dommages aux personnes et aux matériels, ce qui fait appel à l'intervention de la maintenance industrielle pour anticiper et éviter ces dommages.

Longtemps vue comme un mal nécessaire, la maintenance est devenue une réelle préoccupation dans le domaine de l'organisation industrielle. Elle s'est affirmée comme un véritable enjeu compétitif, tant sur l'assurance des performances de disponibilité des matériels existants qu'en termes de sécurité, de qualité et de coûts, par exemple [1].

Dans le domaine de la haute tension, la maintenance préventive des installations électriques consiste à utiliser les techniques et les procédures nécessaires afin de prévenir les pannes et les dysfonctionnements. D'où l'installation d'un système d'isolation efficace est très importante. Elle permet d'éviter les dangers et les défaillances et d'augmenter le niveau de sécurité humaine et de bien-être. Pour cela plusieurs chercheurs se sont donc engagés dans des travaux de recherche pour développer des isolations à surface superhydrophobe à degré de mouillage nul pour éviter les phénomènes qui menacent leur sécurité, parlons ici sur l'humidité et la pollution.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la maintenance préventive des installations électriques en haute tension.

Le présent manuscrit comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les généralités de la maintenance industrielle, en expliquant les différents types de maintenance. Nous mettons également en évidence l'objectif, les méthodes et les niveaux de maintenance.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons les matériaux isolants en génie électrique et les matériaux superhydrophobes en expliquant leurs propriétés. Nous allons présenter également les phénomènes de décharge électrique.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différentes séries d'essais menés dans le laboratoire de haute tension au sein de l'université de Bejaia.

Introduction générale

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons une simulation réalisée à l'aide du logiciel COMSOL multiphysics version 5.5 pour une meilleure observation de la distribution du champ et du potentiel électrique dans l'intervalle d'air non uniforme sous tension continue.

Enfin, nous allons terminer par une conclusion générale. Nous mentionnerons les principaux résultats obtenus et nous proposerons quelques perspectives pouvant être envisagées le sillage du présent travail.

CHAPITRE I

Généralités sur la maintenance industrielle

I. 1 Introduction

La maintenance industrielle à travers ces différentes opérations évolue et devient de plus en plus une fonction capitale et plus intéressante. Elle joue un rôle primordial dans le cadre de l'amélioration continue et du dépannage des équipements. Les objectifs de la maintenance sont bien plus nombreux et son but dépasse le cadre économique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la fonction maintenance d'une manière générale. Nous mettrons en évidence la définition de la maintenance industrielle et son évolution dans le temps depuis sa naissance ainsi que les différents types de la maintenance bien évidemment la maintenance préventive qui nous intéresse le plus dans notre travail.

I. 2 Historique et évolution de la maintenance industrielle

La maintenance au sein des organisations a connu une grande évolution dans le temps. Auparavant, la maintenance n'était qu'une partie inévitable de la production. Les réparations et les remplacements ont été abordés lors de la nécessité uniquement et non pas pour l'optimisation [2]. Mais aujourd'hui, la maintenance est devenue un élément primordial pour atteindre les objectifs tracer de l'entreprise, elle est mieux reconnue et valoriser dans l'organisation [2]. Ce jour-là, la gestion de la maintenance est devenue une fonction importante qui combine des compétences techniques et managériales, qui nécessite une certaine souplesse pour faire face à l'augmentation de la complexité des processus de fabrication [3].

- ✓ Le terme « maintenance » a son origine dans le vocabulaire militaire, dans le sens maintien des unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant [4]. Il est clair que les unités qui nous intéressent ici c'est les unités de production industrielle, et le combat avant tout économique. L'émergence du terme « maintenance » dans l'industrie a eu lieu vers 1940 aux USA. En France, il se superpose progressivement à « l'entretient » [4].
- ✓ Entretien : c'est le dépannage et la réparation d'un parc matériel, pour assurer la continuité de la production. (Entretien c'est subir)
- ✓ Maintenir : c'est choisir des moyens de prévenir de corriger ou de rénover le matériel suivant sa criticité économique pour but d'optimiser le cout général de possession. (Maintenir c'est maîtriser)

L'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (figure I.1)

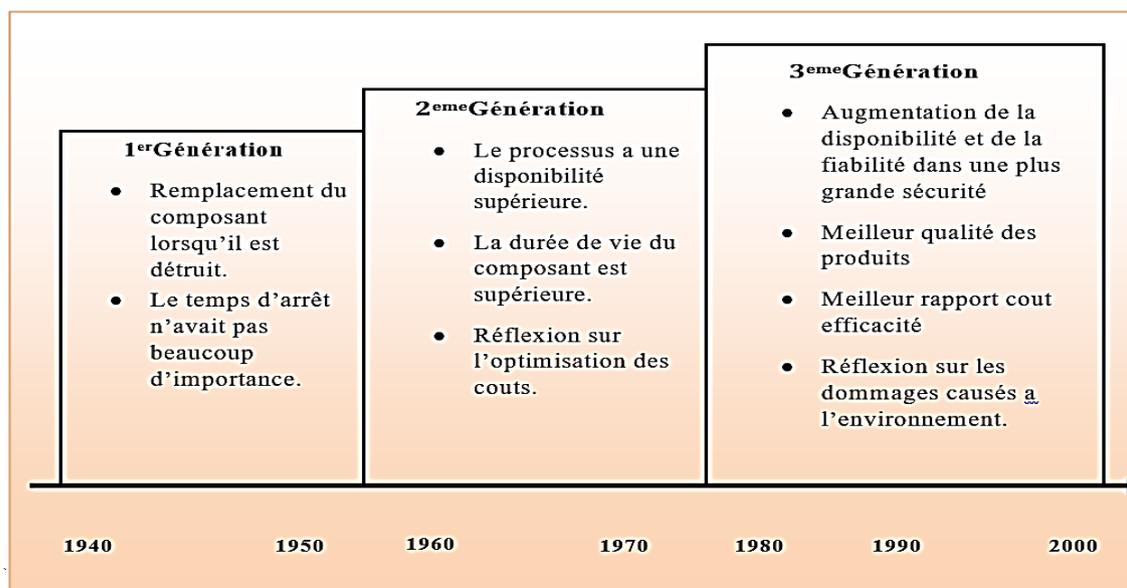


Figure I.1 : Évolution de la maintenance depuis 1940 [5]

La première génération durant toute la période allant jusqu'à la seconde guerre mondiale. Pendant cet intervalle, les temps d'arrêt n'avaient pas beaucoup d'importance. La prévention de la défaillance de l'équipement n'était pas une priorité dans les esprits de la plupart des gestionnaires. Les interventions de réparations étaient faciles vu que la majorité des équipements étaient techniquement plus simples qu'aujourd'hui. Pour cela, les activités de maintenance se résumaient à des routines de nettoyage et de lubrification. L'exigence de compétences était également inférieure à ce qu'il est aujourd'hui.

Pendant la deuxième génération, des changements significatifs ont eu lieu. Avec l'arrivée des années 50, et une augmentation de la demande de marchandises, le volume de main-d'œuvre industrielle chute. Cela conduit à une « *mécanisation accrue* ». Durant les années 1950, des machines de tous types apparaissent en nombre et de plus en plus complexes. Pour maintenir ou augmenter ses performances, l'industrie commence à en dépendre. La gestion des temps d'arrêt rentre dans l'orientation générale de l'organisation de l'entreprise. Cela conduit à l'idée que les pannes d'équipements pourraient et devraient être évitées. Cette idée conduit à son tour, à la naissance de la notion de maintenance préventive. Dans les années 1960, cela consiste essentiellement à effectuer des révisions à des intervalles constants sur les équipements. Le coût de la maintenance commence à augmenter fortement par rapport à d'autres coûts d'exploitation. Cela conduit à la croissance de la planification de la maintenance et des systèmes de contrôle.

Pendant la troisième génération qui est débuté au milieu des années 70, le processus de changement dans l'industrie rassemble encore plus de dynamiques et de remises en causes. Ces changements peuvent être classés sous les rubriques [5] :

- Nouvelles attentes.

- Nouvelles recherches.
- Nouvelles techniques.

I. 3 Définition de la maintenance industrielle

La maintenance s'est évoluer dans le temps et sa définition s'est élargie, elle comprend aujourd'hui toutes les pratiques et activités rentables réalisées pour assurer le bon fonctionnement des opérations.

Depuis 2001, et d'après la norme européenne - norme française (NF EN 13306 X 60-319), la maintenance est définie comme l'" Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » [6].

I. 4 Objectifs de la maintenance industrielle

Le but de l'équipe de maintenance est de maintenir l'outil de production Dans des conditions parfaites, assurant un rendement maximal tout en optimisant les coûts.

L'obtention du meilleur rendement nécessite la prévention des pannes, le respect des cadences de production et l'amélioration continue de la qualité des produits. Maintenir, ce n'est plus subir les pannes mais maîtriser les défaillances par l'optimisation de la politique de maintenance, par une bonne prévention, par des réparations rapides et efficaces, enfin par l'amélioration du matériel.

Pour effectuer cette tâche correctement, il est nécessaire de se doter en plus de la compétence technique des personnes, d'une organisation efficace et d'outils adapté.

Les objectifs de la maintenance sont présentés comme suite :

- Les objectifs financiers,
- Les objectifs opérationnels.

Le fait que ces deux objectifs sont différents expliquera pourquoi la production et la maintenance sont souvent en désaccord, pourquoi les deux attitudes semblent-elles L'opposé.

I. 4.1 Objectifs financiers

- Réduire au minimum les dépenses de la maintenance.
- Augmenter au maximum les profits.
- Avoir des dépenses de maintenance en fonction de l'âge des installations et de son taux d'utilisation.

I. 4.2 Objectifs opérationnels

- Maintenir les équipements.
- Assurer la disponibilité maximale des installations et des équipements.

- Fournir un service qui élimine la panne a tous les moments à tout prix.
- Pousser à la dernière limite la durée de vie de l'installation.
- Assurer une performance (rendement) de haute qualité [7].

I. 5 Type de la maintenance industrielle

On peut distinguer plusieurs types de la maintenance industrielle (figure I.2). Les méthodes de la maintenance peuvent être déclinées en deux grande catégories :

La première famille c'est la maintenance corrective (MC) qui intervient suite à la défaillance du système, elle se compose deux branches : la maintenance palliative et la maintenance curative.

La deuxième famille c'est la maintenance préventive (MP) qui se réalise avant l'arrivée de la panne. Dont les interventions sont planifiées en suivant de différents paramètres. Ce type de maintenance contient : la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle donc on peut la classer comme cas particulier de la maintenance conditionnelle.

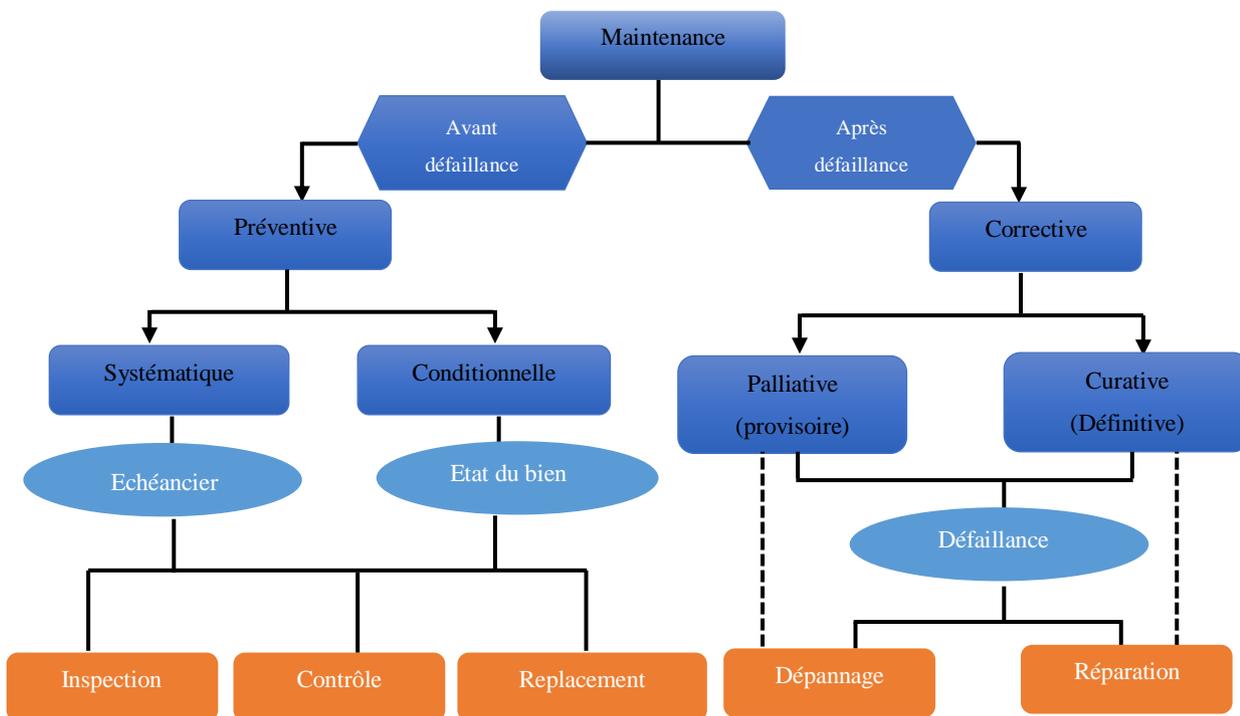


Figure I.2 : les types de maintenance(AFNOR)

I. 5.1 Maintenance corrective

La maintenance corrective n'est applicable qu'après l'arrivée d'une panne. Elle est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». La maintenance corrective peut être :

- « Différée » si « elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données ».

- Elle peut être « d'urgence » si « elle est exécutée sans délai dès la détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables » [8].

La maintenance corrective est souvent coûteuse, mais cette approche peut être considérée comme rentable et est encore applicable dans des zones à faibles contraintes de sécurité ou sur des systèmes non sujets à vieillissement [1].

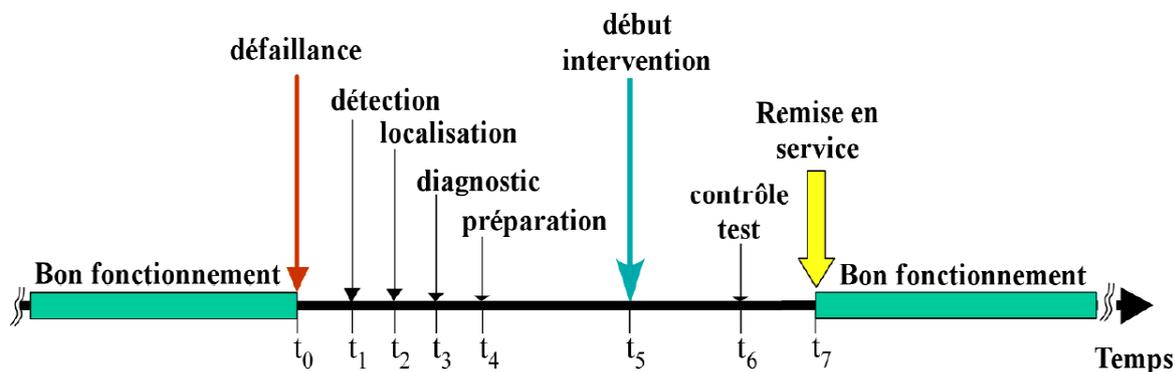


Figure I.3 : Processus de déroulement d'une maintenance corrective sur un système ou un équipement [5]

On remarque d'après la figure que depuis l'instant t_0 jusqu'à l'instant t_5 , aucune intervention opérationnelle n'est encore engagée. Cette durée (t_5-t_0) devra être minimisée pour des causes économiques et améliorer la productivité. Elle pourra être diminuée par une planification gestion efficace d'une maintenance dite préventive et une analyse de retour d'expérience dans le programme de maintenance. Ce type de maintenance sera réservé à du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production, et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité ou le système de fabrication [5].

La maintenance corrective se décline en deux catégories :

I. 5.1.1 La maintenance corrective Palliative

La maintenance corrective palliative est une maintenance exécuter après l'arrivée d'une panne, la norme AFNOR la décrit comme : «Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise, appelée couramment dépannage». La maintenance palliative permet à l'équipement d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise. Elle est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui doivent être suivies d'actions curatives [6].

I. 5.1.2 La maintenance corrective Curative

La maintenance corrective curative est une maintenance exécutée après l'arrivée de la défaillance, les interventions dans ce type de maintenance sont d'une manière définitive. La norme AFNOR X60-319/NF EN 13306 AFNOR Terminologie de la maintenance la définit comme : «une action de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié pour lui

permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des actions réalisées doit présenter un caractère permanent» [6].

I. 5.2 La Maintenance préventive

Contrairement à la maintenance corrective qui attend l'arrivée de la panne pour intervenir, la maintenance préventive se base principalement sur l'intervention sur l'équipement avant que celui-ci ne soit défaillant. Par définition, La maintenance préventive est présentée comme les activités exécutées à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation d'un système [1].

La maintenance préventive est pour but :

- Augmenter la durée de vie des matériels
- Diminuer la probabilité des défaillances en service
- Supprimer les causes d'accidents graves
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.

Il existe trois types de maintenance préventive :

I. 5.2.1 La maintenance préventive Systématique

La maintenance préventive systématique est apparue dans les années cinquante-soixante. Elle est réalisée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage dans le but de rétablir complètement ou partiellement la fonction requise d'un système, ce qui améliore la productivité des équipements industriels. L'opération de maintenance est effectuée selon un calendrier déterminé et ne tient en aucun compte de l'état du système. Elle est utile pour des systèmes ayant un coût d'entretien faible, une productivité monotone et un faible niveau de sécurité [1].

Toutes ces définitions se recourent dans la figure (figure I.4) :

- ✓ Nous noterons T la période d'intervention prédéterminée
- ✓ Ips chaque intervention préventive systématique [8].

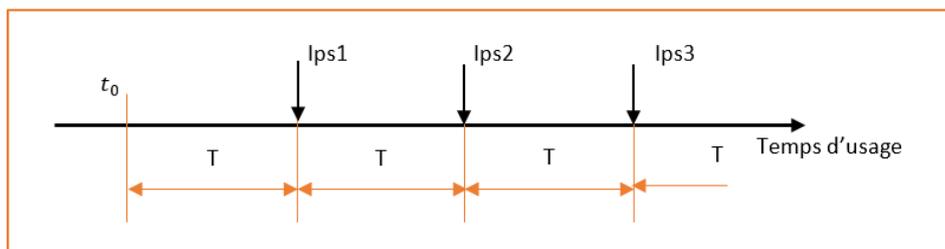


Figure I.4 : Déroulement chronologique des actions de maintenance systématique

Dans les années 1970s, l'évolution des sciences et technologies a motivé l'intégration de la technologie d'information dans le domaine de la maintenance. L'apparition de capteurs et de systèmes

de surveillance a marqué la naissance de deux nouveaux concepts : la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle qui ont débuté principalement dans les industries aéronautiques et de défense [1].

I. 5.2.2 La maintenance préventive Conditionnelle

Il s’agit d’une maintenance préventive dont les actions sont basées sur la surveillance continue du fonctionnement du système et/ou des paramètres significatifs de fonctionnement. Les paramètres significatifs de fonctionnement sont des mesures caractéristiques des systèmes telles que la vibration, la température, le degré d’érosion, la qualité du lubrifiant utilisé, etc. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être réalisé selon un calendrier, à la demande ou de façon continue. Les décisions d’interventions sont alors fonction de seuils critiques qui sont déterminés en amont [1].

La figure (figure I.5) illustre le principe de la maintenance conditionnelle. Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques d’une dégradation jusqu’au seuil d’alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle (notée I_{pc}) [8].

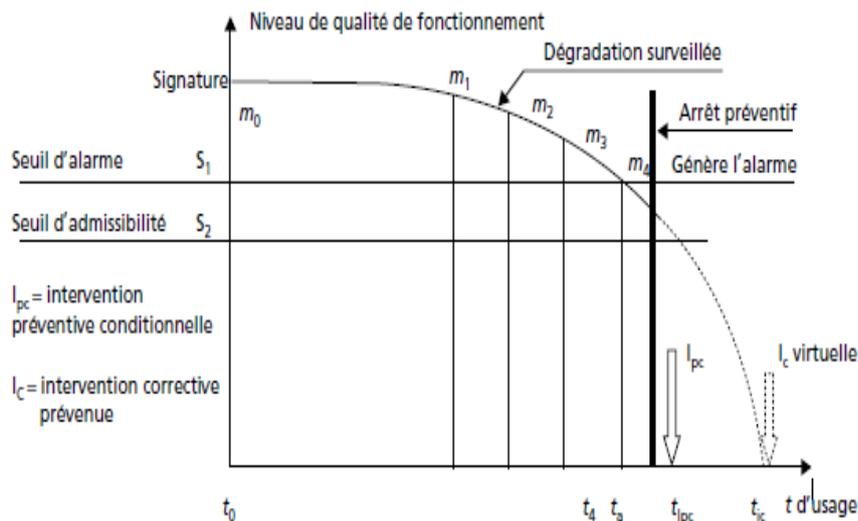


Figure I.5 : Principe de la maintenance conditionnelle [8]

La « signature » est une prise de référence de l’état de « bon fonctionnement » à l’origine.

Les mesures (cas le plus fréquent) peuvent être de simples observations visuelles (état constaté), des images (spectres, radios, etc.). Elles peuvent être remplacées par des alarmes pré-réglées (led, fusible, etc.), ou des inspections préventives institut. Les mesures m_i peuvent être continues ou périodiques, espacées de Δt de telle manière que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta t < t \text{ admissibilité} - t \text{ alarme}$$

Les mesures peuvent ne pas commencer à t_0 (sauf signature) si l'on connaît la loi de dégradation. Les mesures peuvent être collectées par rondes ou « monitorées » au central de surveillance.

L'arrêt sera généré automatiquement par l'alarme (cas d'un fusible), ou différé par décision volontaire jusqu'à l'Ipc programmée et organisée.

L'intervention Ipc sera programmée à partir de l'alarme, suivant un temps de « réaction » du service maintenance à prédéterminer. Son coût direct CIpc sera par nature (choix de la dégradation à prévenir) très inférieur au coût (direct + indirect) de la défaillance évitée [8] : $CIpc \ll Cic$

I. 5.2.3 La maintenance préventive Prévisionnelle

On peut juger la maintenance prévisionnelle comme un cas particulier de la maintenance conditionnelle. Elle est exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du système. La différence entre la maintenance prévisionnelle et la maintenance conditionnelle est qu'on ne fixe pas de seuils pour les indicateurs mais la décision est basée sur l'analyse de l'évolution de ces indicateurs pendant tout le processus de fonctionnement du système [1].

Généralement dans le milieu industriel, la combinaison entre la maintenance préventive et la maintenance corrective est à la fois nécessaire et implicite. En effet, la maintenance préventive peut réduire la probabilité de défaillance mais ne pourra pas juguler complètement la défaillance qui arrive aléatoirement. L'augmentation du nombre d'intervention préventive, permet de réduire les coûts et impacts de l'indisponibilité non maîtrisée du système mais provoque une augmentation du coût global par le biais de coûts d'inspection et d'exécution des maintenances préventives. Un des challenges pour le management est de trouver la balance optimale [1].

I. 6 Rôle de la maintenance industrielle

La maintenance industrielle est pour le rôle d'assurer la rentabilité des investissements matériels de l'entreprise en maintenant le potentiel d'activité et en tenant compte de la politique définie par l'entreprise.

La fonction maintenance sera donc doit considérer les :

- **Prévisions à long terme** : ordonnancement des charges, des stocks, des investissements en matériel.
- **Prévisions à moyen terme** : veiller à l'immobilisation des matériels à des moments qui perturbent le moins possible le programme de production.
- **Prévisions à court terme** : s'efforcer à réduire les temps d'immobilisation du matériel et des couts de ses interventions.

Une maintenance de bonne qualité passe par une meilleure gestion, et plus encore des approches différentes et des compétences reconnues. Cette nouvelle approche nécessite un changement complet de mentalité, le « compagnon » d'hier qui était un bon dépanneur et un très bon bricoleur doit désormais céder sa place au technicien polyvalent confirmé, dont la préoccupation ne sera pas l'immédiat mais traitera des problèmes en amont et définira la politique à mener en aval [9].

I.7 Niveaux de maintenance industrielle

I. 7. 1 Définition des niveaux de maintenance

Par définition, ce type d'action de maintenance rénovation, reconstruction...etc, est effectué par le constructeur, ou par une société spécialisée, avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication [10].

Dans l'application de la maintenance, les différents cas à intervenir sont déclinés selon leurs importances en cinq niveaux :

- **Premier niveau :**

Action simple prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessible sans démontage ou ouverture de bien, ou échange d'éléments consommable accessibles en toute sécurité, tels que voyant ou certain fusible...etc [11].

- **Deuxième niveau :**

Dépannage par remplacement standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineurs de maintenance préventive, comme la lubrification ou contrôle de bon fonctionnement [11].

- **Troisième niveau :**

Identification et diagnostique des pannes, réparation par remplacement de pièces ou d'éléments fonctionnels, petites réparation mécaniques et toute opérations courante de maintenance préventive tels que réglage général ou réalignement des appareils de mesure [11].

- **Quatrième niveau :**

Tous les travaux d'entretien majeurs autre que la remise à neuf et de la reconstruction. Ce niveau comprend également le réglage des équipements de mesure utilisés pour la maintenance et éventuellement la vérification des étalons de travaille par les organismes spécialisés [11].

- **Cinquième niveau :**

Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes, confiées à un atelier central ou à une unité extérieure.

Par définition ce type de travaux est donc effectué par le constructeur, ou par le reconstruteur avec des moyens définis par le constructeur et donc proche de la fabrication [11].

I. 8 Fonctions de la maintenance [8]

Les fonctions de la maintenance sont devisées en trois services (la fonction méthode, la fonction ordonnancement et la fonction réalisation).

La mission principale des fonctions de la maintenance est la gestion optimisée des composants et des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise et surtout la disponibilité de l'outil de production.

I. 8.1 La fonction Méthode

La fonction méthode est pour missions principales d'analyses du travail, la préparation des travaux de maintenance et l'exploitation des retours d'activités, dont le but initial est de diminuer le maximum possible les coûts de maintenance.

I. 8.2 La fonction Ordonnancement

La fonction ordonnancement est pour mission de planifications des travaux, la réparation et suivi du travail, ainsi la gestion des moyens logistiques.

La fonction ordonnancement permet l'intervention optimale avec tous les moyens nécessaires : personnel, outillage, préparation, dossier technique, moyens spéciaux (appareils de levage, etc.), pièce de rechange.

I. 8.3 La fonction Réalisation

La fonction réalisation a pour objectif d'utiliser les moyens mis à la disposition, suivant les procédures imposées dans les délais préconisés. La réalisation peut nécessiter un diagnostic, c'est-à-dire identifier et caractériser la défaillance.

La fonction réalisation regroupe à son terme :

- Les interventions correctives.
- Les interventions de point de vue préventives.
- Autres travaux.

I. 9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la maintenance industrielle de manière générale. Au premier lieu nous avons abordé le cadre historique de la maintenance industrielle et son évolution depuis sa naissance en 1940. Par la suite nous avons introduit à la définition de la notion maintenance et présenter ses nombreux objectifs. Puis on a touché tous les types de la maintenance en introduisant leur rôle et le rôle de la maintenance de façon globale dans l'industrie.

CHAPITRE II

Matériaux utilisés en génie électrique

II.1 Introduction

Les matériaux en génie électrique sont des matériaux utilisés dans la conception et la fabrication des dispositifs et systèmes électriques. Ces matériaux ont des propriétés spécifiques qui leur permettent de conduire, de stocker ou de transformer l'électricité de manière efficace. Les matériaux isolants sont l'un des types de ces derniers, ils sont utilisés pour isoler les composants électriques les uns des autres afin d'éviter les courts-circuits et l'endommagement des matériels. Le choix des matériaux isolants repose sur la connaissance optimale de leurs propriétés. Dans ce chapitre nous allons présenter deux différents types des isolants (gazeux, solide) ainsi leurs caractéristiques.

Les matériaux super-hydrophobes peuvent être également utilisés comme matériaux isolants, car leur capacité à repousser l'eau peut aider à prévenir les courts-circuits et les dommages électriques. Ce sont des matériaux qui ont la capacité de repousser l'eau de manière extrêmement efficace. Ces derniers sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les revêtements de surfaces isolantes pour améliorer la performance et l'efficacité des systèmes.

Dans ce chapitre nous découvrirons ce type de matériau à travers une exposition générale de ses propriétés. À la fin de ce chapitre, nous allons présenter le phénomène de décharge électrique et ses différents types.

II.2 Définitions

II.2.1 Isolants

Les matériaux isolants se distinguent des conducteurs par leur très grande résistivité supérieure à $10^{10}\Omega.m$ tandis que celle des conducteurs est inférieure à $10^{-6}\Omega.m$. Dans ces matériaux, tous les électrons sont fortement liés aux atomes du matériau, ils contiennent très peu d'électrons libres. L'énergie qu'il faut pour les libérer, et donc avoir de la conduction, est très grande notamment devant l'énergie thermique ou électrostatique. La mobilité des électrons y est quasi nulle. Le bon isolant doit limiter ou interdire le passage de courant lorsqu'il est soumis à une tension [12].

La résistance des matériaux isolants en CC doit être extrêmement grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif [13].

II.2.2 Isolation

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un ensemble de matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées [14].

En électricité, on dit isolation lorsqu'on parle d'un matériau ou un ensemble de matériaux qui ont la capacité d'empêcher le passage du courant entre deux conducteurs. Les matériaux dont on parle sont appelés des matériaux isolants.

L'isolation auto régénératrice est toute isolation qui peut être remise sous tension immédiatement après claquage. Par contre l'isolation non auto régénératrice, c'est toute isolation qui nécessite une intervention qui immobilise plus ou moins longtemps l'appareil touché [15].

II.2. 3 Isolement

L'isolement c'est l'état dans lequel un bien est en situation isolée. On appelle isolement d'un ouvrage, appareil électrique, son aptitude à supporter les contraintes électriques appliquées à celui-ci (U, E, ...). [16]

II.2. 4 Diélectrique

Un matériau diélectrique c'est un matériau qui ne contient pas de charges électriques et qui a la possibilité de se déplacer de façon macroscopique. Il est défini comme un milieu physique dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparés par une énergie supérieure à 5 eV. Ce milieu matériel peut être caractérisé par un solide, un liquide ou un gaz [17].

II.2. 5 Système d'isolation [18]

Un dispositif d'isolation se compose par des matériaux isolants ou une combinaison de matériaux isolants (isolations), qui doivent être pris en compte en liaison avec les parties conductrices associées.

Les isolants peuvent être classés en trois catégories : gazeux, liquides et solides.

II. 3 Différents types d'isolants utilisés dans notre étude

Dans notre étude nous s'intéressons à deux types d'isolants :

II. 3. 1 Isolants gazeux [14,19]

Les isolants gazeux sont utilisés beaucoup dans les équipements électriques. Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz électronégatifs (SF₆), gaz rares de l'air et l'hydrogène.

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

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

Les facteurs environnementaux (la température et la pression) exercent une influence significative sur les propriétés des isolants gazeux. Ces deux grandeurs physiques, lorsqu'elles varient, modifient la densité des gaz. Le champ électrique de rupture des gaz isolants diminue avec la température et augmente avec la pression.

II.3.1.1 Domaines d'application des isolants gazeux

Les isolants gazeux sont pour différentes utilisations :

- Ligne aérienne (l'air).
- Disjoncteur (l'air, SF₆, ...).
- Transformateur.
- Toutes les installations électriques HT et MT.
- Câbles coaxiaux à haute fréquence en télécommunication.

II.3. 2 Les isolants solides

Les isolants solides sont composés de matières minérales, organiques et résineuses [20] :

- Les isolants minéraux sont des substances siliceuses et calcaires solides à température ambiante, ininflammables et résistantes aux températures élevées, à l'exception des hydrocarbures (verre, produits céramiques, etc.).
- Les isolants d'origine organique sont généralement des matériaux fibreux à base de cellulose. Ces matériaux ont une bonne résistance mécanique, sont combustibles, ne supportent pas des températures supérieures à 100°C et ne perdent pas leurs propriétés mécaniques et diélectriques (cellulose, silicium).
- Les isolants d'origine résineuse sont généralement des matériaux organiques naturelles ou synthétiques qui peuvent être à l'état solide, thermoplastique ou plastique (caoutchouc, ...).

II. 3. 2. 1 Verre

Le verre est un matériau inorganique qui n'est pas un solide mais plutôt un liquide solidifié composé de dioxyde de silicium thermoplastique (SiO₂), et il est présent dans la nature sous forme de quartz. Chaque atome de silicium est situé au centre d'un tétraèdre et est lié à quatre atomes d'oxygène (Figure II.1) [21]. Le verre est utilisé dans les isolateurs de lignes à haute et moyenne

tension et présente l'avantage de pouvoir facilement détecter ses défauts grâce à sa transparence à la lumière visible.

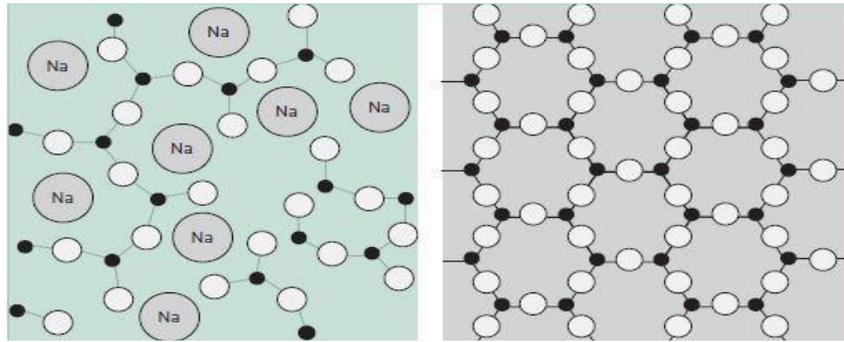


Figure II. 1 : Représentation schématique simplifiée des structures du verre (gauche) et du SiO₂ cristallin

II. 3. 2 Matériau superhydrophobe

La silicone est une substance synthétique à base de silicium et d'oxygène formant une quantité particulière de plastique. Les silicones, ou polysiloxanes, sont des polymères inorganiques formés d'une chaîne silicium oxygène (...-Si O Si O Si O- ...) sur laquelle des groupes se fixent sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques peuvent être utilisés pour relier entre elles plusieurs de ces chaînes Si-O. le type le plus courant est le polydiméthylsiloxane linéaire ou PDMS. Le silicium étant présent en proportion suffisante pour affecter les propriétés du produit de façon sensible.

Les silicones sont d'excellents isolants pour les applications hautes et moyenne tension en raison de leur structure moléculaire. Par exemple, les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de cheminement plus haut que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM. Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes. Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs. Aujourd'hui, on utilise les silicones isolantes dans toutes les applications MT et HT exigeant une super sécurité de fonctionnement et une grande longévité, par ex. dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les extrémités de câbles haute tension [22].

Les silicones représentées par quelques propriétés fondamentales qu'on peut citer comme suite [23] :

- Liaison Si-O 'forte' et grande inertie chimique ;
- Bonne tenue aux UV par rapport aux autres polymères ;
- Température de dégradation élevée ; Flexibilité à froid de la chaîne polymérique ;
- Température de transition vitreuse basse ;

Ils possèdent une stabilité remarquable aux intempéries et au vieillissement thermique. À titre d'exemple on peut citer l'estimation qui figure dans le tableau suivant :

Tableau I. 1 : Estimation de la durée de vie d'un élastomère de silicone

Température (°C)	Durée de vie (année)
90	40
150	5-10
200	2-5
250	0.25
315	0.04

Les valeurs des propriétés suscitées ont été tirées de la littérature

- Rigidité diélectrique 15 kV/mm ;
- Permittivité relative à 25 °C est de 5,4 ;
- Facteur de dissipation diélectrique à 25 °C est 10 kHz ; $\text{tg } \delta = 4 \text{ à } 5.10^{-3}$;
- Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m. K ;
- Température d'auto-inflammation est le plus grand à 300 °C ;
- Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m³.

II. 3. 2. 3 Domaine d'application des diélectriques solides

Les isolants solides ont des différentes applications tel que :

- Lignes de transport d'énergie (polymères).
- Câbles de télécommunication (papier et cartons).
- Transformateurs (papier et cartons).
- Moteurs électriques.
- Condensateurs haute tension (polypropylène).
- Alternateurs.
- Lignes aériennes et d'antennes (céramique).

II. 4 Caractéristiques des matériaux isolants (Diélectriques)

Par définition, une propriété d'un matériau est définie comme étant la mesure d'un comportement par un essai [15].

Les propriétés des matériaux distinguent par différents famille. En focalisant sur les propriétés électriques.

II.4.1 Propriétés électriques

Les propriétés électriques de l'isolation des conducteurs ou du stockage d'énergie son d'une grande importance dans ses fonctions. Parmi ces propriétés électriques importantes on peut citer la permittivité diélectrique, la rigidité et la résistivité [24].

II.4.1.1 Résistivité

On peut distinguer trois types de résistivité [15] :

II.4.1.1.1 Résistivité superficielle (R_s)

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

II.4.1.1.2 Résistance transversale (R_t)

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

II.4.1.1.3 Résistance d'isolement (R_i)

Elle 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.

II.4.1.2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique du matériau isolant représente la valeur maximale du champ électrique que le matériau endure avant l'apparition de l'arc électrique, en pratique, la rigidité diélectrique est définie comme le rapport entre la tension à laquelle une perforation se produit dans les conditions de test spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles la tension est appliquée.

Deux types de rigidité peuvent être distingués, en fonction des positions relatives des conducteurs et des surfaces des matériaux :

- La rigidité diélectrique transversale (RDT), pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau.

- La rigidité diélectrique longitudinale (RDL), obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de d'isolant [24].

II.4.1.3 Permittivité

Lorsqu'un isolant diélectrique est exposé à un champ électrique, cela entraîne des modifications au niveau moléculaire qui créent un champ électrique propre (E_p) à l'intérieur du matériau. Ce champ électrique interne s'oppose alors à l'application du champ électrique externe (E_{ext}) (Figure II.2). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r . Alors, la permittivité est une caractéristique importante de l'isolation électrique [25,26].

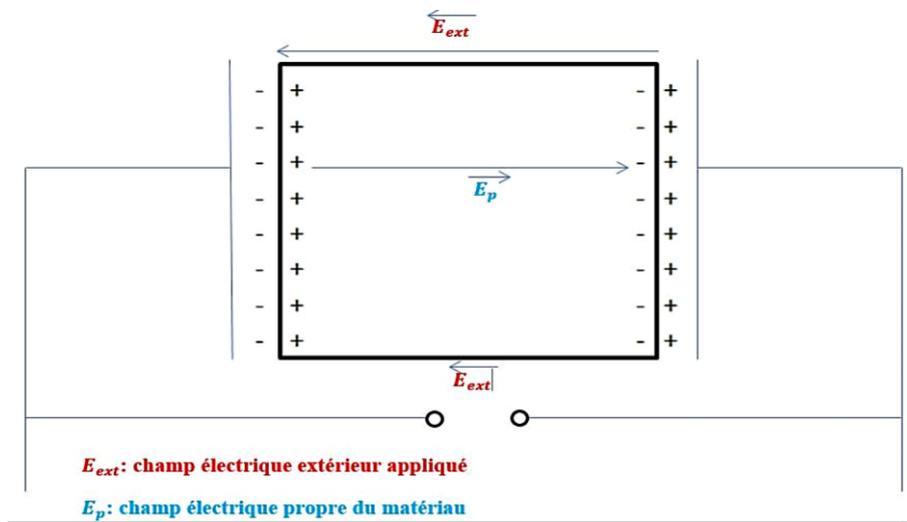


Figure II.2 : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

II.4.1.4 Facteur de pertes

Les isolants soumis à un champ électrique alternatif présentent des pertes diélectriques causées par les courants de conduction et d'absorption qui les traversent. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Figure II. 3). Le courant total qui traverse l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\varphi < \pi/2$. Son complément δ est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle $\text{tg } \delta$ est appelée facteur de dissipation (ou de pertes) [27].

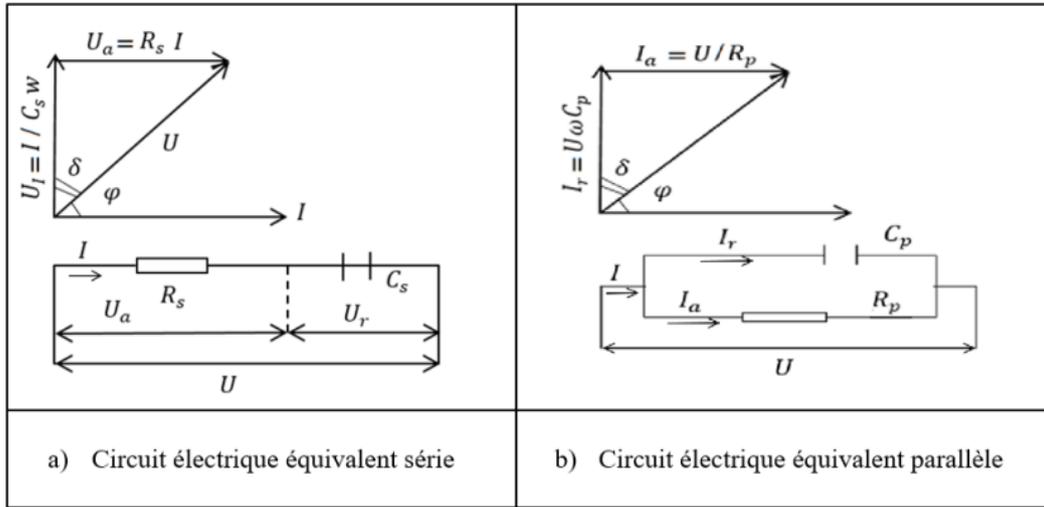


Figure II. 3 : Circuit électrique équivalent série et parallèle

II. 5 Propriétés super hydrophobe

II.5.1 Définition de la mouillabilité

La mouillabilité est liée au phénomène de mouillage qui correspond à la capacité d'un produit à mouiller une surface. Ce phénomène est crucial dans les processus de collage. En général, lorsqu'un liquide entre en contact avec la surface solide, un angle de contact est formé entre les deux. Lorsque le mouillage est optimal, l'angle de contact devient nul. Ce qui correspond à une adhésion est maximal. La qualité du mouillage dépend de facteurs tels que la pression, de la température et l'humidité pour un système liquide-solide donné [28].

II.5.1.2 Non-mouillabilité

La non-mouillabilité se réfère la capacité de la surface d'un matériau ne pas pouvoir former de liaisons hydrogène avec une goutte d'eau, ce qui empêche l'eau de se répandre sur la surface [29].

II.5.1.3 Angle de contact

On appelle angle de contact θ , l'angle que fait une goutte d'eau avec la surface sur laquelle se trouve archivée. Sa valeur varie entre 0 et 180°selon la nature de la surface (super hydrophile, hydrophile, hydrophobe, super hydrophobe) en contact [30].

II.5.2 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact

Si l'angle de contact est presque égal à 0°, alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite super hydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Figure. II. 4A).

Si l'angle de contact est inférieur à 90°, alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite hydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Figure. II. 4B).

Si l'angle de contact est compris entre 90° et 150°, alors la surface est hydrophobe et la goutte d'eau sera bombée (Figure. II. 4C).

Si l'angle de contact est compris entre 150° et 180° , on dit que la surface est super hydrophobe et la goutte d'eau sera presque sphérique (Figure. II. 4D) [30].

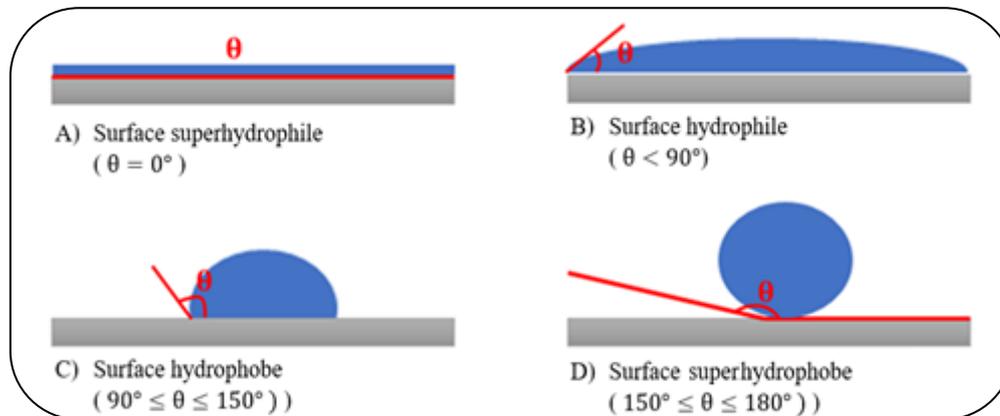


Figure II.4 : Comportement d'une goutte sur une surface [31]

II.5.2.1 Surface super hydrophile

Une surface super hydrophile est une surface ayant un angle de contact presque égal 0° avec une goutte d'eau [32].

II.5.2.2 Hydrophile

L'Hydrophile est un composé qui a une affinité pour l'eau et tendance à s'y dissoudre. Il est également ionique. Soluble dans l'eau (hydrosoluble) ou les solvants polaires. La cellulose (coton), très hydrophile, est insoluble dans la plupart des solvants en raison sa forte cohésion. Le savon, amphiphile, est soluble dans l'eau et l'huile, ce qui l'explique le pouvoir détergent. Les composés hydrophiles sont généralement polaires. Cela lui permet de créer forme des liaisons hydrogène avec l'eau ou un solvant polaire. Il contient au moins un ensemble de fonctionnelles, comme les amines, les alcools ou les cétones, Certaines molécules hydrophiles ne insolubles, ils peuvent former des colloïdes [33].

II.5.2.3 Hydrophobicité

L'Hydrophobicité caractérise une surface qui repousse l'eau, et plus généralement, c'est une propriété des objets moléculaires d'être insolubles dans l'eau ou dans les produits polaires, provoque la séparation de l'objet du solvant (et vice versa).

À l'échelle atomique, les molécules hydrophobes ne se lient pas avec l'eau, une molécule polaire. Il est donc insoluble dans l'eau, ce qui signifie que les deux composés sont mutuellement exclusifs. Une goutte d'eau posée sur une surface hydrophile n'est pas courbée, c'est-à-dire que son angle de contact inférieur à un angle droit. Plus tempes de rejet de la goutte est long, plus la surface est hydrophobe [33].

II.5.2.4 Super hydrophobicité

Super hydrophobicité est une surface extrêmement difficile à mouiller (avec l'eau, et a priori avec n'importe quel liquide). Il est décrit par la loi de Cassie, selon l'angle des contacts supérieurs à 150° ne permettent pas à l'eau de coller. La nature nous fournit des exemples éminents de surfaces super hydrophobes, compris les feuilles de lotus l'eau s'écoule sans les mouiller.

Les surfaces super hydrophobes sont en fait des surfaces à revêtement nano-revêtues, telles que ces fleurs de Lotus (Figure.II.5). Un nano-revêtu se caractérise par sa rugosité à l'échelle nanométrique [33].



Figure II. 5 : Feuille de lotus [33]

II.5.3 Modèles de surfaces super hydrophobes

Selon la littérature, il existe deux modèles qui permettent de décrire comment la morphologie des surfaces texturées affecte le mouillage. Par exemple, le premier modèle c'est le modèle de Wenzel [34], décrit une surface rugueuse qui est complètement mouillée par le liquide. Le deuxième modèle, appelé le modèle de Cassie-Baxter [35], décrit le mouillage d'une surface rugueuse lorsque le liquide ne pénètre pas dans les crevasses.

Généralement le modèle de Wenzel est utilisé pour les surfaces texturées physiquement, et celui de Cassie-Baxter utilisé pour les surfaces texturées chimiquement. Parfois, il est possible de combiner ces deux modèles pour créer des surfaces composites [34,35].

II.5.3.1 Selon Wenzel (1936) [34]

Si la goutte est censée épouser la rugosité du solide (comme illustré dans la Figure II.6.a), cela implique que l'énergie impliquées pour les interfaces solide/vapeur et solide/liquide sont respectivement γSV et γSL , où g la rugosité, définie comme rapport de la surface réelle du matériau à sa surface apparente ($g > 1$). En conséquence l'angle apparent θ^* de la goutte peut être exprimé en fonction de l'angle de Young θ_e (Équation II.1) :

$$\cos \theta^* = g \cos \theta \quad (\text{II.1})$$

II.5.3.2 Selon Cassie (1944) [35]

Si Le liquide risque de n'a pas d'affinité pour solide. Il risque de ne pas s'y conformer et de reposer plutôt sur les sommets des aspérités, laissant de l'air en dessous (Figure II.6.b). En basant sur le cas simple d'une structure en créneaux, on peut constater que la base goutte touchera le solide sur la fraction φ_s de la surface occupée par les sommets des créneaux, tandis que la fraction restante ($1 - \varphi_s$) sera en contact avec l'air. Les angles observés sur ces deux milieux sont θ et 180° , respectivement, et l'angle apparent sera une moyenne pondérée de ces deux valeurs (calculée à partir des cosinus de ces angles, comme la relation de Young) (Équation II.2). Ainsi, on peut exprimer l'angle apparent sur une telle surface composite comme suit, selon Cassie.

$$\cos \theta^* = \varphi_s \cos \theta_e - (1 - \varphi_s) \quad (\text{II.2})$$

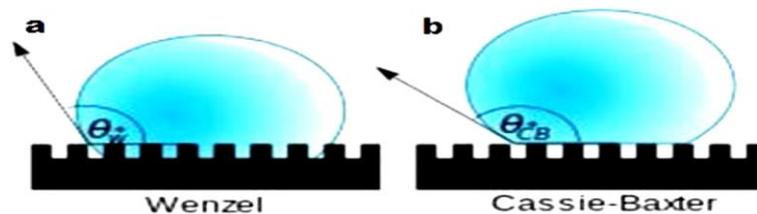


Figure II.6 : Schéma des gouttes d'eau déposées sur des surfaces super hydrophobes dont la rugosité est faite de piliers micrométriques, en état Wenzel (a) et en état Cassie-Baxter (b)

II.5.4 Techniques de préparation de surfaces super hydrophobes

Plusieurs méthodes existantes dans la littérature ont été utilisées par des chercheurs afin de produire ce type de surface :

II.5.4.1 Dépôt par vapeur chimique

Le procédé de cette technique consiste à exposer un substrat à une vapeur chimique produisant un certain dépôt désiré qui se décompose ou réagit à la surface. C'est une méthode assez coûteuse, du fait qu'elle nécessite une chambre qui contrôle la pression et la température [36].

II.5.4.2 Dépôt électrochimique

Cette méthode consiste à déposer deux substrats dans un liquide, l'un est considéré anode tandis que l'autre joue le rôle d'une cathode. Certains composés sont déposés sur les surfaces, leur nature ainsi que leur forme dépendent du substrat (anode ou cathode) [37].

II. 5.4.3 Photolithographie

Ce procédé permet d'obtenir des topographies continues. Il consiste à enduire une surface d'un film mince de photo résine ou de polymère, puis la radier avec un faisceau lumineux de haute précision. Cette méthode est utilisée en électronique [38].

II.5.4.4 Techniques utilisant le plasma

Le plasma peut être utilisé comme étant une technique de déposition (les ions déposent ceux pris dans un bain de vapeurs chimiques sur la surface) ou d'arrachement de matière, ce dernier est généralement utilisé en nano-fabrication des surfaces [39].

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

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

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

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

II.7 Contournement

Il s'agit d'une décharge disruptive accompagnée d'étincelles qui se propage le long de l'interface d'un isolateur d'une électrode vers une autre [40].

II. 7. 1 Tension de tenue

La tension de tenue est un paramètre essentiel pour évaluer la capacité d'un matériau isolant à résister à des tensions élevées sans subir de décharge disruptive. Elle représente la valeur maximale de tension que le matériau peut supporter avant qu'une rupture électrique se produise. Cette propriété est cruciale dans de nombreux domaines [40].

II.7. 2 Ligne de fuite

La ligne de fuite correspond à la distance la plus courte entre deux parties conductrices, à travers la surface d'un isolant [41].

II.7. 3 Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de la ligne de fuite [42].

Dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante, provoque la formation d'une couche électrolytique.

II. 8 Conclusion

Les matériaux isolants en haute tension sont des éléments critiques dans les équipements électriques pour assurer leur fonctionnement. Ceux-ci doivent pouvoir résister à des hautes tensions électriques sans se détériorer ou présenter une décharge électrique dangereuse.

Dans ce chapitre nous avons s'intéressé aux types des matériaux isolants solides, gazeux et les matériaux super hydrophobes qui sont également utiles dans les installations électriques haute tension pour minimiser et limiter les risques de court-circuit. Ces matériaux présentent des propriétés uniques qui peuvent aider à maintenir la sécurité des équipements électriques.

CHAPITRE III

Partie expérimentale

III.1 Introduction

La connaissance des conditions optimales d'exploitation des barrières isolantes est très importante pour leurs utilisations dans le domaine de la haute tension et l'industrie. Pour cela l'étude de phénomène de la distribution du champ est impérative.

Dans ce chapitre nous allons voir le comportement de la tension disruptive dans la configuration pointe-pointe et la configuration pointe-plan sans et avec barrières isolantes. Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus des différents essais menés dans le laboratoire de haute tension de l'Université de Bejaïa.

III.2 Circuit de mesure et de visualisation

La mesure de la performance du système avec barrière et la visualisation de la décharge électrique évoluant dans l'espace inter électrode de celui-ci, ont été effectuées à l'aide du schéma électrique illustré par la figure III.1. Le circuit de mesure de la tension de disruption du système considéré est composé d'un transformateur Tr dont la variation temporelle de sa rampe peut être obtenue automatiquement à l'aide de l'appareil de commande manuelle ou automatique SG. La tension d'essai est lue directement sur un voltmètre de crête Vc (DC/AC) à affichage numérique. Une résistance de protection Ra et un diviseur de tension résistif Ro/Ru auquel est connecté en parallèle notre objet d'essai Oe , bouclent le circuit électrique.

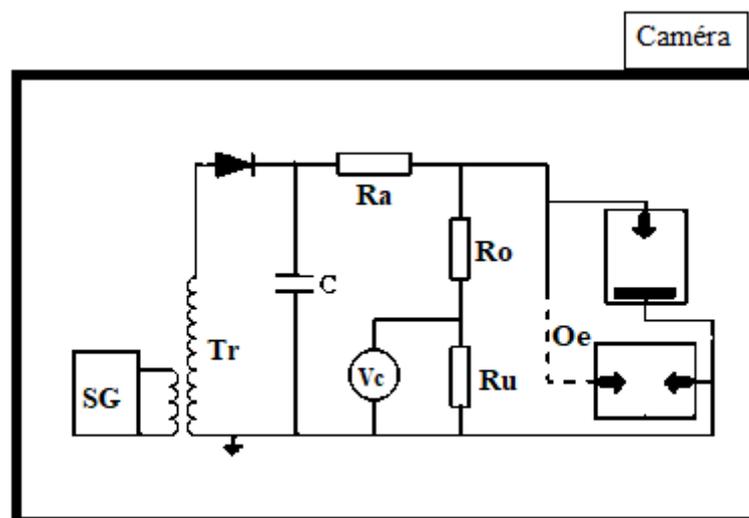


Figure III. 1 : Schéma de mesure et de visualisation

Notre étude expérimentale consiste à appliquer une haute tension continue à l'électrode haute tension et relever cette dernière lors du claquage, sachant que la deuxième électrode de différentes géométries (plan, pointe) est reliée directement à la terre.

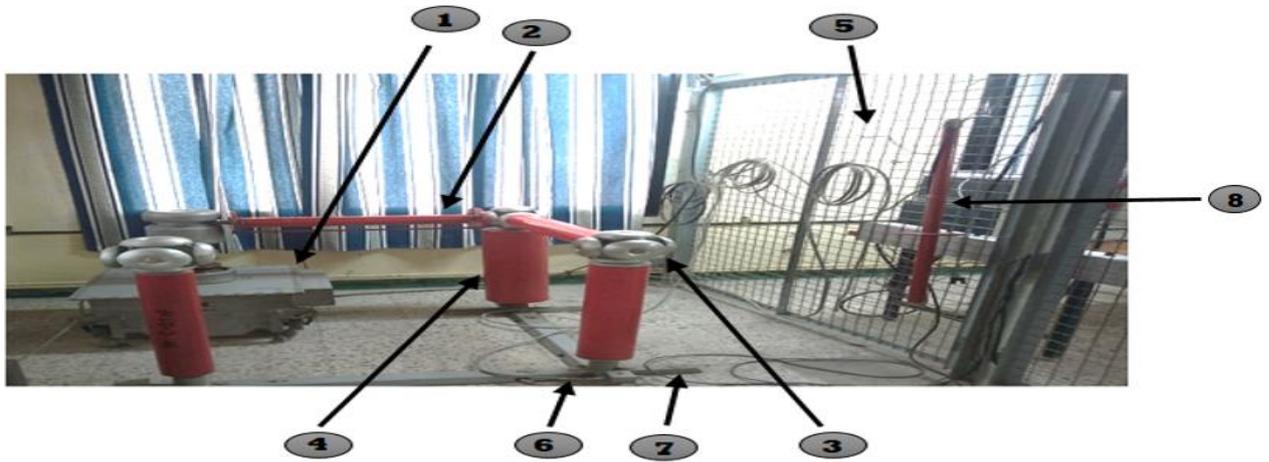


Figure III. 2 : Photo de la source de haute tension

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. Transformateur haut tension. | 5. Grille de protection. |
| 2. Diode. | 6. Support d'éléments. |
| 3. Nœud de liaison. | 7. Câble coaxial. |
| 4. Condensateur haut tension. | 8. La perche reliée à la terre. |



Figure III. 3 : Photo de la source basse tension SG1



Figure III. 4 : Photo du voltmètre de crête

III.3 Préparation de la surface isolante

III.3.1 Préparation de la pollution

La solution polluante contient essentiellement l'eau distillée, 40 g de kaolin par litre d'eau pour l'épaississement de la couche polluante, et du chlorure de sodium dont la proportion est déterminée selon la conductivité volumique désirée de la solution, mesuré en utilisant un conductimètre à sonde mobile. La conductivité volumique utilisée dans le cadre de cette étude est égale à 30 mS/cm.

III.3.2 Mode d'application de la solution polluante

Une répartition uniforme de la pollution sur toute la surface extérieure du tube ainsi qu'intérieure, a été obtenue en émergeant le tube dans la solution de pollution préparée. La mesure de la tension disruptive se fait immédiatement après l'application de la pollution afin d'éviter son assèchement naturel.

III.3.3 Réalisation d'une surface super hydrophobe

Pour la préparation d'une couche superhydrophobe nous avons suivi les étapes suivantes :

- ✓ Préparation de la surface : nettoyer soigneusement le tube en verre avec l'alcool et un chiffon propre jusqu'à ce qu'il soit sain.
- ✓ Revêtement : on a entouré le tube avec une couche uniforme de silicone à l'aide d'un pinceau fin en veillant à ce que la surface soit uniformément recouverte. Ensuite, on a placé le tube sous une source de brulure jusqu'à l'obtention d'une surface superhydrophobe.
- ✓ Test de la surface : après une durée de 24h, en mettant une goutte d'eau sur la surface du tube, si l'eau forme des gouttelettes sphériques sans laisser de traces alors, veut dire que celle – ci est superhydrophobe.



Figure III. 5 : Etapes essentielles de fabrication d'un revêtement superhydrophobe

III.4 Dispositif expérimental et techniques de mesure

III.4.1 Modèles expérimentaux

Les modèles expérimentaux des systèmes (pointe-pointe) et (pointe-plan) utilisé lors de ces investigations est illustré par les figures (III.6, III.7). Ils ont été réalisés au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia.

III.4.1.1 Modèle pointe-pointe

Le premier modèle expérimental, illustré par la figure (figure.III.6), est composé d'un système (pointe-barrière-pointe).

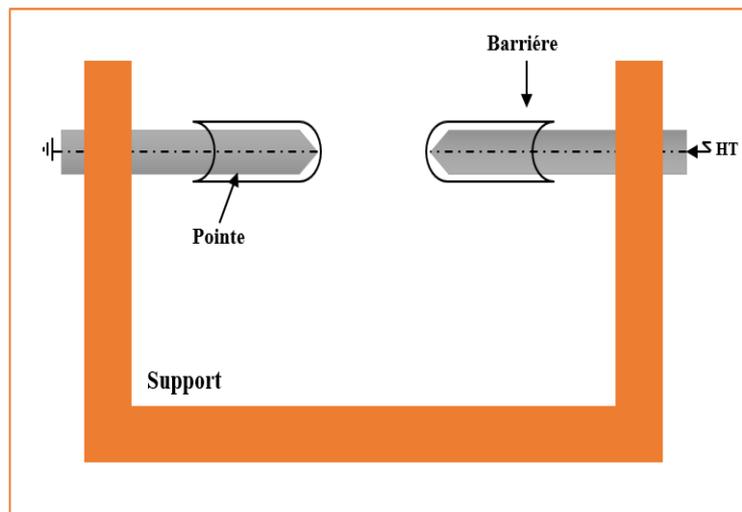


Figure I. 6 : Dispositif expérimental (pointe-pointe)

III.4.1.2 Modèle pointe-plan

Modèle expérimental du système (pointe-barrière-plan) est illustré par la figure (figure.III.7). L'électrode reliait à la terre se termine par un plan circulaire de diamètre de 400 mm.

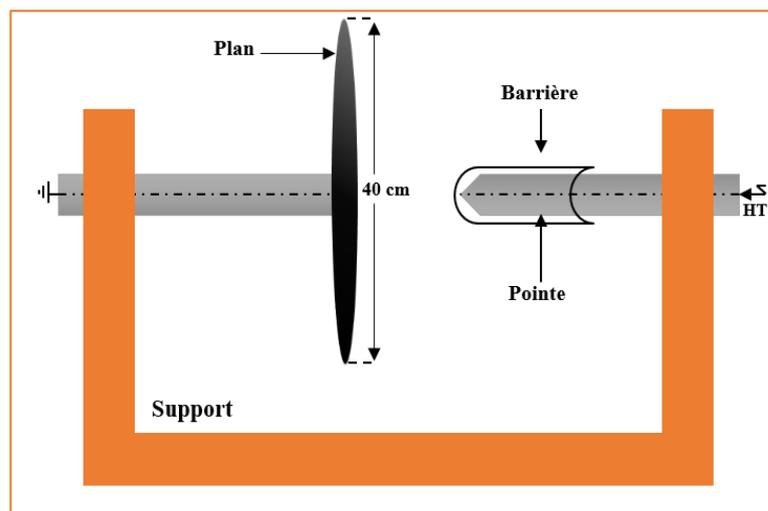


Figure III. 7 : Dispositif expérimental (pointe-plan)

III.4.2 Protocole expérimental

Après avoir relever et vérifier les conditions atmosphériques dans le laboratoire à savoir la température (T), l'humidité (H) et la pression (P) qui sont pris en considération avant chaque test et de procéder au contrôle d'éventuels résidus de la décharge de claquage lors des essais en utilisant une perche, et notant chaque valeur de la tension de claquage.

III.4.2.1 Modèle pointe-pointe

Dans le cadre de notre étude sur l'évolution de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrode, nous avons utilisé la configuration pointe-barrière isolante-pointe. Pour cela, nous avons basé nos séries d'essais sur deux types de barrières tubulaires en verre, l'une ayant une longueur de 5 cm et l'autre une longueur de 10 cm. Nous avons réalisé une série de 25 essais pour chaque cas expérimental que nous détaillons ci-dessous :

- ✓ Sans barrière tubulaire : Ce premier cas correspond à l'essai sans barrière isolante, qui servira de point de référence dans notre étude.
- ✓ Propre : Nous avons utilisé des barrières tubulaires en verre propre pour cette série d'essais. Nous avons réalisé des essais pour une seule barrière, puis pour deux barrières.
- ✓ Pollué : Pour étudier les effets de la pollution, nous avons utilisé une solution pour polluer les barrières tubulaires isolantes. Nous avons effectué des essais pour une barrière tubulaire en verre polluée, puis pour deux barrières tubulaires isolantes polluées.
- ✓ Revêtement super hydrophobe : Dans ce cas, on a utilisé des barrières tubulaires en verre avec couche superhydrophobe. Nous avons effectué des essais pour une barrière isolante avec ce revêtement, puis pour deux barrières isolantes.

III.4.2.2 Modèle pointe-plan

Nous avons mené une étude sur l'évolution de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrode, en utilisant la configuration pointe-barrière isolante-plan. Pour cela, nous avons effectué des séries d'essais en utilisant deux types de barrières tubulaires en verre : une de 5 cm de longueur et l'autre de 10 cm de longueur. Nous avons réalisé 25 essais pour chaque cas expérimental que nous décrivons ci-dessous :

- ✓ Cas sans barrière tubulaire : Cette première série d'essais correspond à la configuration sans barrière isolante, qui servira de référence dans notre étude.
- ✓ Cas avec barrière tubulaire propre : Nous avons utilisé une barrière tubulaire en verre propre pour cette série d'essais.
- ✓ Cas avec barrière tubulaire polluée : Dans le but d'étudier les effets de la pollution, nous avons préparé une solution à base d'eau, de kaolin et de sel au laboratoire de l'université. Cette

solution a été utilisée pour polluer les barrières tubulaires isolantes. Nous avons effectué des essais en utilisant une barrière tubulaire en verre polluée.

- ✓ Cas avec barrière tubulaire revêtue d'un revêtement super hydrophobe : Dans ce cas, nous avons utilisé une barrière tubulaire en verre recouverte d'un revêtement super hydrophobe préparé au laboratoire de l'université (Figure III.5). Nous avons réalisé des essais en utilisant cette barrière tubulaire isolante avec le revêtement.

III.5 Configuration pointe-pointe

La caractérisation des décharges électriques évoluant dans l'intervalle d'air pointe - pointe sous tension continue positive a été réalisée pour des barrières tubulaires en verre propre, polluée ou avec revêtement superhydrophobe pour les longueurs de barrière tubulaire de 10 cm et 5 cm pour chaque cas. Les résultats de mesure de la tension de disruption du système en fonction de la distance inter électrode pointe-pointe sont illustrés par les figures (III.9, III.10, III.12, III.13, III.15, III.16).

III.5.1 Configuration pointe-barrière tubulaire propre-pointe

Dans le cas propre, nous avons réalisé des essais sur le système pointe – pointe, pointe – barrière – pointe et pointe – 2 barrières – pointe, la différence du chemin de la décharge électrique est montrée dans la figure.II. 8.



Figure III. 8 : Trajet de la décharge électrique disruptive de système pointe – pointe sans et avec barrière propre

Les figures (III.9 et III.10) représentent la tension disruptive d'un intervalle d'air variable mesurée sans barrière isolante, avec une seule barrière tubulaire isolante en verre propre ou deux barrières tubulaires en verre propres.

Nous remarquons que pour chaque cas de figure ($l_b = 10$ cm ou $l_b = 5$ cm), la valeur de la tension augmente progressivement avec la distance inter-électrode comprise entre 2 cm et 10 cm. Nous pouvons observer que la présence d'une seule barrière isolante en verre propre augmente la tension disruptive et donne une certaine protection par rapport au système sans barrière isolante.

Il résulte qu'après l'introduction de deux tubes isolants propres et secs, la tension disruptive augmente par rapport à celle obtenue dans le cas d'un système pointe - pointe sans barrière d'une part et avec une seule barrière d'autre part et elle croît avec l'élévation de la distance inter-électrode. L'introduction de la deuxième barrière tributaire a amélioré la performance de notre système. Cela signifie que l'ajout d'une barrière isolante peut fournir un niveau de protection élevé contre le claquage pour les distances inter-électrode.

Il est remarquable aussi que la tension de claquage est plus importante lorsque nous utilisons des barrières tubulaires de longueur $l_b = 10$ cm en comparant avec les barrières tubulaires celles d'une longueur $l_b = 5$ cm.

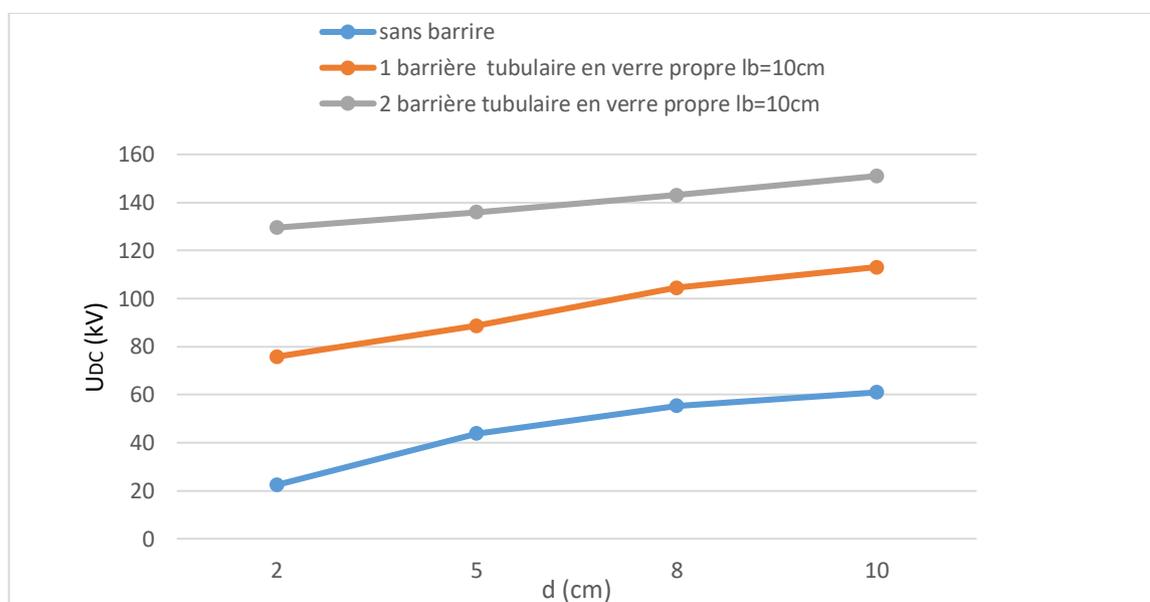


Figure III. 9 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe-pointe (sans barrière isolante et protégée avec une barrière isolante et deux barrières isolante en verre propre ($l_b = 10$ cm))

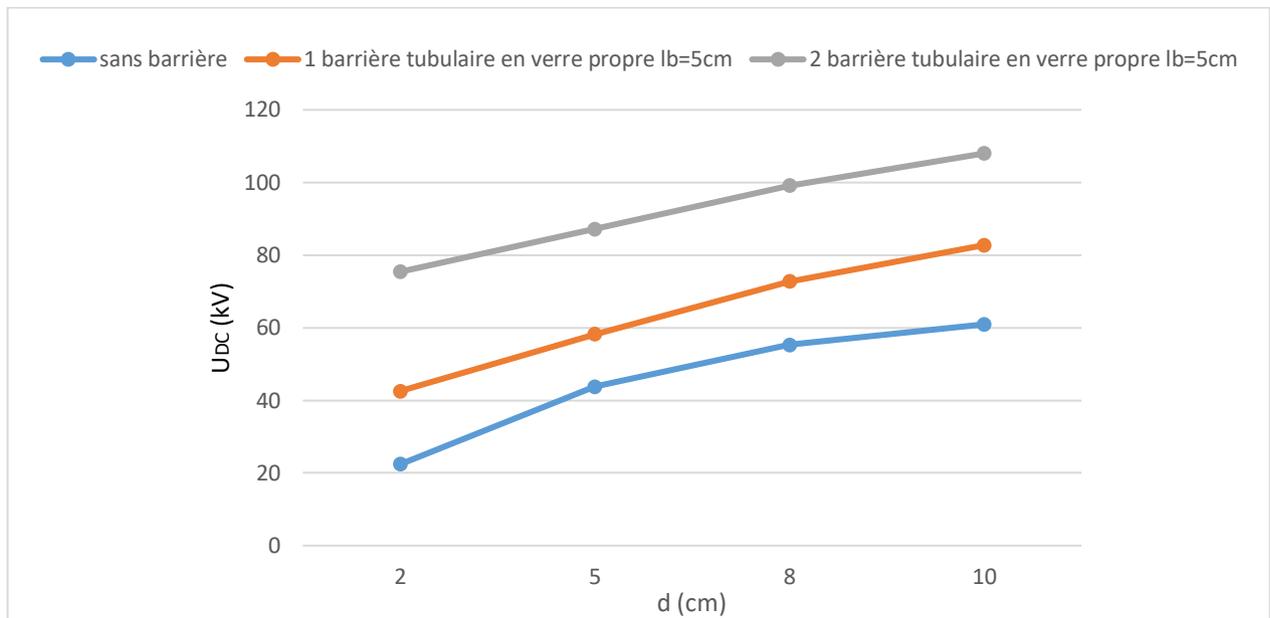


Figure III. 10 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe-pointe (sans barrière isolante et protégée avec une barrière isolante et deux barrière isolante en verre propre ($l_b = 5 \text{ cm}$))

III.5.2 Configuration pointe-barrière polluée-pointe

Nous avons réalisé des essais sur le système pointe – pointe pour le cas pollué. Le chemin de la décharge est montré sur la figure III.11 pour les différentes configurations étudiées.



Figure III. 11 : Trajet de la décharge électrique disruptive d'un système pointe – pointe sans et avec barrière polluée

Nous remarquons dans les deux figures (III.12 et III.13) que la courbe de la tension disruptive dans le cas où nous avons utilisé une seule barrière tubulaire en verre polluée est presque collée à celle sans barrière et la tension disruptive mesurée est très fiable, quel que soit la longueur de tube. Donc, dans le cas contaminé, la taille de la barrière n'a pas d'influence.

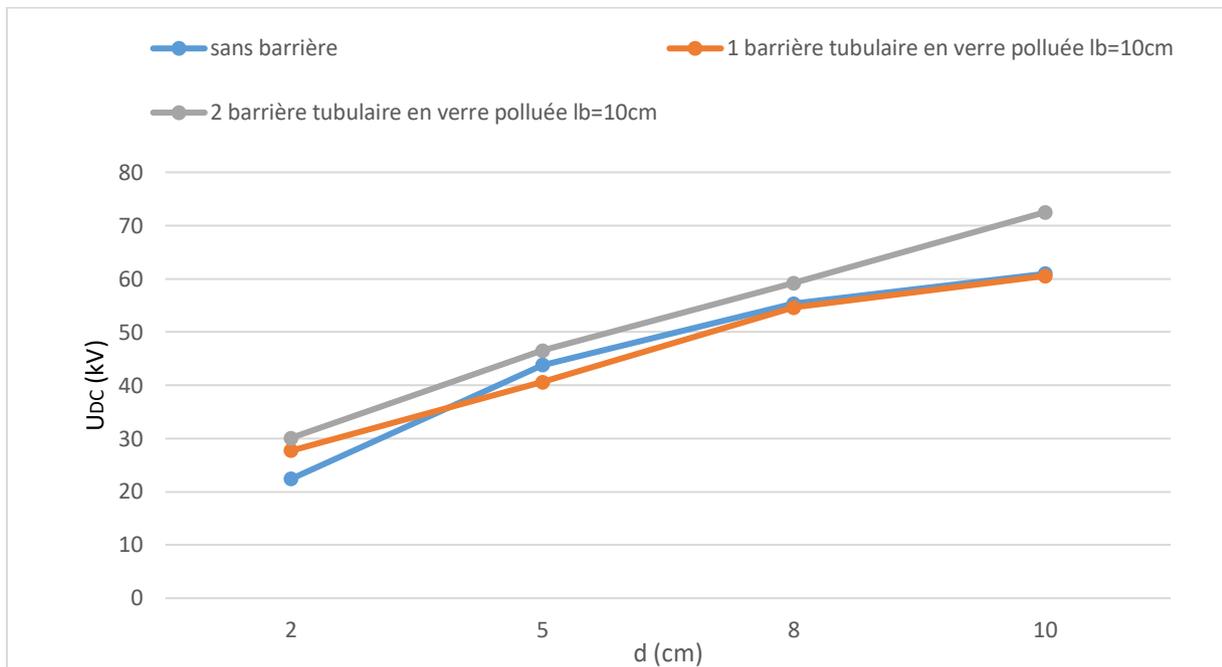


Figure III. 12 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe - pointe (sans barrière isolante, protégé avec 1 barrière isolante polluée ou 2 barrières isolantes en verre polluées ($l_b = 10$ cm))

En résulte que dans les conditions de contamination et de pollution d'une surface tubulaire isolante n'assure aucune protection pour notre système et n'a aucune utilité. Ceci est dû au comportement très conducteur de la couche de pollution recouvrant leur surface.

Le petit écart de la tension disruptive par rapport à celle sans barrière et avec une seule barrière polluée est causé par l'ajout d'une deuxième barrière tubulaire. Cette augmentation de la tension de claquage bien précisément été dans l'intervalle de distance inter-électrode entre 8cm et 10 cm, représente une petite amélioration dans la protection de notre système qui peut être négligeable et ne reste toujours pas performante à cause de la couche de pollution présente sur la surface des tubes qui fait augmenter la probabilité de claquage.

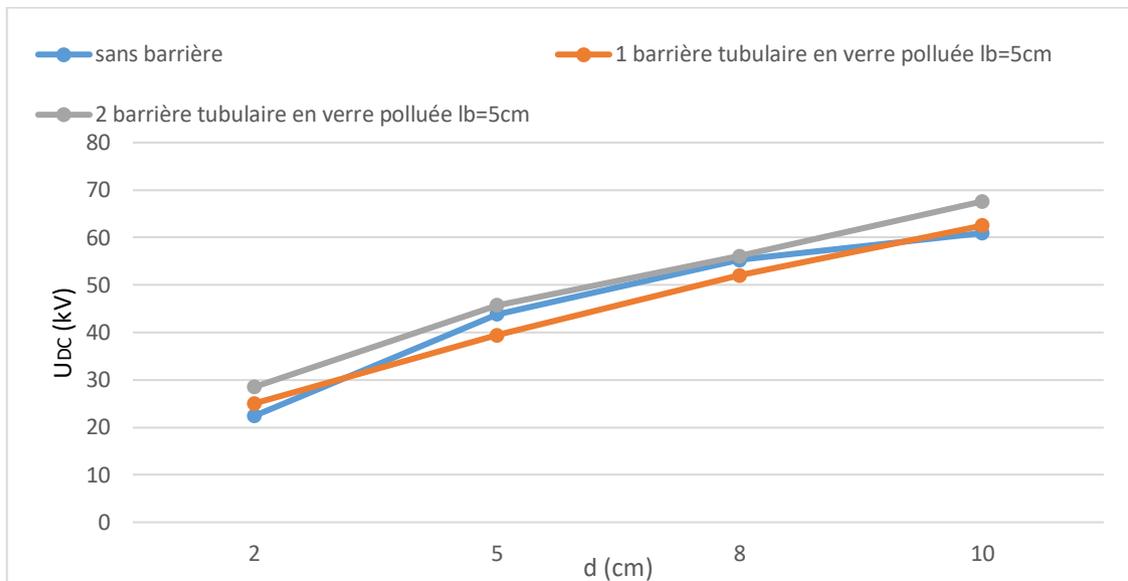


Figure III. 13 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe - pointe (sans barrière isolante, protégé avec 1 barrière isolante polluée ou 2 barrières isolantes en verre polluées (l_b = 5 cm))

Il est remarquable que la tension disruptive dans le cas de système pointe-pointe avec barrière polluée enregistre une diminution importante dans cette dernière par rapport au cas de système pointe-pointe avec barrière tubulaire propre figure III.9 et figure III.10. Cela nécessite dans le cas réel une maintenance de notre système en termes de nettoyage régulière pour empêcher les contaminant de la surface isolante ou bien utiliser la technique de revêtement de surface pour améliorer les performances et la protection de notre système.

III. 5.3 Configuration pointe - barrière tubulaire avec revêtement superhydrophobe – pointe

Dans ce cas, nous avons réalisé des essais sur le système pointe – pointe pour visualiser la différence concernant le chemin de décharge lorsque nous utilisons les barrières isolantes avec revêtement superhydrophobe en comparant avec le cas sans barrière (figure III.14).



Figure III. 14 : Trajet de la décharge électrique disruptive de système pointe – pointe sans barrière et avec barrière avec revêtement superhydrophobe

L'illustration de la tension disruptive d'un intervalle d'air variable mesuré pour les cas sans barrière isolante, une seule barrière tubulaire isolante en verre avec couche superhydrophobe ou pour deux barrières tubulaires en verre avec revêtement superhydrophobe est représenté dans la figure III.15 pour les tubes de $l_b = 10$ cm et la figure III.16 pour les tubes de $l_b = 5$ cm.

En présence d'une couche superhydrophobe sur la surface des tubes utilisés, les figures (III.15 et III.16) ont montré une élévation importante de la tension de claquage. Par conséquent l'application de revêtement sur la surface tubulaire a limité la présence des contaminants et de l'humidité sur la surface ce qui offre un avantage à notre système de tel sorte que les tensions de claquages soient plus élevées. D'après les courbes obtenues en figures (III.15 et III.16), nous remarquons que la taille de la barrière tubulaire utilisée influe positivement sur la tension de claquage, en remarquant que la tension disruptive est plus élevée vis-à-vis l'augmentation de la distance inter électrode lorsque nous avons utilisé des tubes de longueur $l_b = 10$ cm par rapport au type de tubes de longueur $l_b = 5$ cm, dans le cas d'une seule barrière isolante et de deux barrières isolantes.

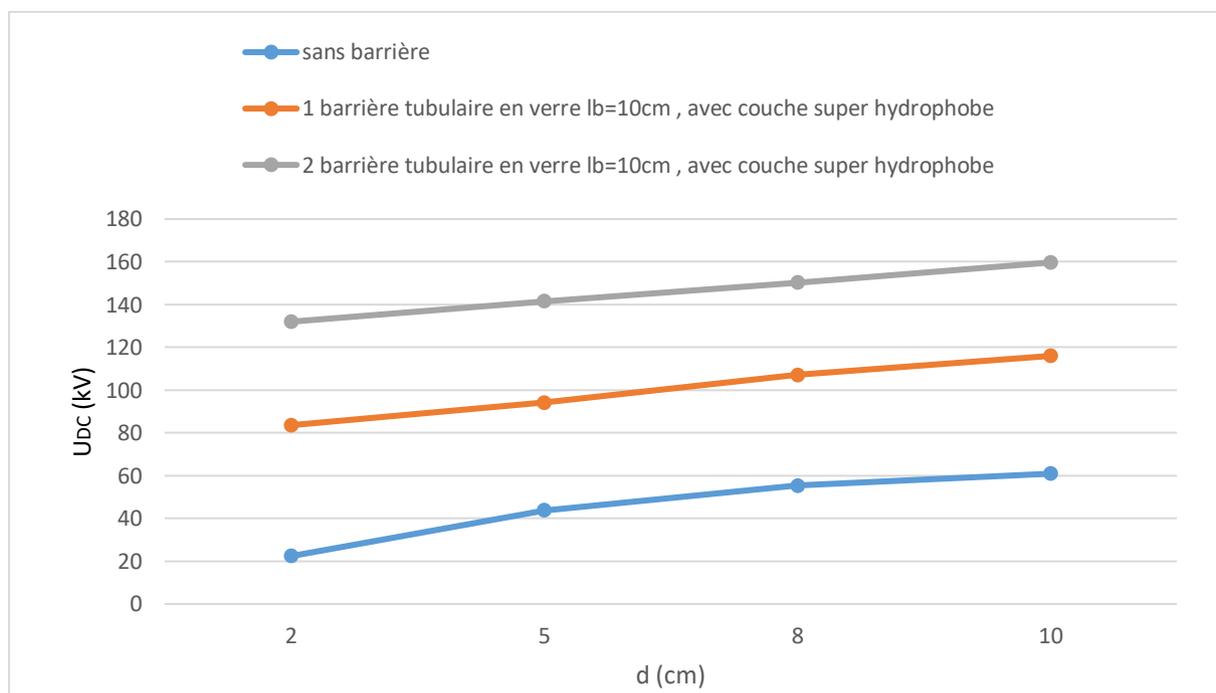


Figure III. 15 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe - pointe (sans barrière isolante, protégé avec 1 barrière isolante avec revêtement superhydrophobe ou 2 barrières isolantes en verre avec revêtement superhydrophobe ($l_b = 10$ cm))

Il est à souligner que l'utilisation de deux barrières tubulaires en verre avec revêtement superhydrophobe présentent un écart important dans la valeur de la tension de claquage a été enregistré par rapport aux autres cas de configurations de notre système. Comme exemple, la protection offerte à ce système dans le cas de 2 barrières tubulaires avec revêtement pour la taille de tubes $l_b = 10$ cm est de loin la meilleure, la valeur U_{DC} touche le seuil de 160 kV pour la distance inter

électrode de 10 cm, il est donc clair que l'utilisation des barrières tubulaires avec une couche superhydrophobe donne une meilleure protection pour notre système et le rend beaucoup plus performant.

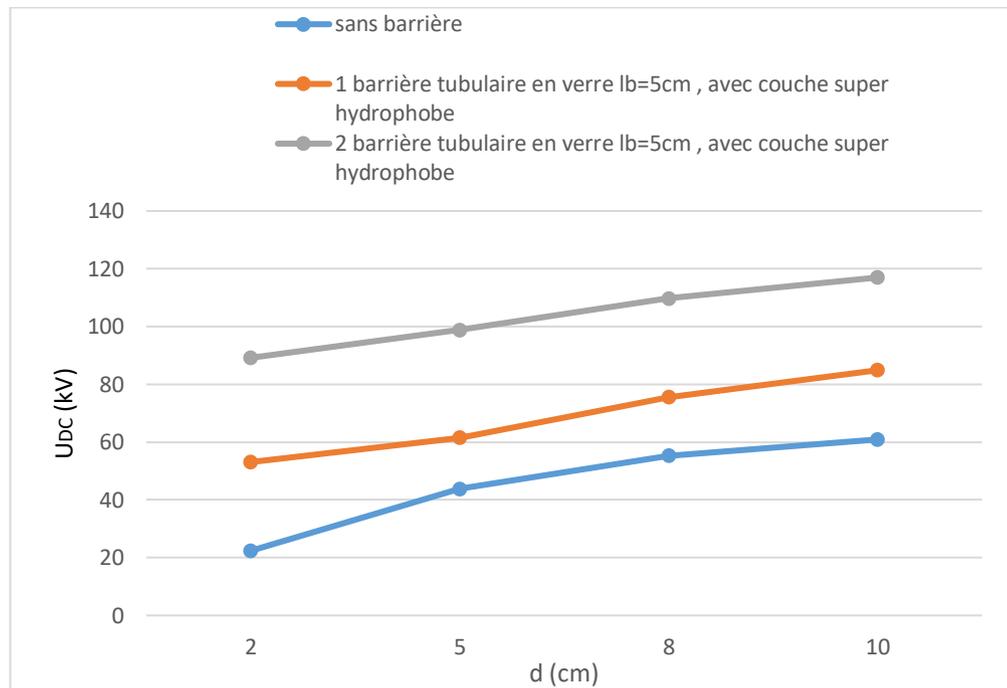


Figure III.16 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe - pointe (sans barrière isolante, protégé par 1 barrière isolante avec une couche superhydrophobe ou 2 barrières isolantes en verre avec une couche superhydrophobe ($l_b = 5$ cm))

III.6 Configuration Pointe – plan

La caractérisation des décharges électriques glissantes évoluant dans l'intervalle d'air pointe - plan sous tension continue positive a été réalisée pour une barrière tubulaire en verre propre, polluée ou avec revêtement superhydrophobe pour un diamètre de l'électrode plan constant de 40 cm et la longueur de la barrière tubulaire est 5 cm et 10 cm pour chaque cas. Les résultats de mesure de la tension de disruption du système en fonction de la distance inter-électrode pointe-plan sont illustrés par les figures (III. 18, III. 20 et III. 22).

III. 6. 1 Configuration pointe - barrière tubulaire propre - plan

Nous avons réalisé des essais pour le système pointe – barrière – plan pour le cas propre. Le chemin de la décharge est montré sur la figure III. 17.

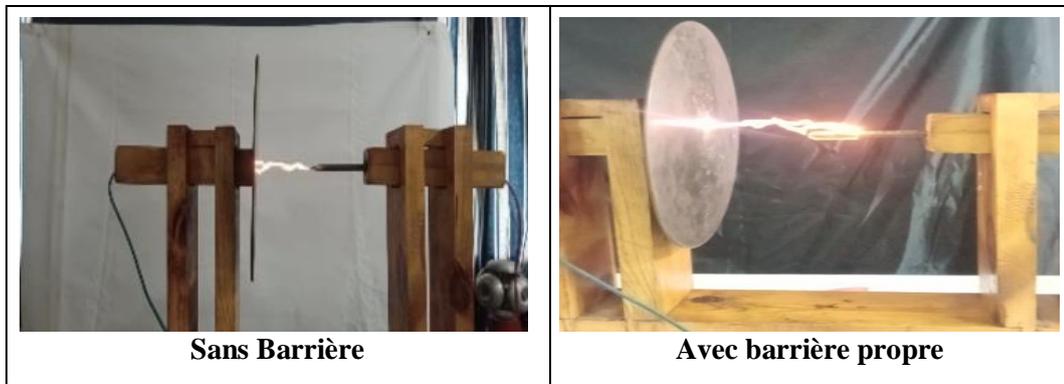


Figure III. 17 : Trajet de la décharge électrique disruptive de système pointe – plan sans barrière et avec barrière propre

La tension disruptive d'un intervalle d'air variable entre (2 cm à 10 cm) pour une barrière tubulaire propre de 10 cm de longueur et de 5 cm est illustrée par la figure III. 18.

D'après cette figure, nous pouvons voir clairement que pour le cas référent (sans barrière isolante) la tension de claquage augmente à fur et à mesure que la distance entre les électrodes augmentent. Ensuite, on peut observer que la présence d'une barrière isolante en verre propre augmente considérablement la tension de claquage. Cela est dû au fait que cette barrière isolante ajoute une couche supplémentaire d'isolation entre les électrodes, ce qui réduit la probabilité de claquage comme il est illustré dans la figure III. 18.

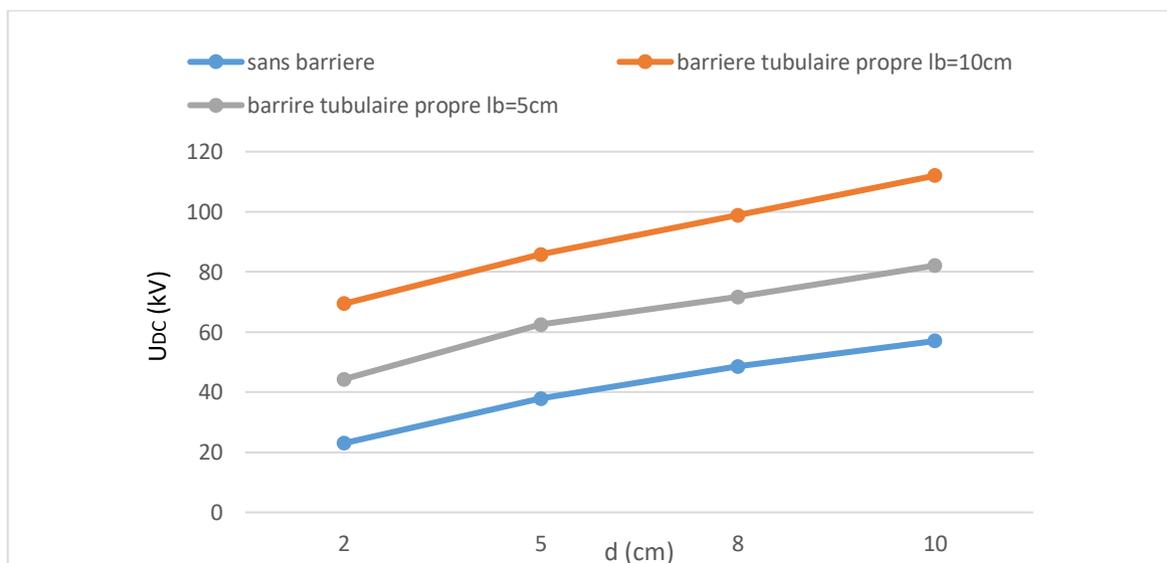


Figure III. 18 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe-plan (sans barrière isolante et protégé avec barrière isolante en verre propre ($l_b = 10\text{cm}$, $l_b = 5\text{cm}$))

Il en résulte aussi que pour une taille donnée de cette barrière isolante, la tension de disruption du système pointe - plan diminue avec la diminution de la longueur de la barrière tubulaire utilisée. On remarque que la tension disruptive dans le cas de la barrière tubulaire de longueur 5 cm est moins élevée et moins performante que dans le cas d'une barrière tubulaire de 10 cm.

III. 6.2 Configurations pointe - barrière tubulaire polluée - plan

Dans le cas pollué, nous avons réalisé des essais pour le système pointe - barrière - plan, le chemin de la décharge est montré dans la figure III. 19.

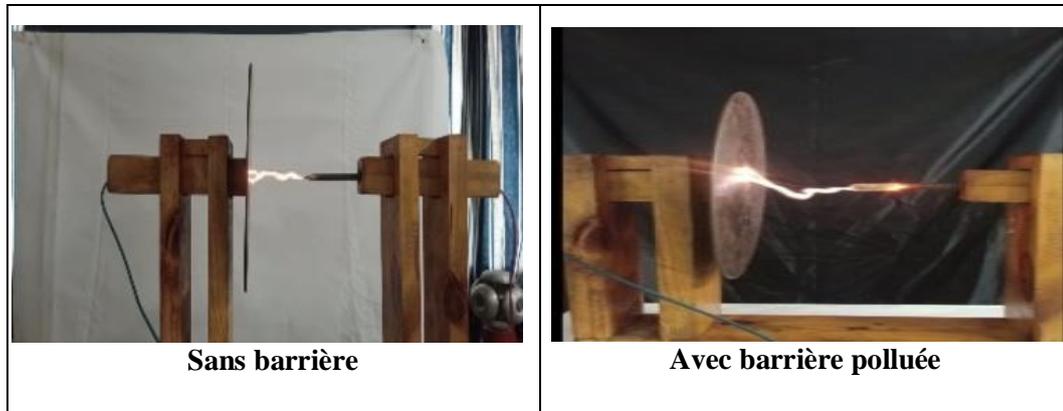


Figure III. 19 : Trajet de la décharge électrique disruptive de système pointe – plan sans barrière et avec barrière polluée

La tension disruptive d'un intervalle d'air variables est mesurée pour des différentes distances inter-électrode (2 cm, 5 cm, 8 cm et 10 cm) pour une barrière tubulaire polluée de 10 cm et de 5 cm de longueur est illustrée par la figure III.20.

Dans ce cas de pollution, le niveau de la tension de disruption du système est plus faible par rapport au cas propre et sec. En effet, les contaminants et l'humidité présents sur la surface de la barrière polluée peuvent agir comme des points faibles et favorisant l'accumulation de charges et augmentant ainsi le risque et la probabilité de claquage. Il est clair d'après les allures tracées en figure III.20 que la tension disruptive pour une barrière tubulaire en verre polluée de longueur de 10 cm et celle de 5 cm que ces barrières isolantes ne sont pas utiles et n'elles ne garantissent aucune protection. D'après ces résultat l'utilisation de la barrière polluée ne rassure aucune performance pour notre système parce que le comportement électrique de celles-ci, dans des conditions de pollutions très sévères, est équivalent à un système pointe – plan sans barrière isolante possédant une tension disruptive très faible.

Il est important de noter que les performances de ces barrières peuvent être améliorées en agissant sur la surface de la barrière polluée pour éviter ou limiter la contamination, cela par des mesures de maintenance régulière, telle que le nettoyage de la surface de la barrière isolante ou l'utilisation de la technique de revêtement. Ces mesures peuvent améliorer le niveau de sécurité et de protection et améliore les performances de notre système d'isolation.

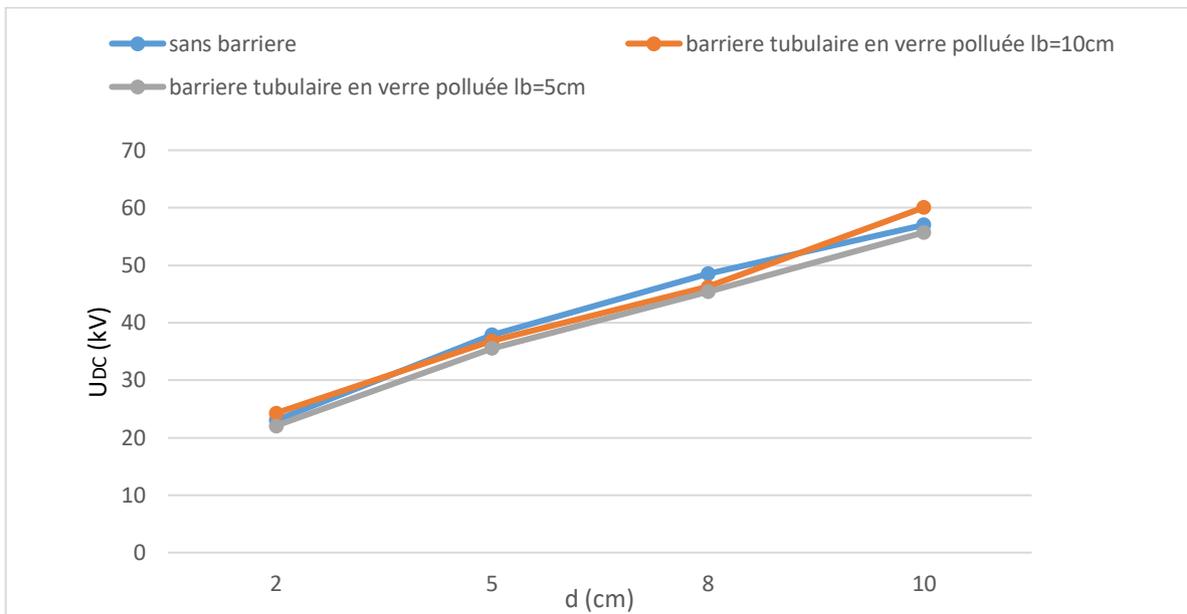


Figure III. 20 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe-plan (sans barrière isolante et avec barrière isolante en verre polluée ($l_b = 10$ cm, $l_b = 5$ cm))

III. 6.3 Configuration pointe - barrière tubulaire avec revêtement super hydrophobe - plan

Dans le cas avec revêtement superhydrophobe, nous avons réalisé des essais pour le système pointe – barrière - plan, le chemin de décharge est montré dans la figure III. 21.

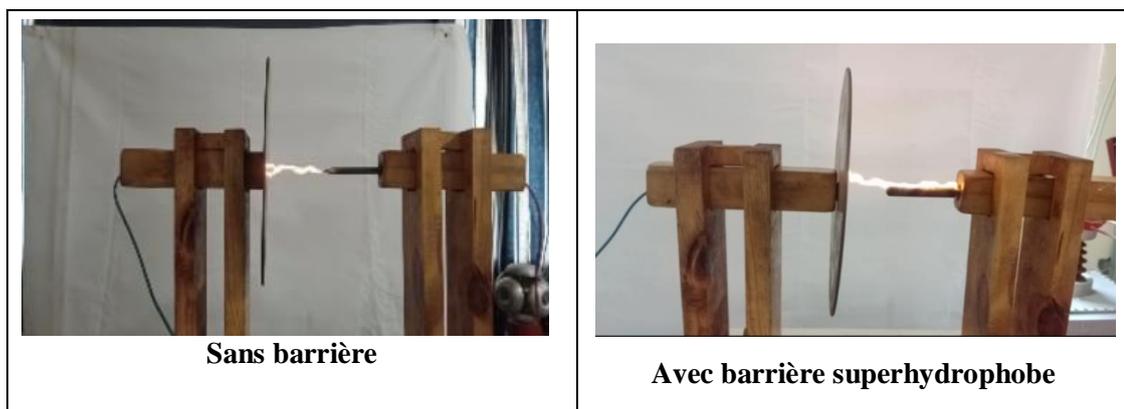


Figure III. 21 : Trajet de la décharge électrique disruptive de système pointe – plan sans et avec barrière superhydrophobe

La tension disruptive d'un intervalle d'air variable est mesurée à des distances précises (2 cm, 5 cm, 8 cm, 10 cm) pour une barrière tubulaire avec revêtement super hydrophobe de 10 cm et de 5 cm de longueur est illustrée par la figure III. 22.

Dans le cas où les barrières isolantes utilisées sont munies d'une couche de revêtement super hydrophobe, nous pouvons remarquer une augmentation importante de la tension disruptive, parce que le revêtement super hydrophobe empêche l'humidité et les contaminants de s'accumuler sur la surface

de la barrière isolante, réduisant ainsi la probabilité de formation de points faibles et de réduction de la tension de claquage. En conséquence, nous constatons une amélioration remarquable dans les valeurs de la tension de claquage ce qui améliore aussi les performances de notre système d'isolation et donne une protection élevée et un bon niveau de sécurité. Nous remarquons aussi dans les courbes tracées en figure III.22 que la taille de la barrière isolante joue un rôle important et on voit que la barrière tubulaire isolante de longueur 10 cm est plus performante et enregistre une tension disruptive très élevée en comparant avec la barrière tubulaire isolante de longueur 5 cm.

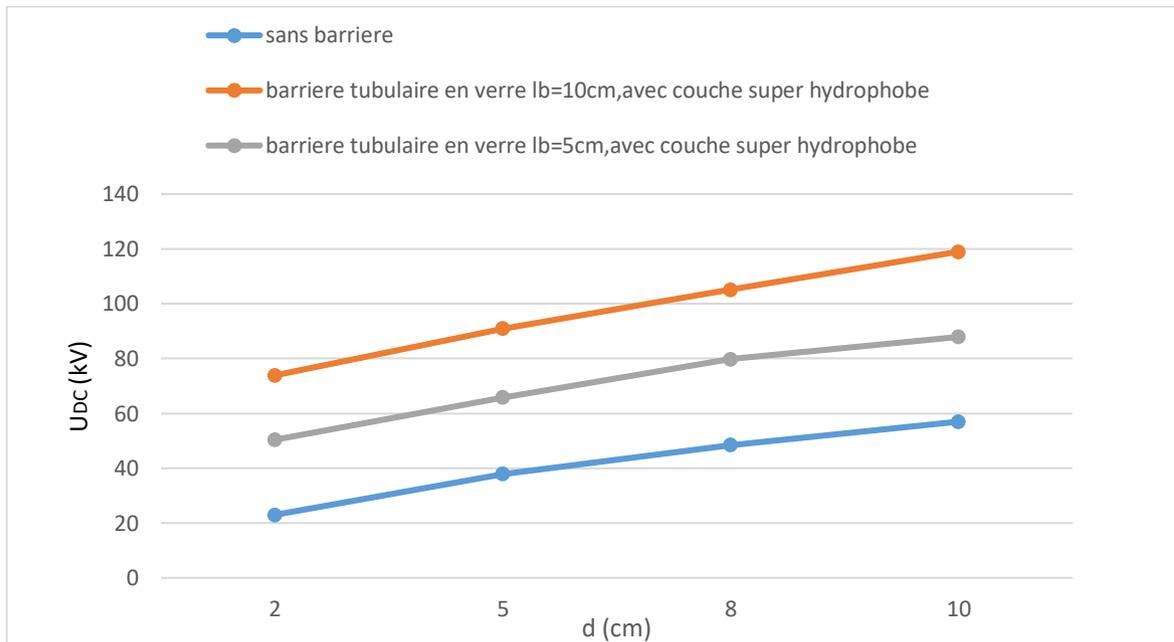


Figure III. 22 : Tension continue positive disruptive en fonction de la distance inter-électrode pointe-plan (sans barrière isolante et protégée par barrière isolante en verre avec revêtement superhydrophobe ($l_b = 10$ cm, $l_b = 5$ cm))

III. 7 Comparaison de la valeur de la tension disruptive entre système avec barrières propre et celui avec revêtement superhydrophobe

Les figures (III.23 et III.24) représentent l'évolution de la tension disruptive pour les cas de barrière isolante en verre propre et barrière isolante en verre avec revêtement superhydrophobe en fonction de la distance inter électrode pour les deux systèmes pointe-pointe et pointe-plan respectivement.

Les courbes dans les deux figures (III.23 et III.24) prennent une trajectoire croissante en augmentant la distance inter électrodes. Il est bien clair que les courbes représentatives pour les cas d'utilisations des barrières tubulaires en verre avec revêtement superhydrophobe présentent des tensions de claquage plus élevé en comparant avec les tensions enregistrer dans les cas d'utilisation des barrières tubulaires en verre sans revêtement.

On constat donc que l'utilisation des barrières isolantes avec couche superhydrophobe rend notre système d'isolation plus performant et assure une meilleure protection. Cela revient à l'état de la surface de la barrière tubulaire.

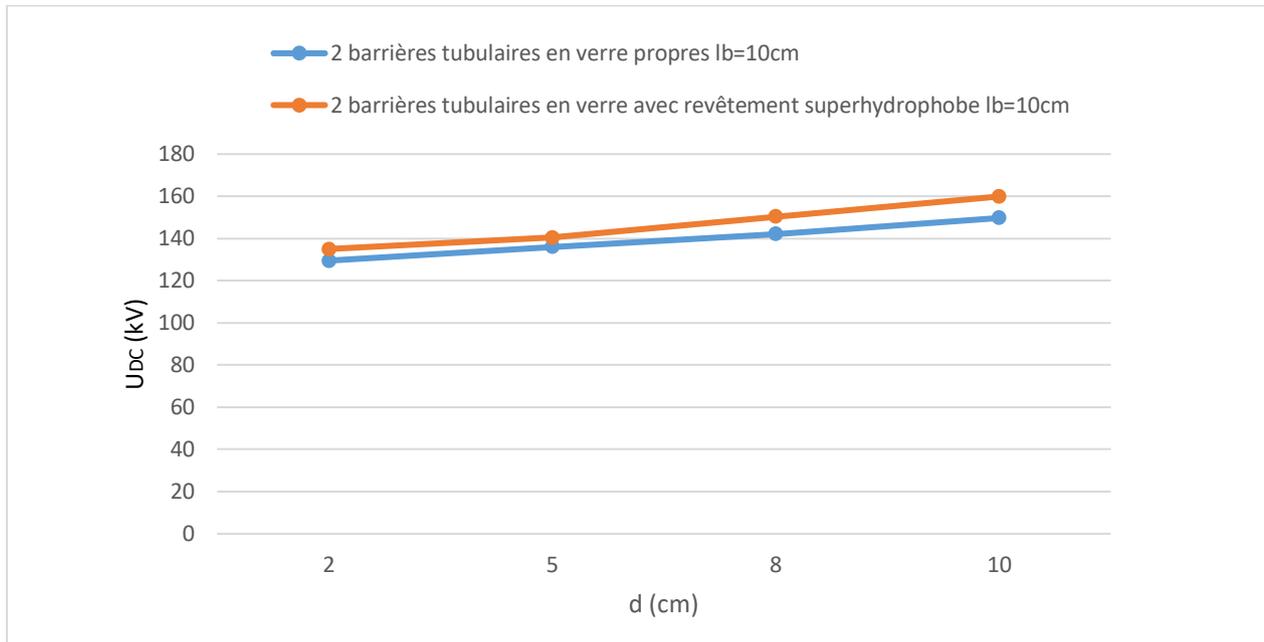


Figure III. 23 : Tension disruptive en fonction de la distance inter électrodes pointe - pointe pour les cas de 2 barrières tubulaires propres et avec revêtement superhydrophobe

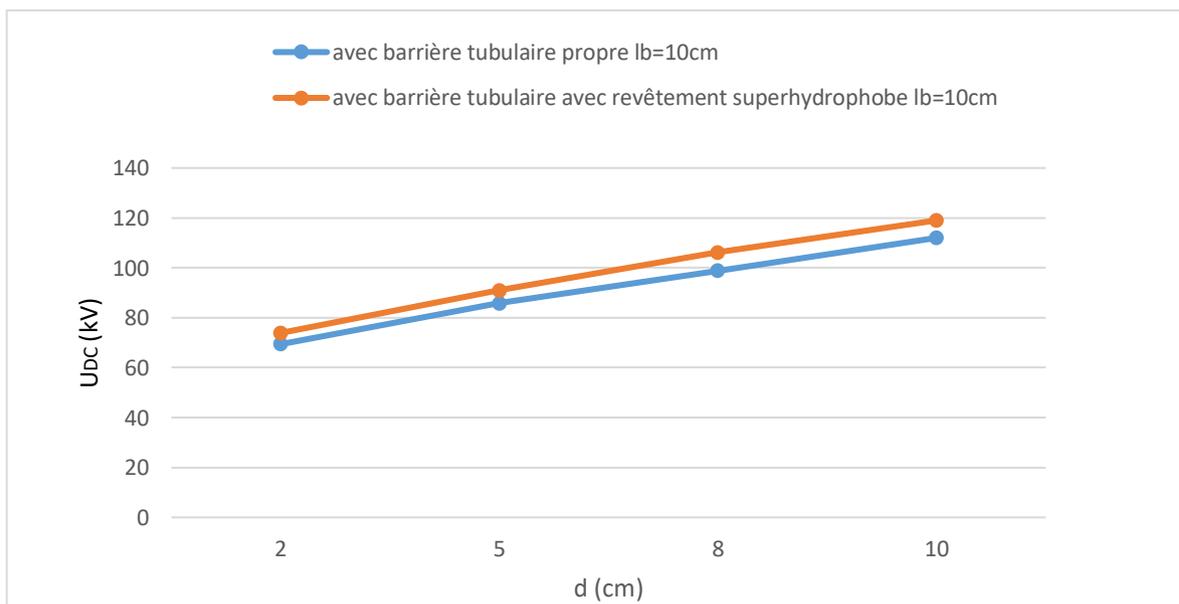


Figure III. 24 : Tension disruptive en fonction de la distance inter électrodes pointe-plan pour les cas d'une barrière tubulaire propre et avec revêtement superhydrophobe

Il est à noter qu'en comparaison entre des deux figures (III. 23 et III. 24) représentatifs des deux systèmes pointe -pointe et pointe-plan nous avons constaté que le système pointe-pointe avec 2

barrières tubulaires propres ou avec revêtement superhydrophobe est plus performant que le système pointe-plan et que la valeur de la tension disruptive est plus élevée.

III. 8 Conclusion

En réalisant ces différentes séries d'essais, nous cherchons à comprendre l'influence de la présence ou de l'absence de la barrière tubulaire en fonction de son état de surface (propre, polluée ou revêtue par une couche super hydrophobe) sur la tension de claquage. Ces informations nous permettront d'obtenir des résultats significatifs et d'approfondir notre compréhension des phénomènes en jeu, ce qui nous menons à améliorer les performances de notre système d'isolation.

D'après les résultats obtenus dans ce chapitre, nous concluons que la présence de la pollution sur les barrières isolantes réduit l'efficacité et la capacité d'isolement de ces derniers. Pour prévenir notre système et améliorer ces performances nous avons utilisé la technique de revêtement avec une couche superhydrophobe, cela pour donner une meilleure protection et un niveau de sécurité plus élevé.

CHAPITRE IV

Simulation sur logiciel COMSOL

IV. 1 Introduction

Comsol multiphysics est un outil puissant pour la résolution de problèmes d'électrostatique, permettant de modéliser les champs électriques et les potentielles dans des géométries complexes. Grâce à son approche basée sur les éléments finis, il peut fournir des solutions précises pour des configurations électrostatiques telles que les conducteurs chargés, les isolants diélectriques et les régions d'air. Les utilisateurs peuvent définir les propriétés des matériaux, les conditions aux limites et les équations spécifiques à leur problème pour trouver le champ et le potentiel électrique.

Dans ce chapitre, nous explorons l'utilisation du logiciel Comsol pour la simulation des deux types de configurations : le cas pointe-pointe et le cas pointe-plan, en analysant les champs et les potentielles électriques dans ces deux configurations avec la présence des barrières isolantes propres, polluées et avec revêtement superhydrophobe.

IV.2 Présentation des étapes de simulation sous COMSOL

Une simulation électromagnétique sous COMSOL-Multiphysics se déroule selon un schéma commun à la plupart des logiciels de ce type. La simulation se décompose ainsi en trois étapes principales : le prétraitement, le calcul et le post-traitement. L'étape de prétraitement inclut l'implantation du modèle géométrique et affectation des propriétés physiques des différentes parties du travail, la détermination des conditions aux limites et la discrétisation du domaine sur un maillage. Lorsque le problème est complètement défini, l'étape du calcul est consacrée à la résolution numérique en utilisant les différents solveurs proposés par COMSOL. Enfin, le post-traitement permet de visualiser les résultats et d'exporter les données vers d'autres logiciels de traitement pour exploitation (Excel, Matlab...) [43].

IV.2.1 Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.5

L'interface de COMSOL peut être séparée en quatre parties. A gauche, on retrouve le Model où il est possible de définir des variables et d'autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles physiques s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). Le modèle comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans le modèle : par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans

Geometry. C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. En haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer l'agrandissement de l'affichage (zoomer), l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc... Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, les progressions des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée. Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.5 sont présentés sur la figure IV.1 [44].

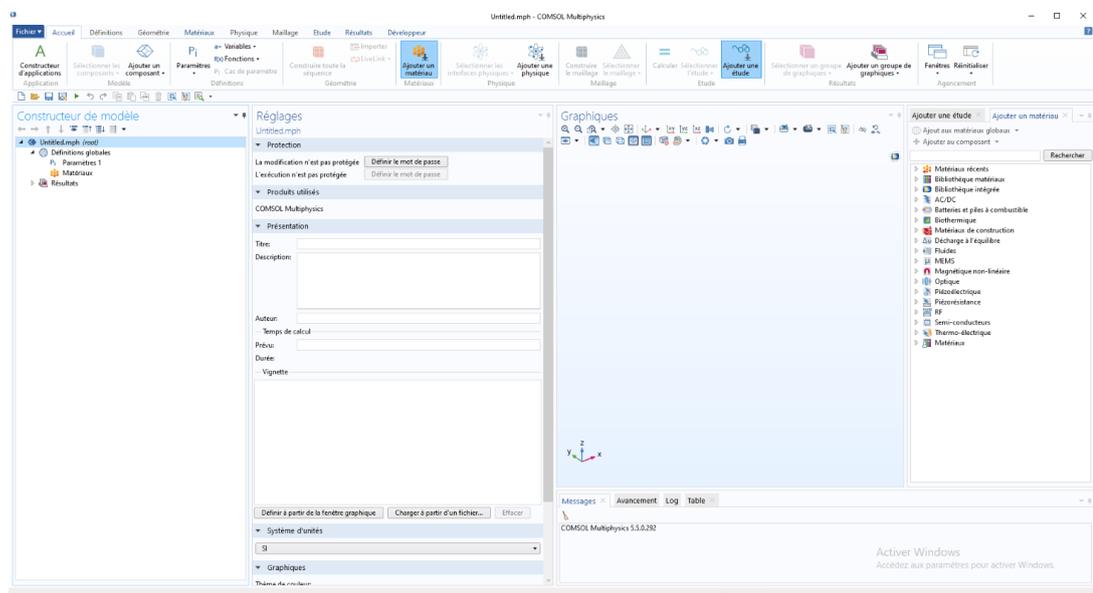


Figure IV. 1 : Interface utilisateur de COMSOL 5.5

IV. 2. 3 Création du modèle de simulation

Les étapes de création et simulation d'un modèle sous COMSOL-Multiphysics sont :

- Choix du modèle spatial en 2D, 3D,
- Choix du domaine physique de travail (domaine électrostatique sous AC/DC),
- Choix du domaine d'étude, le domaine stationnaire,
- Implantation de la géométrie du modèle,
- Affectation des propriétés physiques de chaque domaine,
- Maillage des différentes parties du modèle,

- Simulation et exploitation des résultats.

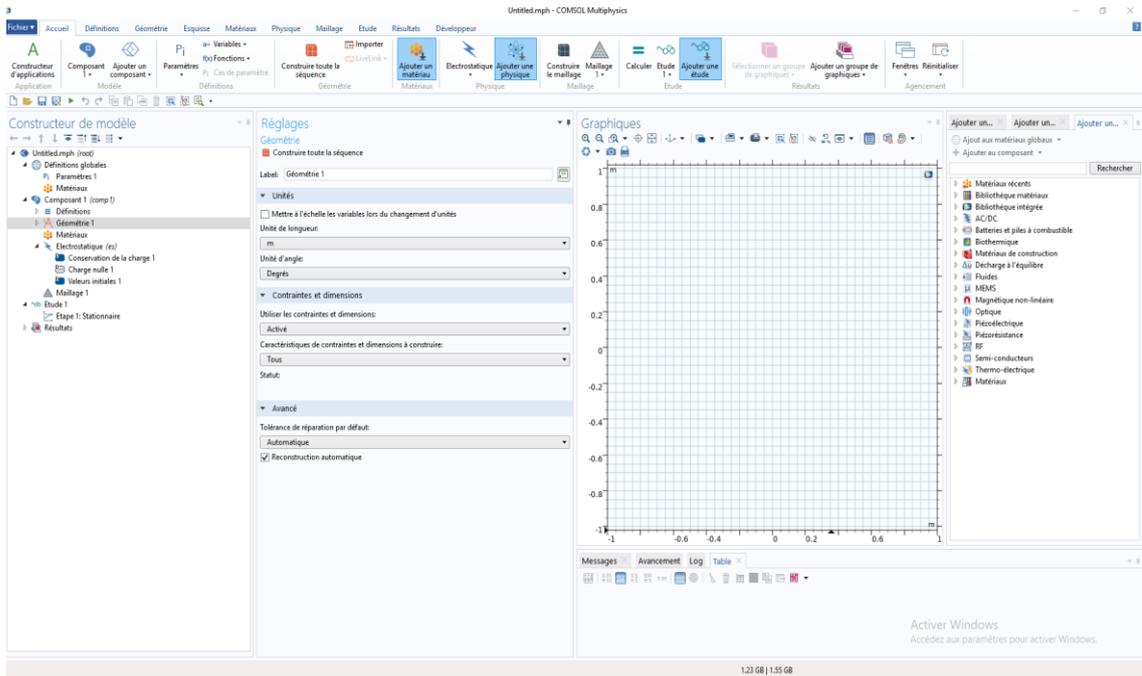


Figure IV. 2 : Création du modèle géométrique.

IV.3 Vue 2D des modèles étudiés et résultats

IV.3.1 modèle pointe-pointe à vide

La configuration de ce modèle est composée de deux points, la première relie à la source de la haute tension et le deuxième est relié à la terre comme montre la figure IV.3

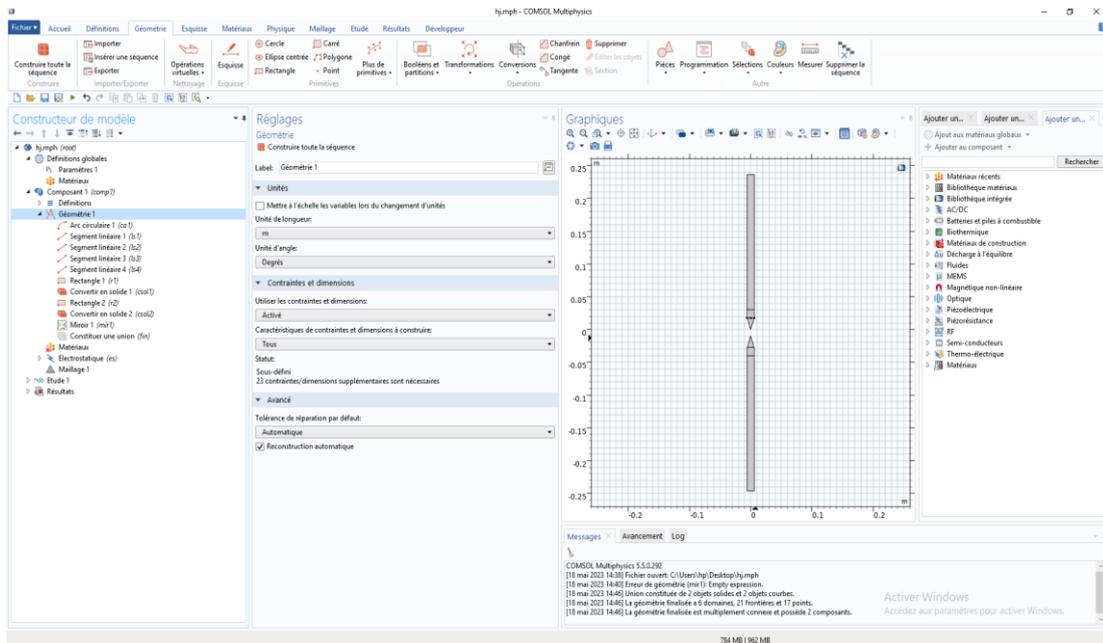


Figure IV. 3 : Modèle pointe-pointe

IV. 3. 2 Modèle pointe-plan

La configuration de ce modèle est composée d'une pointe reliée à la source de la haute tension et d'un plan relié à la terre comme montre la figure IV.4

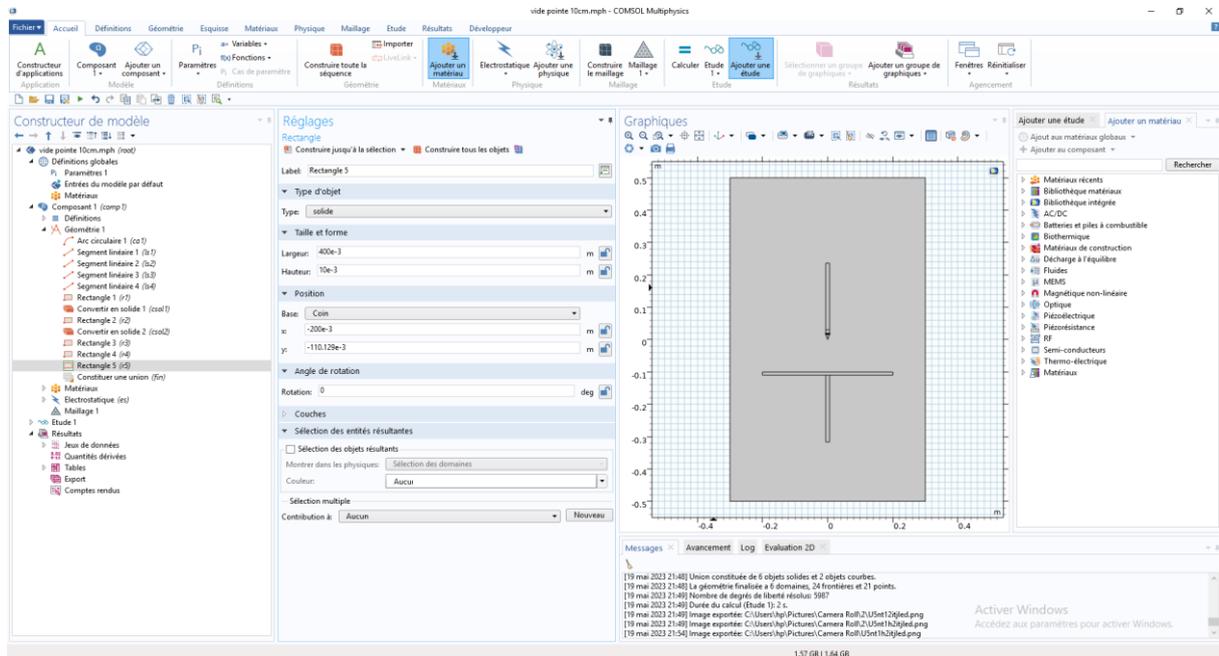


Figure IV. 4 : Modèle Pointe-Plan

IV. 3. 3 Maillage du modèle proposé

La première tâche à accomplir lors de la réalisation d'une simulation numérique consiste à définir le domaine de calcul, suivi par la création du maillage pour le domaine retenu. Cette étape peut être considérée à la fois comme la plus importante et la plus délicate dans ce travail préliminaire. Plusieurs types d'éléments de discrétisation (tétraédrique, hexaédrique ou prisme,) sont proposées par COMSOL-Multiphysics. Dans notre cas, nous avons adopté un maillage avec des éléments tétraédriques car ce choix permet de mailler automatiquement des géométries différentes.

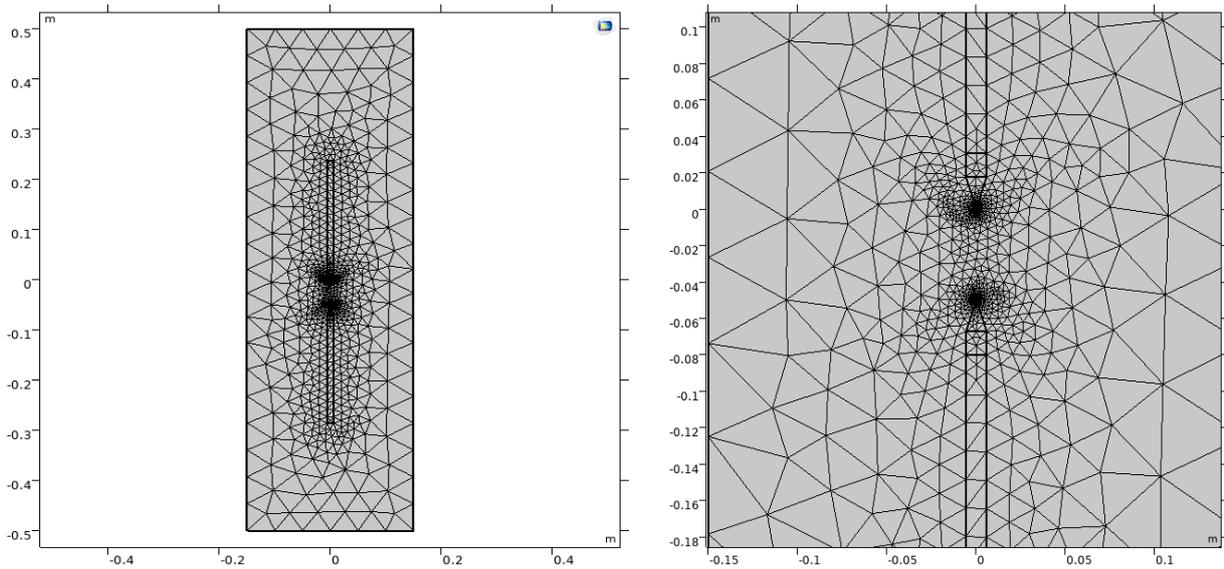


Figure IV. 5 : Maillage du modèle pointe-pointe

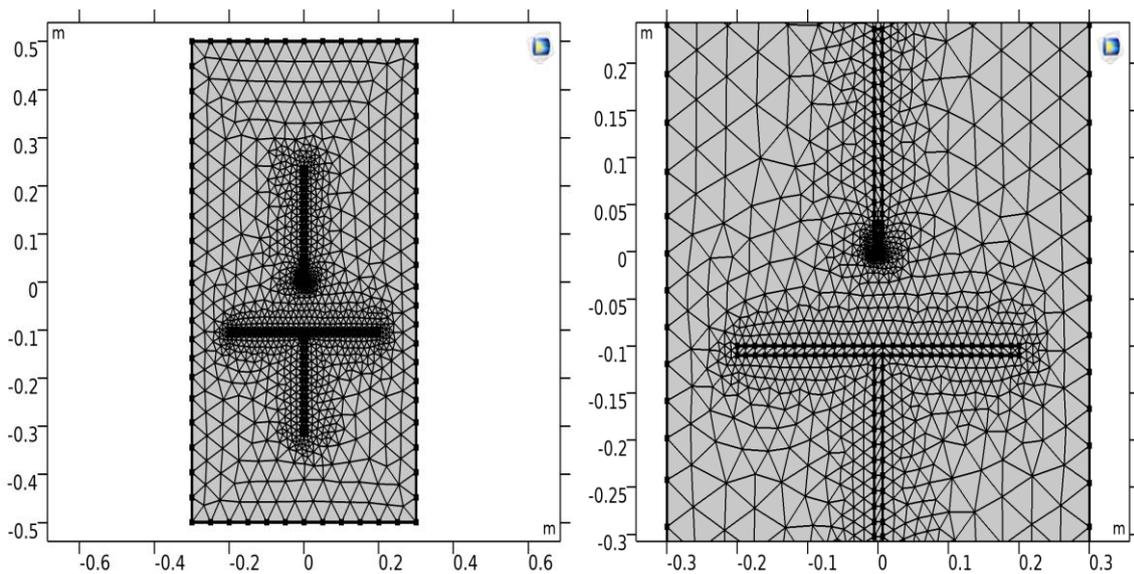


Figure IV. 6 : Maillage du modèle pointe-plan

IV. 3. 1. 2 Résultats de la simulation et discussions

Dans notre étude nous avons simulé les conditions de propriété, de contamination et de revêtement superhydrophobe pour les barrières isolantes en verre. Notre étude est réalisée pour deux configurations pointe-pointe et pointe-plan, les résultats de notre simulation est illustré dans les figures suivantes :

a. Cas sans barrière

Les figures IV.7 et IV.8 représentent la répartition du champ et potentiel électrique pour les deux types de configurations pointe-pointe et pointe-plan respectivement pour le cas sans barrière.

Le code couleur dans les deux figures montre une concentration du potentiel électrique du côté de l'électrode reliée à la source de la haute tension et s'affaiblit le long de la distance en s'éloignant de cette électrode. Nous remarquons aussi que la courbe du champ électrique montre une valeur plus élevée du champ à la pointe de l'électrode et diminue en fonction de la distance inter électrode.

Il est à noter que la valeur du champ dans la configuration pointe-plan est environ zéro à côté de l'électrode plan reliée à la terre contrairement au cas de la configuration pointe-pointe.

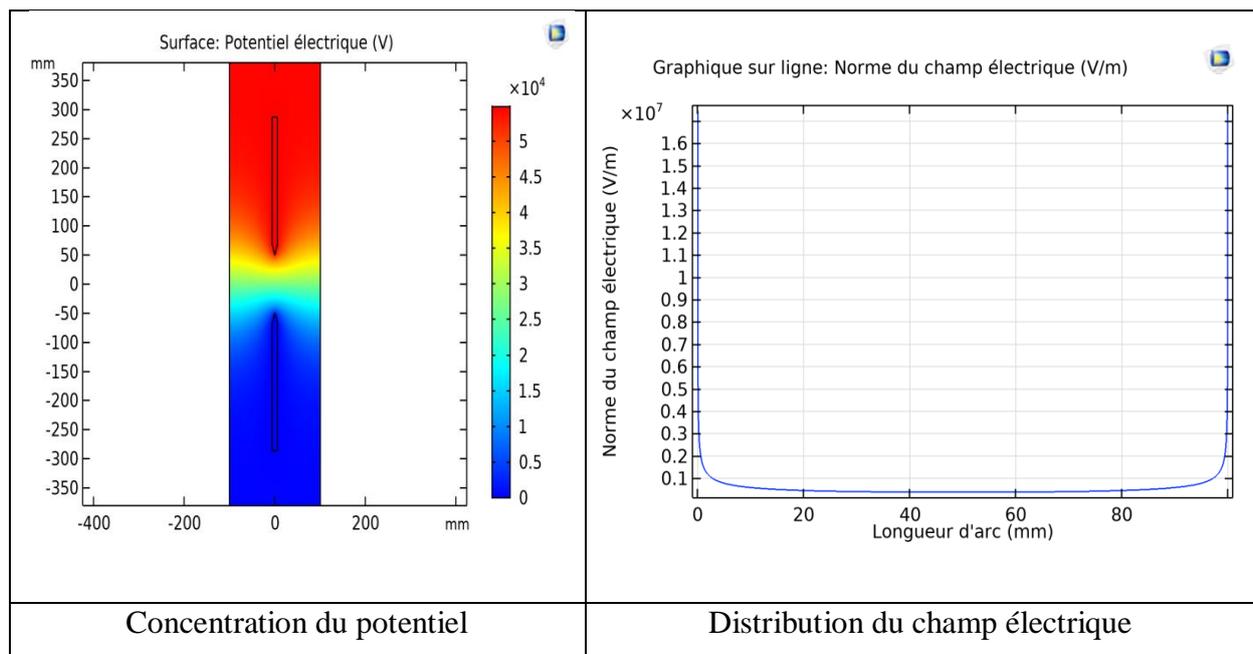


Figure IV. 7 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-pointe pour la distance inter électrode $d = 10$ cm

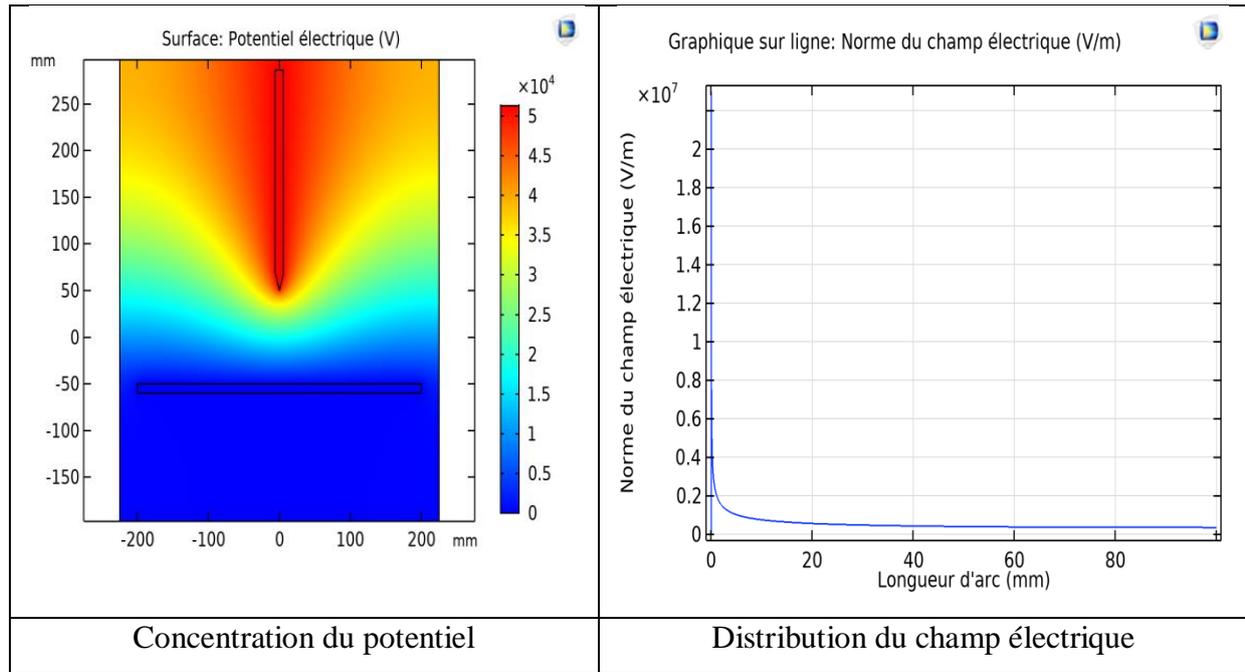


Figure IV. 8 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-plan pour la distance inter électrode $d = 10$ cm

b. Cas d'une barrière propre

Les figures suivantes représentent la répartition du champ et du potentiel électrique pour le cas d'insertion d'une barrière propre ($l_b = 10$ cm, $l_b = 5$ cm) pour les deux configurations pointe-ponte et pointe-plan.

Dans les figures ci-dessous nous remarquons que le potentiel électrique est concentré à l'électrode reliée à la haute tension et les courbes du champ électrique ont enregistrées une augmentation dans la valeur du champ par rapport au cas sans barrière. Nous constatons une courbe descendante qui enregistre la faible valeur du champ lorsque le champ passe à travers la barrière isolante, cela est causé par le champ opposé qui se produit dans le matériau isolant.

La figure IV.11 représente la valeur du champ électrique la plus élevée dans le cas propre. Cela est causé par l'utilisation de deux barrières tubulaires de longueur $l_b = 10$ cm.

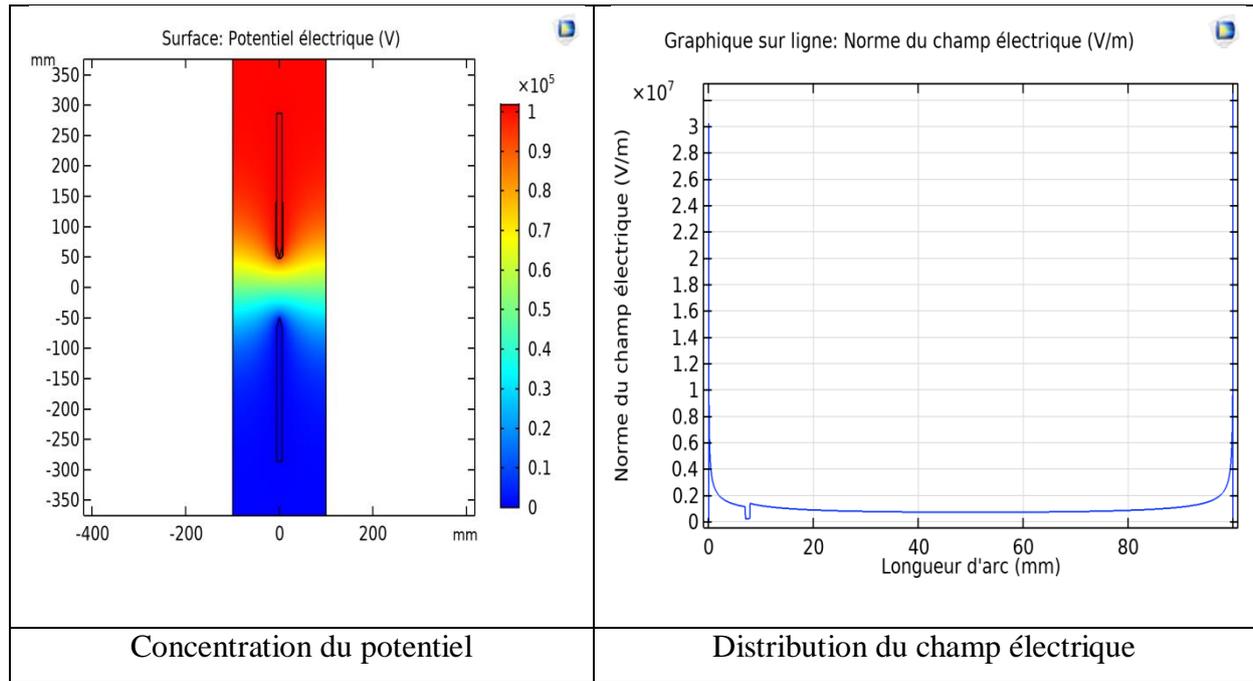


Figure IV. 9 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-1barrière propre-pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

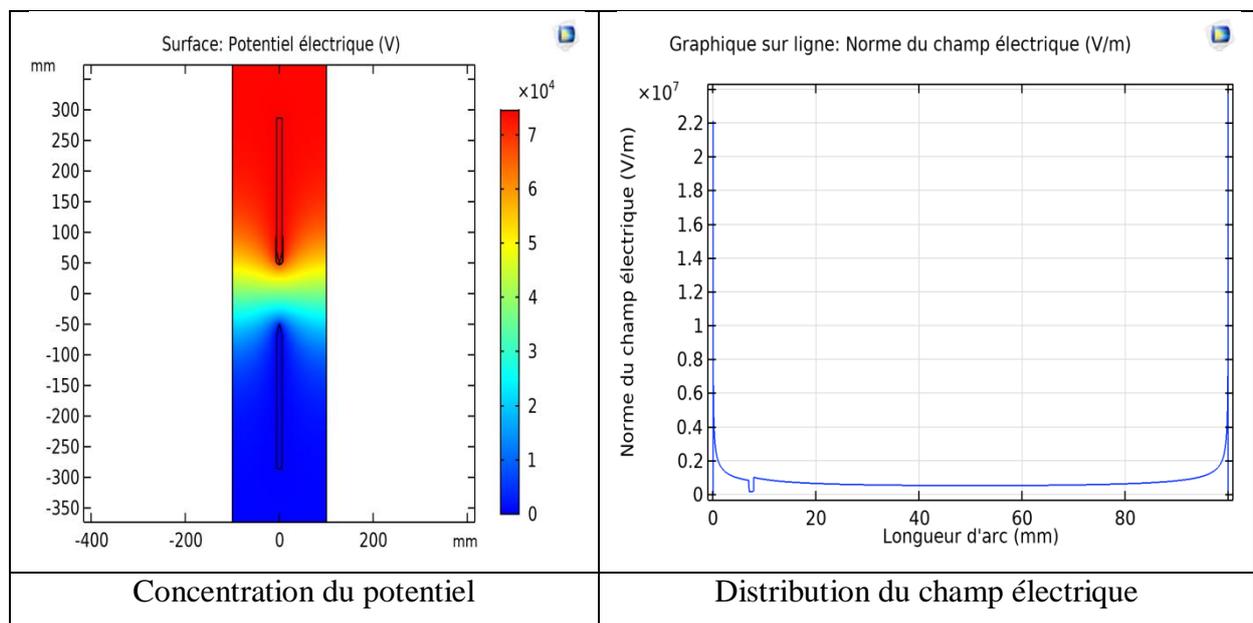


Figure IV. 10 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-1barrière propre-pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

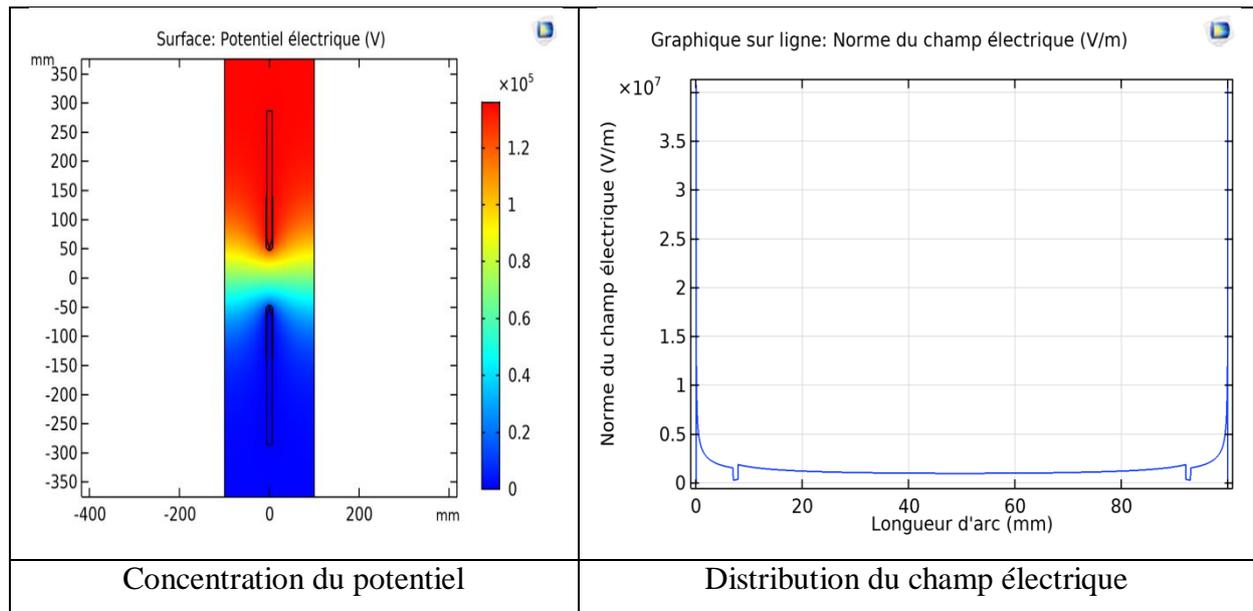


Figure IV. 11 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-2barrière propre-pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

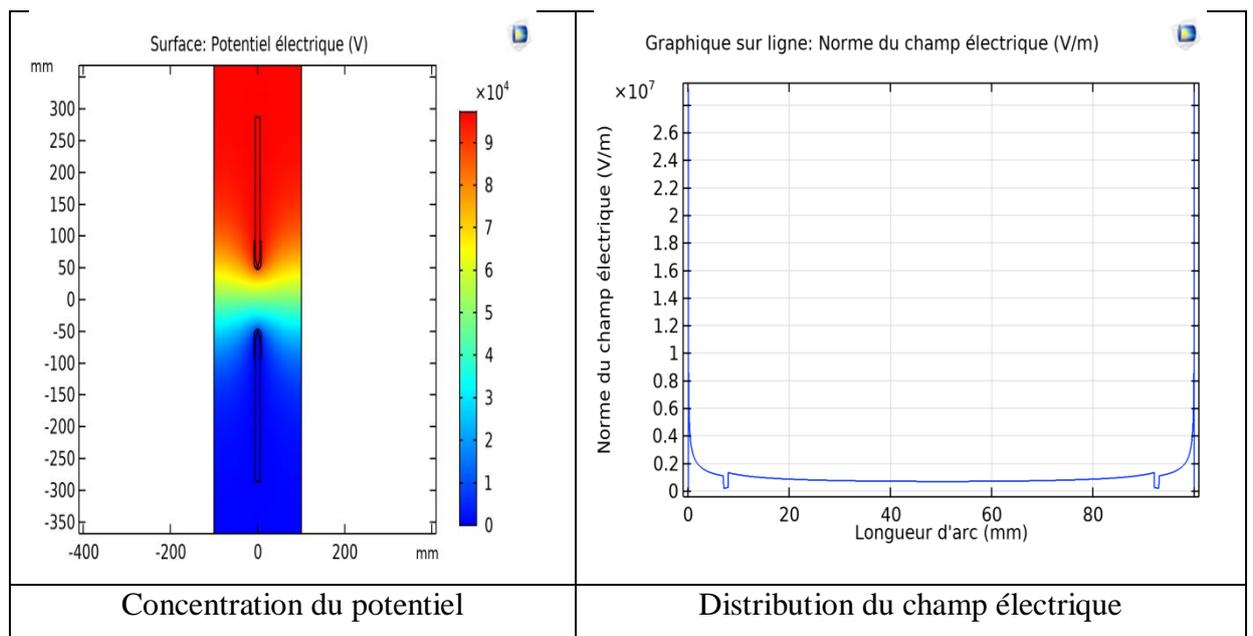


Figure IV. 12 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-2barrière propre-pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

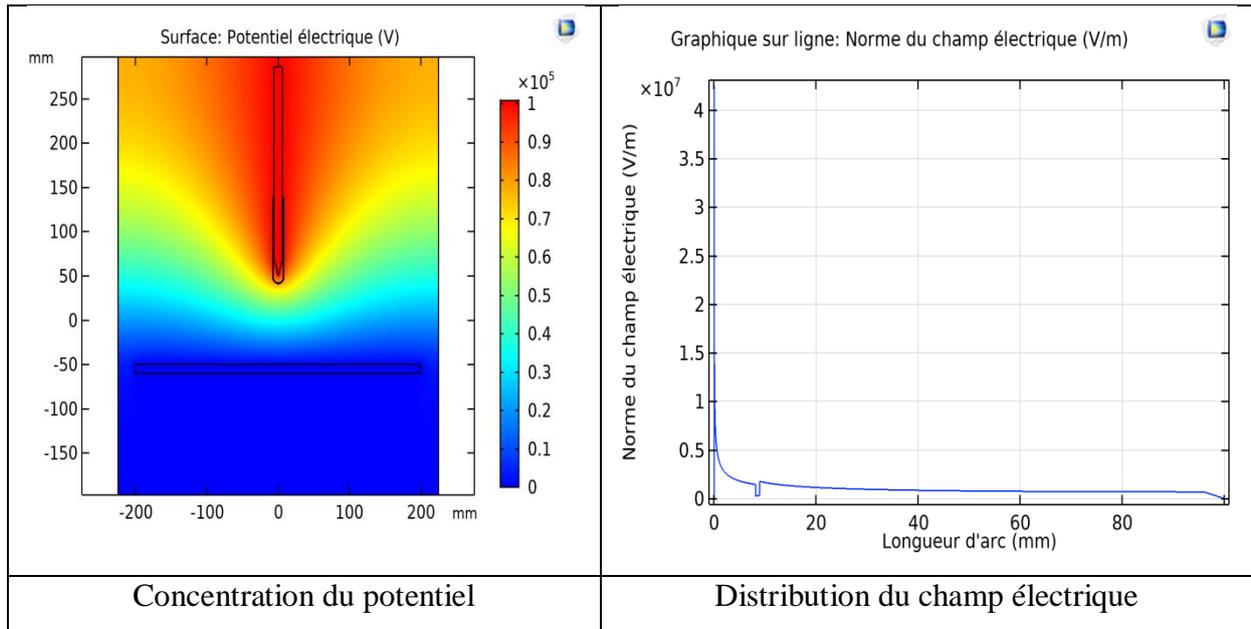


Figure IV. 13 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-barrière propre-plan pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

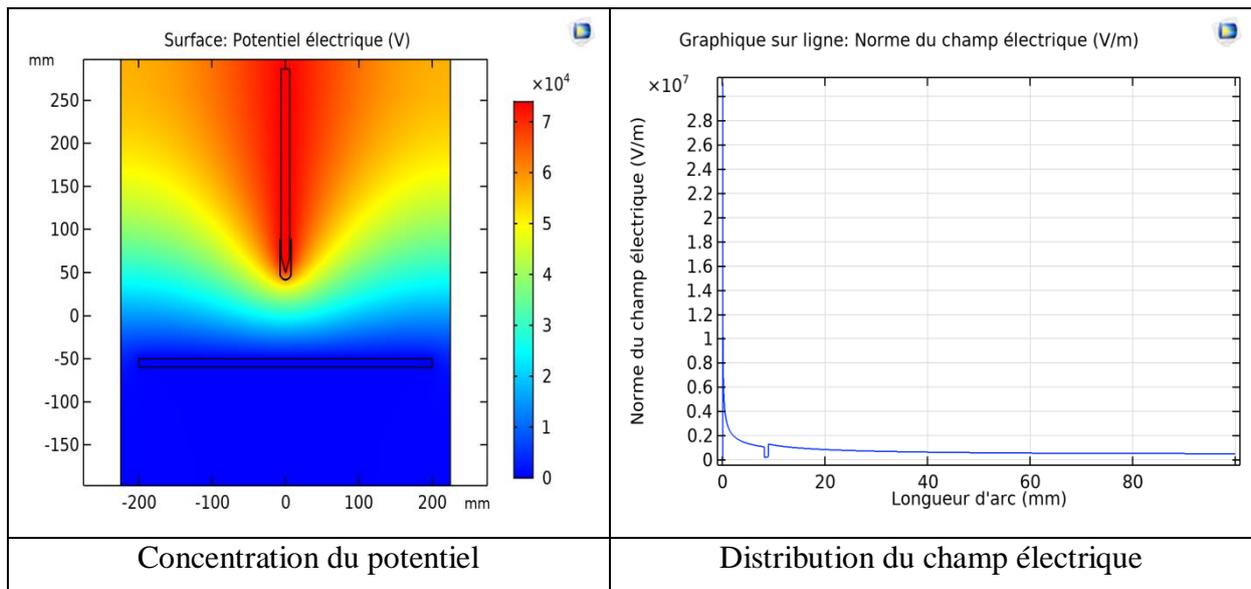


Figure IV. 14 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-barrière propre-plan pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

c. Cas d'une barrière polluée

Les figures ci-dessous représentent la répartition du champ et potentiel électrique dans le cas d'utilisation des barrières isolantes polluées pour les deux configurations pointe-pointe et pointe-plan, les résultats de la simulation montrent une valeur du potentiel électrique

importante concentrée à l'électrode mise sous haute tension et se diminue en rapprochant de l'électrode mise à la terre. La présence des barrières en verre polluées a impliqué une tension de claquage faible ce qui a donné une distribution champ plus faible par rapport au cas où nous avons utilisé des barrières propres.

Les courbes de distribution du champ électrique prennent la valeur maximale à la pointe de l'électrode sous haute tension et diminue en fonction de la distance inter électrode. Lors du passage du champ électrique par la barrière isolante, le champ électrique est presque nul, comme la montre les figures ci-dessous.

La courbe du champ électrique prend une trajectoire ascendante en se rapprochant de l'électrode mise à la terre dans le cas de la configuration pointe-pointe et prend la valeur nul dans le cas de la configuration pointe-plan.

Nous remarquons des valeurs du champ électrique très proche pour le cas d'utilisation des barrières tubulaires de longueur de 10 cm et de longueur de 5 cm, cela est dû aux valeurs de tensions de claquage rapprochées.

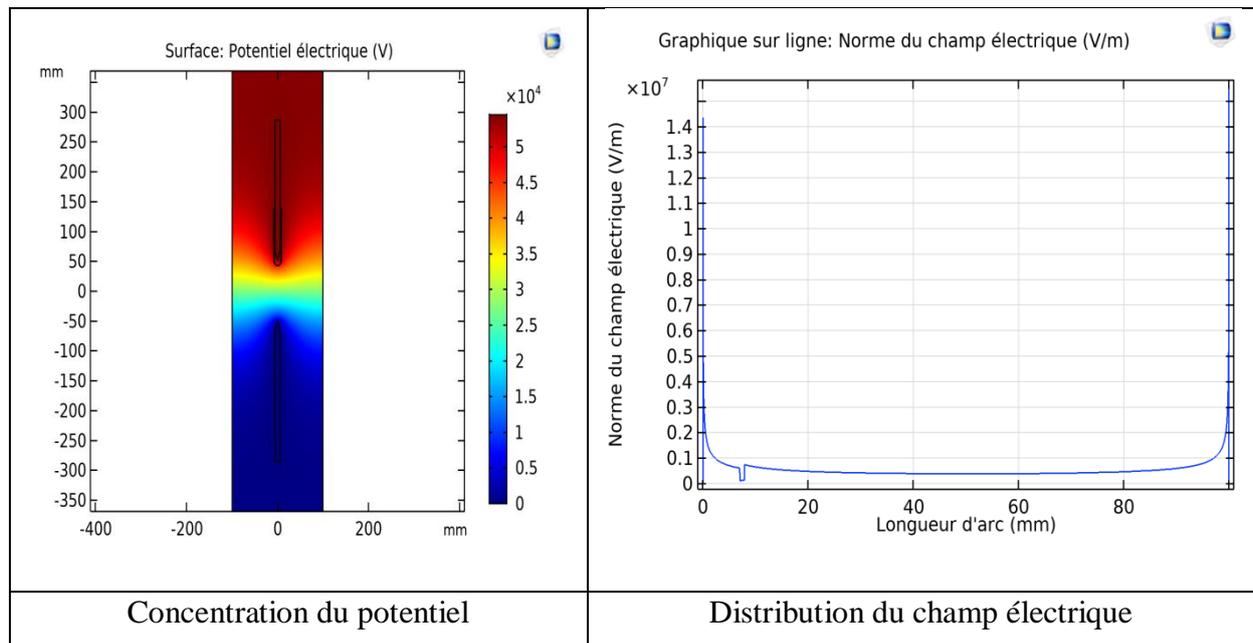


Figure IV. 15 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-1barrière polluée-pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

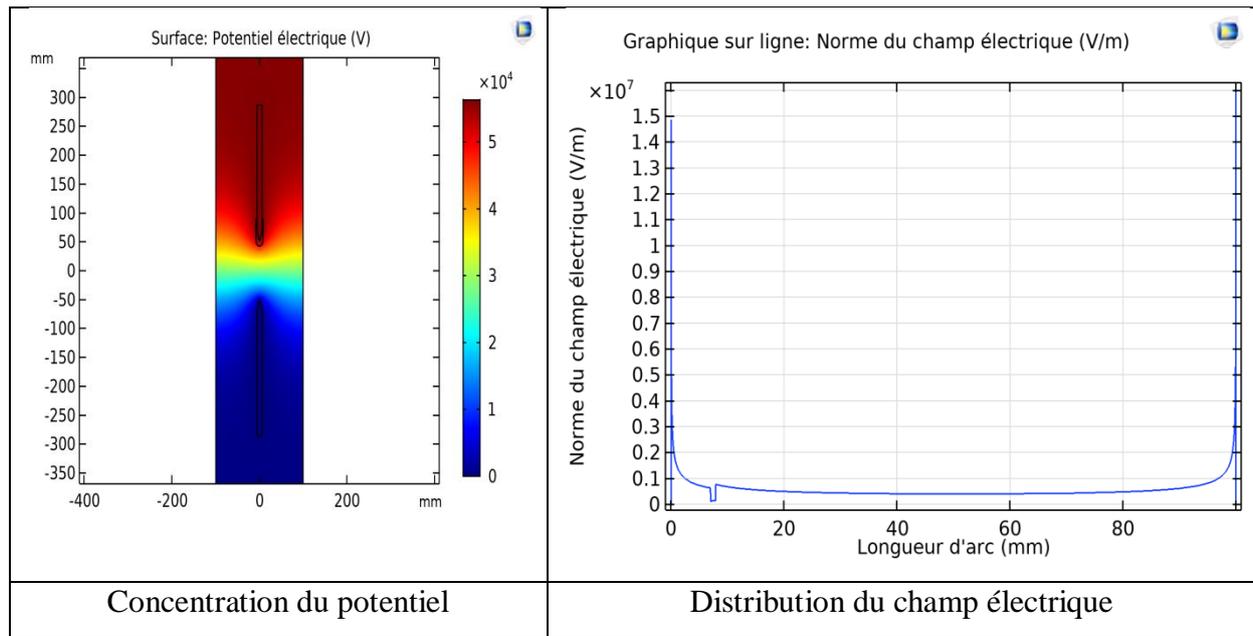


Figure IV. 16 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-1barrière polluée-pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

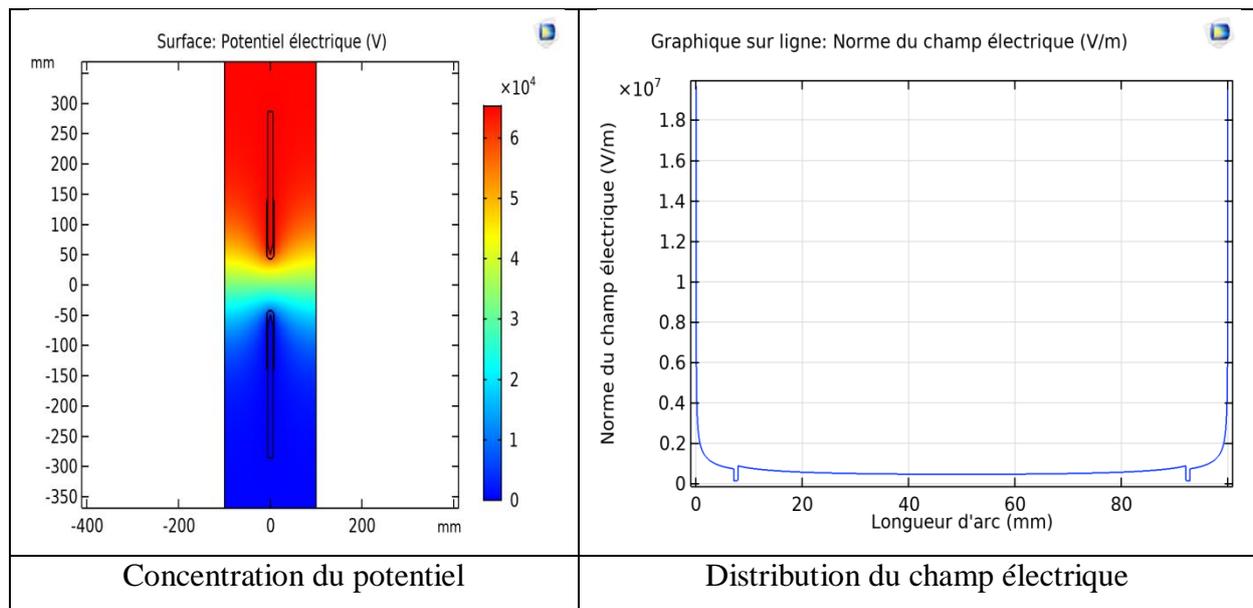


Figure IV. 17 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-2barrière polluée-pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

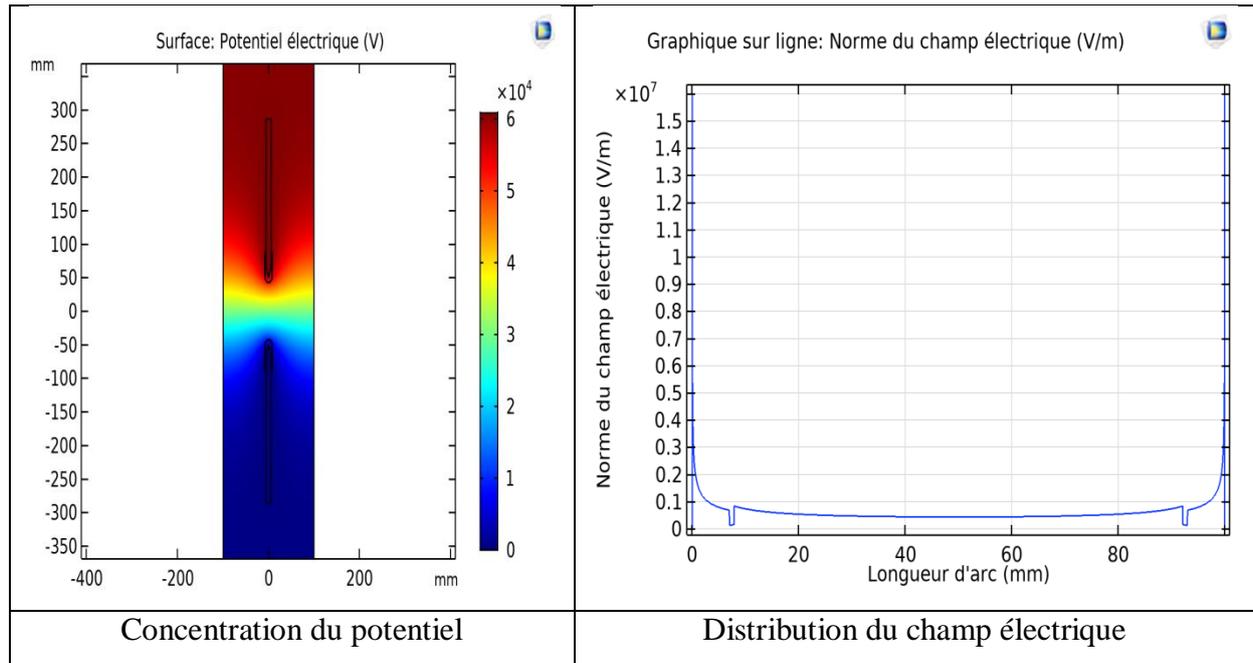


Figure IV. 18 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe - 2 barrière polluée - pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

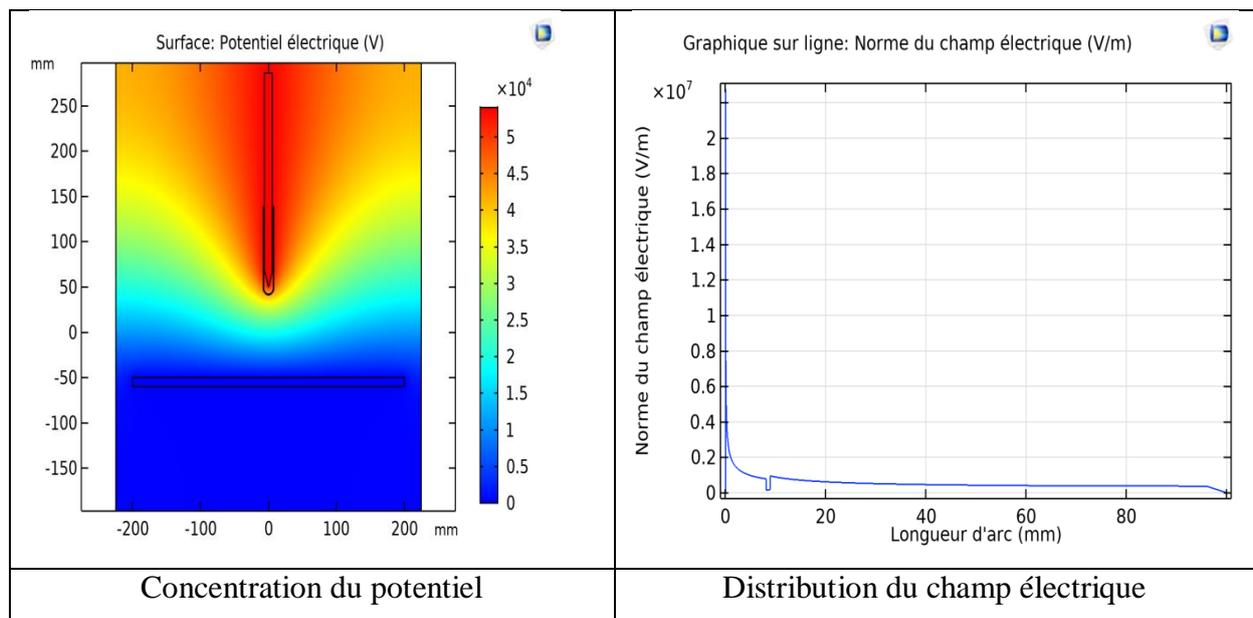


Figure IV. 19 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-barrière polluée-plan pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

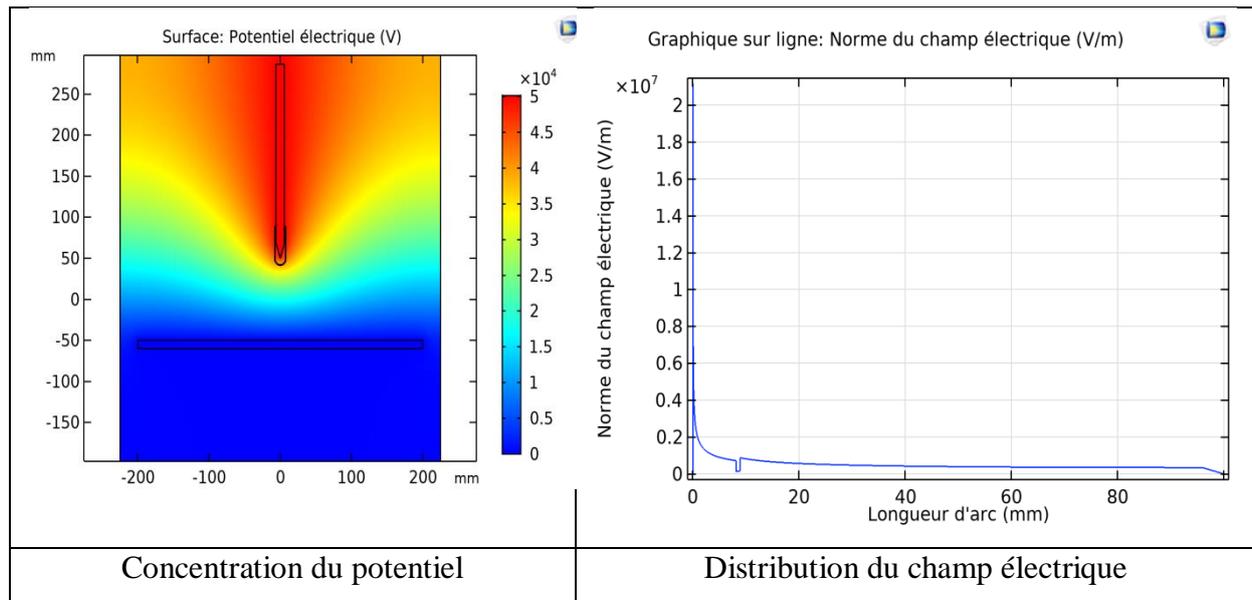


Figure IV. 20 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-barrière polluée-plan pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

d. Cas avec barrière superhydrophobe

Dans le cas d'utilisation des barrières isolantes avec revêtement superhydrophobe pour les deux configurations pointe-pointe et pointe-plan, nous avons constaté des valeurs du champ électrique plus élevées en comparant avec tous les cas précédents, cela est dû à la tension appliquée qui est plus grande. Ainsi la distribution du potentiel électrique qui est concentré à l'électrode mise sous haute tension et s'affaiblie en s'éloignant de cette dernière et en rapprochant de l'électrode mise à la terre.

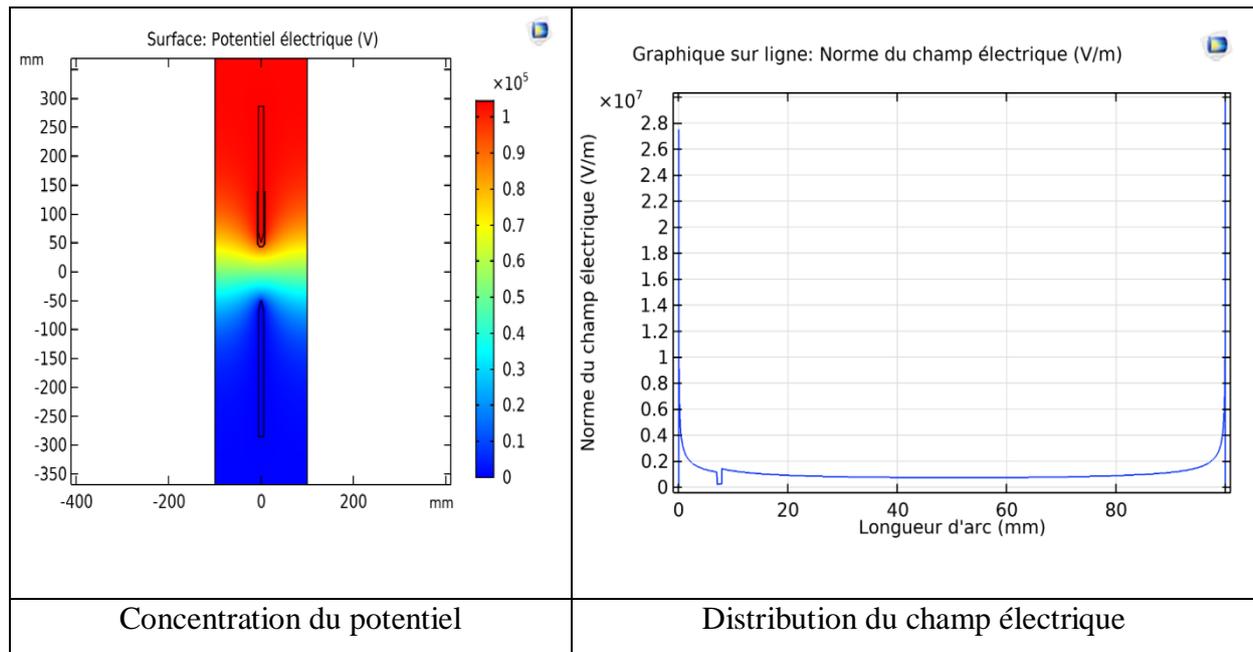


Figure III. 21 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-1barrière avec revêtement superhydrophobe - pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

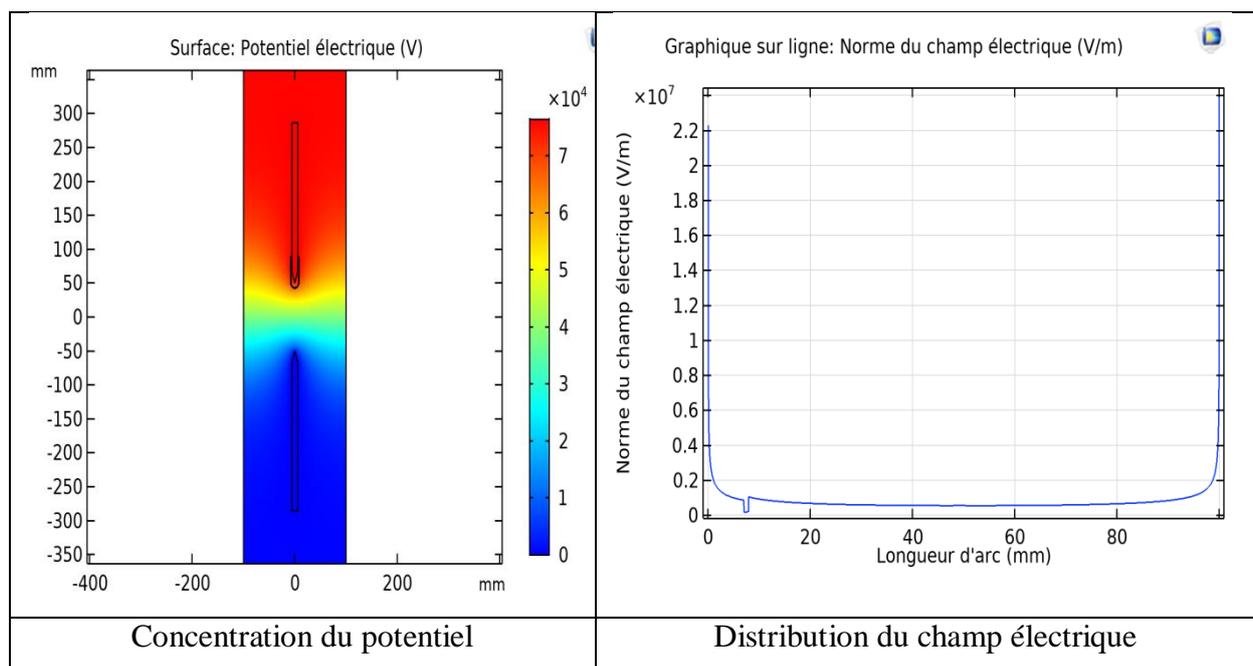


Figure IV. 22 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe-1barrière avec revêtement superhydrophobe - pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

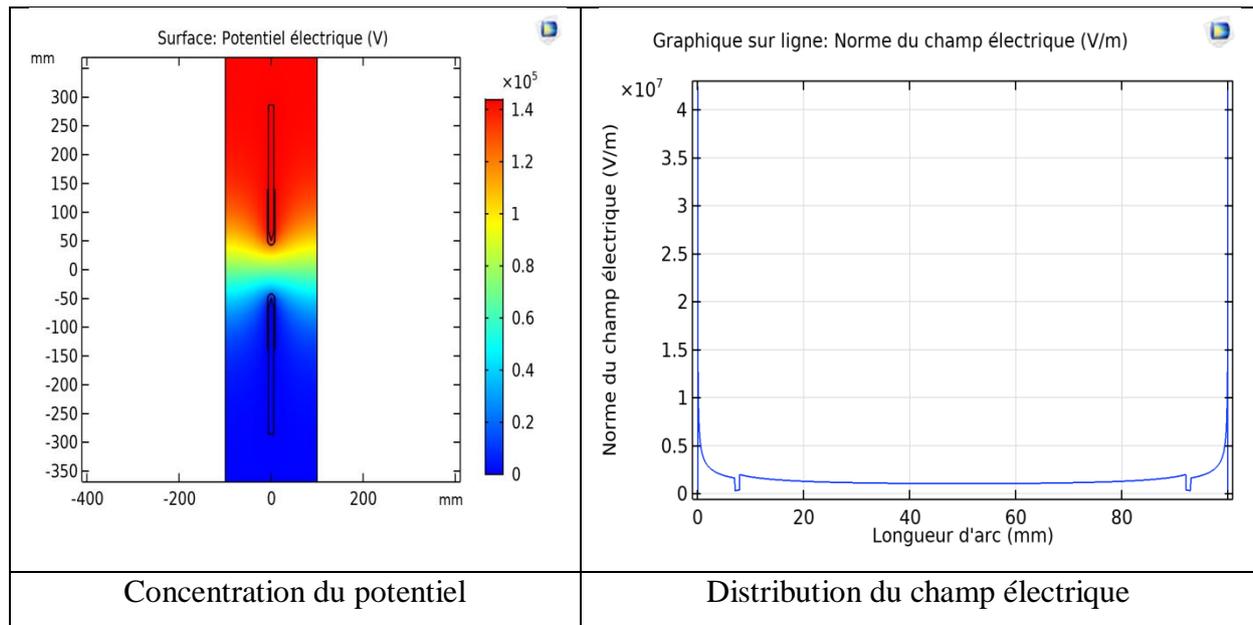


Figure IV. 23 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe - 2 barrière avec revêtement superhydrophobe - pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

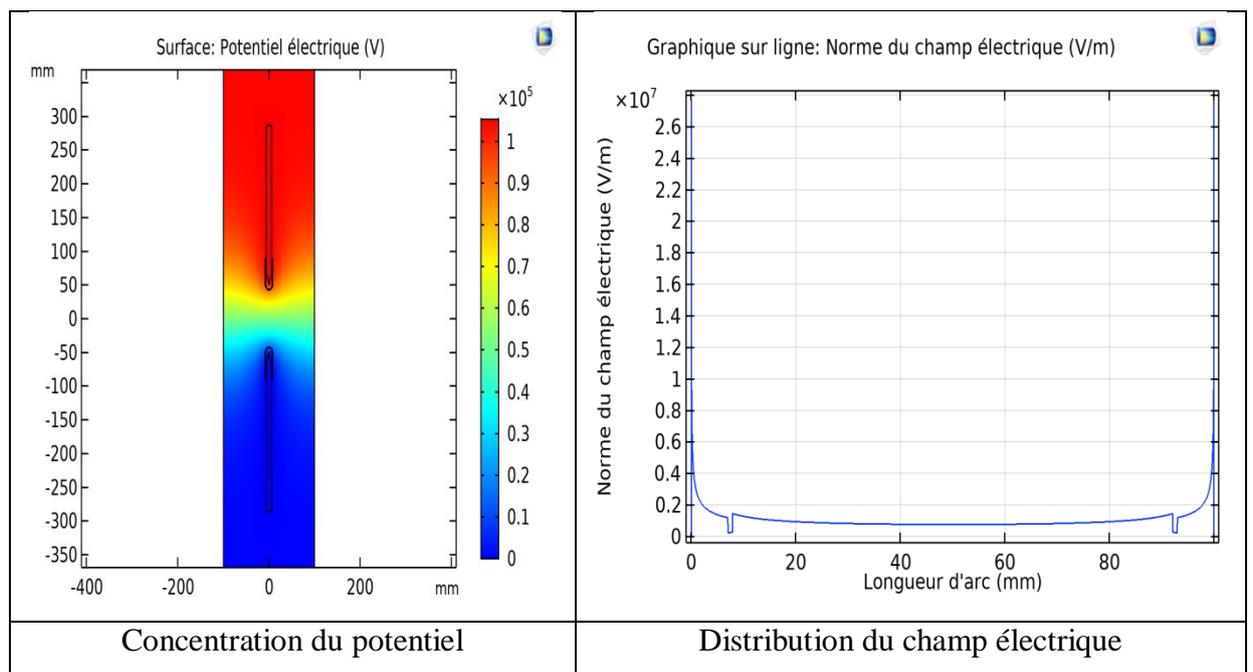


Figure IV. 24 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe – 2 barrière avec revêtement superhydrophobe - pointe pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

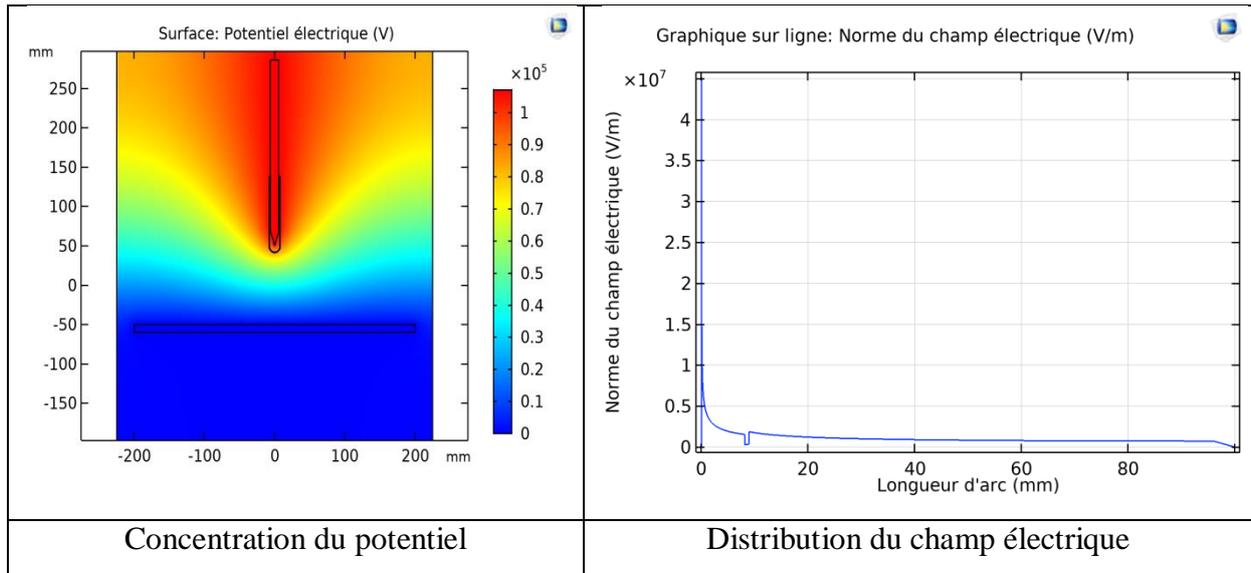


Figure IV. 25 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe - barrière avec revêtement superhydrophobe - plan pour ($d = 10$ cm et $l_b = 10$ cm)

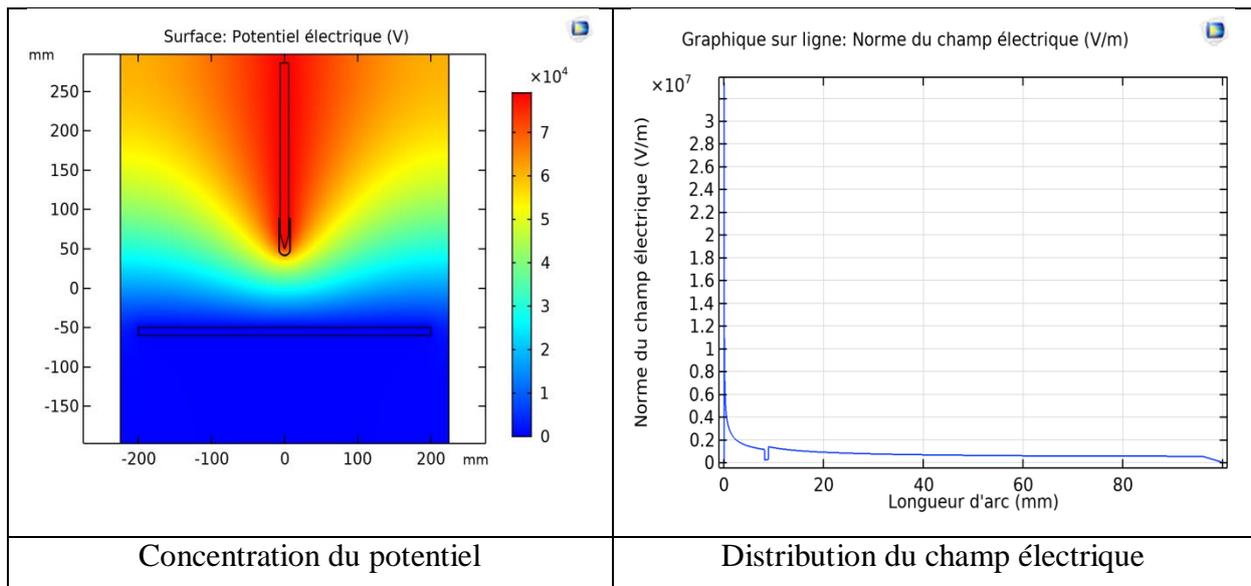


Figure IV. 26 : Répartition du potentiel et champ électrique dans le cas de la configuration pointe - barrière avec revêtement superhydrophobe - plan pour ($d = 10$ cm et $l_b = 5$ cm)

IV. 4 Conclusion

La tension de claquage des configurations avec barrières polluées est presque égale à celle sans barrières. Ce qui nous a poussés à utiliser un autre matériau plus performant.

Les barrières à surface superhydrophobe ont été fabriquées de telle sorte à éviter les deux phénomènes influençant négativement sur l'efficacité du système contenant celles-ci, tel que l'humidité et pollution.

La simulation du champ et du potentiel électrique dans le logiciel COMSOL Multiphysics permettent de prédire le chemin de développement de la décharge électrique. Ce qui donne un avantage à mieux comprendre le phénomène de claquage des systèmes à champ électrique non uniforme.

À partir des informations collectées en celui-ci, nous pouvons éviter la détérioration de n'importe quel dispositif contenant un système pointe-pointe ou pointe-plan avec barrière isolante.

Les résultats obtenus par la simulation montrent une concentration du potentiel électrique sur l'électrode reliée à la source de la haute tension et que l'intensité du champ électrique résultant sur le revêtement superhydrophobe est plus élevée par rapport à une surface non revêtue. Cette amélioration de la répartition du champ électrique sur la surface est due aux propriétés de la surface superhydrophobe.

En fin, nous avons constaté que les résultats de la simulation sont compatibles avec les résultats que nous avons obtenus dans la partie pratique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons commencé notre travail par une recherche bibliographique à explorer les différents aspects de la maintenance industrielle et des matériaux isolants utilisés en génie électrique, les recherches ont mis l'accent sur les matériaux superhydrophobes et leur influence sur les décharges électriques.

Ensuite, l'intérêt de notre travail est l'étude de l'influence d'utilisation de barrière isolante pour les deux configurations pointe-pointe et pointe-plan, afin d'augmenter la tension de tenue et d'assurer une meilleure protection pour notre système.

Les résultats émanant de notre investigation, sont le fruit d'une série d'essais réalisés en laboratoire de haute tension pour évaluer les performances d'une barrière tubulaire isolante en verre propre, polluée et avec revêtement superhydrophobe suivi de simulation à l'aide de logiciel COMSOL Multiphysics version 5.5. Cette simulation a permis de mieux comprendre la distribution du potentiel et du champ électrique dans les deux systèmes. Ces résultats sont résumés en points essentiels suivants:

- La présence d'une couche de pollution sur la barrière isolante augmente la probabilité de claquage. Cela nécessite une maintenance régulière pour notre système.
- L'utilisation de la barrière isolante avec revêtement superhydrophobe empêche les particules de la pollution et de l'humidité de se retrouver sur la surface et assure une augmentation de la tension de tenue et donne une meilleure protection pour notre système.
- La comparaison entre les deux configurations pointe - barrière - pointe et pointe - barrière - plan à montrer que la première est plus avantageuse et présente une tension de claquage plus élevée.
- Le logiciel COMSOL version 5.5 permet bien la prédiction de la distribution du potentiel et du champ électrique et permis d'obtenir une représentation visuelle de ceci, ce qui a contribué à une meilleure compréhension des phénomènes électriques.
- La croissance de la tension appliquée à notre système, engendre une augmentation de l'intensité du champ et du potentiel électrique.
- La présence de la barrière isolante réduit l'intensité du champ électrique et donc les courbes de distributions du champ électrique sont déformées à l'emplacement de cette barrière isolante.

Conclusion générale

Cette étude a apporté une contribution significative à la connaissance et à l'amélioration de la maintenance préventive des installations électriques en haute tension.

Les résultats obtenus, à la fois à partir des essais expérimentaux et des simulations sont compatibles et ont démontré l'efficacité des matériaux isolant superhydrophobe dans la protection et l'amélioration des performances des installations électriques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Nguyen, T. P. K. (2012). Politiques de maintenance et d'investissement sous évolution technologique incertaine (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes (ECN)).
- [2] L. Pintelon, A. Parodi-Herz, « Maintenance: An Evolutionary Perspective », in Complex System Maintenance Handbook, London: Springer London, 2008, p. 21-48. doi: 10.1007/978-1-84800-011-7_2.
- [3] M. Gallab, H. Bouloiz, E. Garbolino, M. Tkiouat, M. A. ElKilani, et N. Bureau, « Risk analysis of maintenance activities in a LPG supply chain with a Multi-Agent approach », J. Loss Prev. Process Ind. mai 2017, vol. 47, p. 41-56, doi: 10.1016/j.jlp.2017.02.026.
- [4] BENAICHA Halima « analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle » thèse doctorat, Université des sciences technologies d'Oran, 2015.
- [5] P. VRIGNAT, Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne, Thèse de Doctorat en Automatique, Université d'Orléans, 2010.
- [6] NF-EN-13306-X-60-319-Terminologie de la maintenance. Norme AFNOR 2001.
- [7] FRIHI, D. (maintenance industrielle). cours ,université Guelma,2015.
- [8] F.Monchy, Maintenance. Méthodes et Organisations, édition DUNOD, 2000.
- [9] Rabah, H. A.(la maintenance industrielle des equipemenrs de l'atelier de filature),(denitex - sebdu.).mémoire master. universite Tlemcen,2013.
- [10] J. Llaurens, « Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique », université Joseph Fourier, faculté de pharmacie de Grenoble, 16 Février 2011, p. 159.
- [11] Y. Noda, H. Nakamoto, S. Yokoyama « accurate modeling of core type distrubution transformers for electromagnetic transient studies ». IEEE transaction on power delivery. Vol 17. Octobre 2002.
- [12] Loubeau, F. (2016). Analyse des phénomènes de vieillissement des matériaux d'isolation électrique de machines de traction électrique (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [13] E. BEN RAHAL, "Etude du comportement des gouttelettes d'eau déposées sur une surface isolante superhydrophobe". Mémoire du projet de fin d'études 2019, Université de Ghardaïa.

- [14] M. Nemamcha :Polycope de cours : « Claquage des isolantes hautes tensions » université de Guelma ,2001.
- [15] A. Kuechler, “Hochspannungstechnik: Grundlagen-Technologie-Anwendungen”, 3ème édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, Avril 2009, Germany.
- [16] R. Boudissa : polycope de cours : « Matériaux en électrotechnique » université de Bejaïa, 2016.
- [17] M. Aguet et M. Lanoz, “Vocabulaire Electrotechnique International, Dispositifs électriques et magnétiques”, In Haute Tension. Pub. CEI, No. 50 (151), Genève, 1978.
- [18] Guide pour l'évaluation et l'identification des systèmes d'isolation du matériel électrique, Publ. CEI, No. 505, Genève, 1975
- [19] Z. Laimeche « Contribution à la caractérisation électrique des matériaux isolants (Application aux huiles de transformateurs de haute tension) », Mémoire Magister. Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne, 2012.
- [20] A. Chabloz, «Technologie des matériaux à l'usage de profession de l'électricité», 1986.
- [21] “Le verre et ses applications”, Glas Trösch Holding AG, Conseil, Bützberg, 4ème Edition, 385, Avril 2013.
- [22] Wacker, “silicones pour applications haute et moyenne tension” www.wacker.com.
- [23] S. Djafri, “pollution des isolateurs”. PFE Ingénieur, promotion 1982, ENP Alger
- [24] A. BENHAMDOUNE, "Effet de la variation de rayon de courbure des électrodes sur l'évolution des décharges électriques parallèles sur une isolation large et polluée". Mémoire du projet de fin d'études 2019, Université de Ghardaïa.
- [25] F. Bouchelga, “Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante large et polluée sous tension continue», thèse de doctorat, université de Bejaia, 2016.
- [26] J-C. Dubois, “Propriétés diélectriques des polymères”, Techniques de l'Ingénieur, E1 850, 1998.
- [27] Jean-Denis brassard, «revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d'application en aérodynamique», l'université du Québec à Chicoutimi, Novembre 2011, pp.
- [28] Futura-Science 2001-2019 consulté le 24/2/2019 10/49
- [29] http://www.mineralogie.fr/Structure_Matiere.html
- [30] “Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces”,Neinhuis, C. Barthlott, W., Ann. Botan. (1997), 79, 667-677.
- [31] D. Quéré, “ Lois du mouillage et de l'imprégnation, “ Tech. Ing, vol. Principe de formulation, no j2140, 2003.

- [32] Emmanuelle Guerret Elina Moncada-Potignon Professeur encadrant : M. Merillhou Lycée Clément Marot CAHORS, "Super-hydrophobie", Olympiades de physique 2014-2015, pp. 15-16.
- [33] « Les surfaces naturelles super hydrophobes », document Word.
- [34] R. N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no. 8, pp. 988-994, 1936.
- [35] A. Cassie and S. Baxter, "Wettability of porous surfaces", *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, pp. 546-551, 1944.
- [36] K.S. Lau, J. Bico and all, "Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests" ,ACS Pulpication, *Nano Letter*, 3,12, pp 1701-1705, 2003.
- [37] Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Mater. Lett.*, "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces", pp. 64, 2722-2724, 2010.
- [38] Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H. ; Lee, Y.K. "Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces", , *TRANSDUCERS 2009 - 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 441-444, 2009.
- [39] Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R. ; Kim, W.D. "Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface", , *Chinese Science Bulletin*, 54, 3613-3616, 2009.
- [40] Kara, A. (2018). Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué (Doctoral dissertation).
- [41] K. OUERDANE, Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales, alger: projet de fin d'études, département d'électrotechnique, université des sciences et technologies houari boumediene, bab Ezzouar, juin 1998.
- [42] C. LEROY, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, paris: collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, 1984.
- [43] KHEBAL, DALI, "Contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques", Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf. M'sila, 2019.
- [44] BAKAI, LAYACHI, " contrôle Non Destructif par Courants de Foucault. (Application aux Pièces Cylindriques et Plaques Muni d'un Alésage) ", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.

Résumer :

Dans les installations électriques en haute tension la maintenance préventive est souvent mise en œuvre pour limiter les défaillances et augmenter la disponibilité et la durée de vie des équipements. Ce mémoire souligne l'importance de la maintenance préventive et le rôle de revêtement superhydrophobe sur les surfaces des matériaux isolants dans la limitation de la présence de la pollution et l'humidité sur cette dernière, cela dans le but de la prévention contre les décharges électriques. L'intituler de ce mémoire propose des pistes pour des futures recherches.

Abstract:

In high voltage electrical installations, preventive maintenance is often implemented to limit failures and increase the availability and lifespan of equipment. This dissertation emphasizes the importance of preventive maintenance and the role of superhydrophobic coating on the surfaces of insulating materials in limiting the presence of pollution and humidity on the latter, with the aim of preventing electric shocks. The title of this dissertation suggests avenues for future research.