

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA

Faculté De Technologie

Département de Génie Électrique

Présenté par :

M^{elle}. SMATI Bahia

M^{elle}. SOUDANI Sarah



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en Électrotechnique

Option : Automatisme Industriel

Thème

Impact du dépôt de gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative

Soutenu publiquement le 27 juin 2017 devant le jury composé de:

M^r B. BENDAHMANE	MCA	U.A.M.Bejaïa	Président
M^r M. LARBA	MCB	U.A.M.Bejaïa	Examineur
M^r R. BOUDISSA	Professeur	U.A.M.Bejaïa	Rapporteur
M^r N. TAIB	MCA	U.A.M.Bejaïa	Co-Rapporteur

Remerciement

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à notre chère promoteur Monsieur R.BOUDISSA qui sait toujours montrer à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, à Monsieur HAMOUR Khaled et Monsieur AOUDIA Hakim de nous avoir donné des coups de main, au laboratoire de haute tension.

Ces remerciements vont à nos parents pour nous avoir encouragés et permis d'entreprendre notre formation. Sans eux, nous n'en serais pas là.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail particulièrement

A mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce qu'ils ont fait pour que je puisse aller aussi loin.

A mes très chers frères et sœurs

A ma famille et particulièrement Hassiba, Dahbia, et Fatma

A toute mes copines de chambre (ancienne et nouvelle F116)

A mes chers amis : Kamel, Rimo, Hassiba, Nassima

A ma binôme Sarah ainsi que sa famille

Bahia

Dédicaces

Mes très chers parents, Je suis fière et contente de réaliser une partie de ce que vous avez tant espéré et attendu de moi. Aucun mot ni dédicace ne saurait exprimée a sa juste valeur, pour toutes les souffrances que vous avez endurées. Je vous dis infiniment merci. Que Dieu vous garde et vous accorde longue vie.

A mon unique sœur ;

A ma binôme bahia ainsi que sa famille ;

Sarah

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Liste des figures et tableaux.....	IV
Liste des symboles.....	X
Liste des abréviations.....	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Caractérisation des surfaces superhydrophobes	
I.1 Introduction	3
I.2 Définitions	3
I.2.1 Mouillabilité	3
I.2.2 Angle de contact	3
I.2.2.1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact.....	3
I.2.2.1.1 Effet Wenzel	5
I.2.2.1.2 Effet Cassis.....	6
I.2.3 Surface superhydrophile	6
I.2.4 Surface hydrophile	6
I.2.5 Non mouillabilité.....	6
I.2.5.1 Surface hydrophobe	7
I.2.5.2 Surface Superhydrophobe	7
I.3 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles	7
I.3.1 Surfaces superhydrophobes naturelles.....	7
I.3.1.1 Insectes	7
I.3.1.2 Animaux.....	8
I.3.1.3 Végétaux	10
I.3.2 Matériaux superhydrophobes artificiels	11
I.3.2.1 Nano tours d'oxyde de zinc sur silicium.....	11
I.3.2.2 Film d'argent sur du cuivre.....	11
I.3.2.3 Gravure chimique de l'aluminium.....	12
I.3.2.4 Nanoparticules de silice dans une matrice d'époxy.....	12
I.4 Propriétés électriques	13
I.4.1 Permittivité	13
I.4.2 Rigidité diélectrique	13

I.4.3 Résistance d'isolement.....	14
I.4.4 Facteur de pertes	14
I.5 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes	15
I.5.1 Dépôt par vapeur chimique.....	15
I.5.2 Dépôt électrochimique.....	15
I.5.3 Photolithographie.....	15
I.5.4 Techniques utilisant le plasma	15
I.6 Applications.....	15
I.6.1 Béton intelligent	15
I.6.2 Ultra - Ever Dry.....	15
I.6.3 StoLotusan.....	16
I.6.4 Transport maritime.....	16
I.7 Conclusion.....	17
Chapitre II : Etat d'art sur la performance électrique d'une isolation hydrophile superhydrophobe sous tension continu négative	
II.1 Introduction.....	18
II.2 Performance électrique des surfaces isolantes hydrophiles.....	18
II.2.1 Pollution uniforme.....	18
II.2.2 Pollution non uniforme.....	23
II.3 Performance électrique des surfaces isolantes hydrophobes	28
II.3.1 Arrangement de gouttes d'eau en ligne droite.....	28
II.3.2 Arrangement de gouttes d'eau en zigzag.....	31
II.4 Performance électrique des surfaces superhydrophobes.....	36
II.5 Conclusion.....	37
Chapitre III : Pollution des isolations superhydrophobes	
III.1 Introduction.....	38
III.2 Définitions	38
III.2.1 Pollution	38
III.2.2 Couche de pollution	38
III.2.3 Degré de pollution.....	38
III.2.4 Salinité.....	38

III.3 Sources de pollution	39
III.3.1 Pollution naturelle.....	39
III.3.1.1 Pollution marine.....	39
III.3.1.2 Pollution désertique	39
III.3.1.3 Autre type de pollution naturelle.....	39
III.3.2 Pollution industrielle	39
III.3.3 Pollution mixte	40
III.4 Sévérité de pollution d'un site.....	40
III.4.1 Densité du dépôt non soluble (DDNS).....	40
III.4.2 Conductance superficielle.....	41
III.4.3 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	41
III.5 Conséquences de la pollution sur les équipements électriques.....	42
III.5.1 Contournement d'une surface isolante hydrophile.....	42
III.5.1.1 Pollution non uniforme.....	42
III.5.1.2 Pollution uniforme	43
III.5.2 Contournement d'une surface isolante hydrophobe.....	44
III.5.2.1 Surface en silicone en position horizontale.....	44
III.5.2.2 Surface en silicone inclinée	45
III.6 Simulation de la pollution au laboratoire	46
III.6.1 Essais sous pollution artificielle	46
III.6.1.1 Méthode de la couche solide	46
III.6.1.2 Méthode du brouillard salin.....	46
III.6.1.3 Méthode de pollution liquide.....	47
III.7 Techniques de lutte contre la pollution	47
III.7.1 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables).....	47
III.7.2 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes).....	47
III.7.3 Revêtements à base de silicones.....	47
III.8 Conclusion.....	48
Chapitre IV : Système automatique de dépôt de gouttes d'eau	
IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Définition et historique	49
IV.2.1 Définition.....	49
IV.2.2 Historique	49

IV.3	Avantage de la robotisation.....	49
IV.3.1	Facteurs économiques.....	49
IV.3.2	Facteurs humain.....	50
IV.3.3	Facteurs environnementaux.....	50
IV.4	Les différents types des robots.....	50
IV.5	Classification des robots.....	50
IV.5.1	Classification fonctionnelle.....	50
IV.5.2	Classification géométrique.....	52
IV.6	Système proposé.....	53
IV.6.1	Fonctionnement du système proposé	54
IV.6.1.1	Déroulement du cycle.....	55
IV.6.1.2	Grafcet.....	56
IV.6.2	Description de la pipette VIAFLO.....	58
IV.6.2.1	Avantage du pipetage multicanaux automatisé.....	58
IV.6.3	Définition d'un moteur pas à pas.....	58
IV.6.3.1	Avantages et inconvénients des moteurs pas à pas.....	59
IV.6.4	Raccordements avec l'automate.....	59
IV.7	Conclusion.....	60
Chapitre V : Expérimentation sur les surfaces superhydrophobe		
V.1	Introduction.....	61
V.2	Modèle expérimental et techniques de mesure	61
V.2.1	Confection d'une surface superhydrophobe isolante	61
V.2.2	Volume des gouttes d'eau et leur angle de contact.....	62
V.2.3	Géométrie des électrodes haute tension et terre.....	63
V.2.4	Arrangement des gouttes d'eau.....	64
V.2.5	Mesure de la tension d'expulsion et visualisation de l'évacuation des gouttes.....	65
V.3	Résultats et interprétation	66
V.3.1	Tension de contournement de l'isolation superhydrophobe sèche.....	66
V.3.2	Nombre de gouttes et leur position par rapport aux électrodes.....	67
V.3.3	Nombre de rangées de gouttes d'eau.....	73
V.3.4	Type d'arrangement des gouttes d'eau sur la surface.....	74
V.3.5	Volume des gouttes d'eau.....	77
V.3.6	Conductivité électrique des gouttes d'eau.....	79

V.3.7 Masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau.....	82
V.3.8 Géométrie des électrodes haute tension et terre.....	84
V.4 Conclusion.....	88
Conclusion générale.....	89

Liste des figures et tableaux

A) Liste des figures

Chapitre I : Caractérisation des surfaces superhydrophobes

Fig. I. 1: Comportement d'une goutte sur une surface.....	4
Fig. I. 2: Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface.....	4
Fig. I. 3: Angle de glissement.....	5
Fig. I. 4: Modèles de Wenzel et de Cassie.....	5
Fig. I. 5: Goutte d'eau sur une surface hydrophile à superhydrophobe.....	6
Fig. I. 6: Gerris sur l'eau.....	7
Fig. I. 7 : Images MEB d'un œil de moustique à différents grossissements	8
Fig. I. 8: Cigale	8
Fig. I. 9: Gecko.....	9
Fig. I. 10: Ecailles d'un requin	9
Fig. I. 11: Canard sur l'eau et goutte d'eau sur sa plume	9
Fig. I. 12: Feuille de Lotus et <i>Salvinia Molesta</i>	10
Fig. I. 13: Plantes notre Dame et <i>Népenthe</i>	11
Fig. I. 14: Films de ZnO sur silicium et d'argent sur du cuivre	12
Fig. I. 15 : Aluminium avec et sans gravure chimique et de la silice dans une matrice d'époxy	12
Fig. I. 16: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension.....	13
Fig. I. 17: Rigidité diélectrique transversale et longitudinale	13
Fig. I. 18: Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique	14
Fig. I. 19: Circuit électrique équivalent série et parallèle	14
Fig. I. 20: Béton intelligent et bottes sans et avec traitement ultra-ever dry	16
Fig. I. 21: Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus	16
Fig. I. 22: (a) sphère d'aluminium sans revêtement (b): sphère superhydrophobe, Chute d'environ 0,15 m (c): une sphère en aluminium et (d): une sphère superhydrophobe.....	17

Chapitre II : Etat d'art sur la performance électrique d'une isolation hydrophile à superhydrophobe sous tension continue négative

Fig. II.1: Différentes configurations d'électrodes étudiées.....	19
Fig. II.2: Schéma de mesure et de visualisation	19
Fig. II.3: Taille des zones polluées asséchées dans les systèmes pointe-plan et pointe-pointe.....	20
Fig. II.4: $U_{DC} = f(l_p)$ pour différentes configurations.....	21
Fig. II.5: $U_{DC} = f(l_p)$ d'une surface isolante comprise entre deux plans.....	21
Fig. II.6: $U_{DC} = f(l_p)$ d'une surface isolante délimitée par une pointe et un plan.....	22
Fig. II.7: $U_{DC} = f(l_p)$ d'une surface isolante limitée par deux points.....	22
Fig. II.8: $U_{DC} = f(l_p)$ des arrangements multi-pointes-pointes et plan-plan plan.....	23
Fig. II. 9: Schéma de mesure de la tension de contournement de l'isolation polluée et de visualisation des décharges électriques résultantes.....	23
Fig. II. 10: Tension de contournement négative en fonction du rapport des conductivités des deux zones différemment polluées de l'isolation	24
Fig. II. 11: $U_{DC} = f(l_p)$ pour divers rapports de conductivités électriques des deux zones polluées de l'isolation.....	25
Fig. II. 12: Evolution des décharges électriques parallèles sur une surface non uniformément contaminée	26
Fig. II. 13: Phases de contournement d'une surface isolante non uniformément contaminée.....	26
Fig. II. 14: Variation de la tension de contournement négative en fonction du rapport des longueurs des deux bandes différemment contaminées	27
Fig. II. 15: Phases de développement des décharges électriques parallèles sur une isolation non uniformément polluée	27
Fig. II. 16: Constellation des gouttes d'eau sur une isolation en silicone et leurs paramètres géométriques.....	29
Fig. II. 17: Dispositif de variation d'angle d'inclinaison de l'isolation	29
Fig. II. 18: Schéma de mesure de tension de contournement de l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface.....	29
Fig. II. 19: $U_{DC} = f(N_r, L_{dd}, L_{de}, l_{rr})$ pour une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($V_d = 45 \mu l, \alpha = 0^\circ$)	30
Fig. II. 20: $U_{DC} = f(\alpha, V_d)$ pour une isolation en silicone hydrophobe sous DC.....	31

Fig. II. 21: Arrangement en zigzag de plusieurs rangées de gouttes d'eau sur la surface d'une isolation en silicone	32
Fig. II. 22: Support de l'isolation en silicone à armature supérieure mobile à angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale variant entre 0 et 90 °.....	33
Fig. II. 23: Schéma de mesure de tension de contournement de l'isolation avec gouttes d'eau et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface.....	33
Fig. II. 24: $U_{DC} = f(N_r)$ de gouttes d'eau recouvrant une isolation en silicone hydrophobe.....	34
Fig. II. 25: $U_{DC} = f(V_d)$ des gouttes d'eau recouvrant une isolation en silicone.....	34
Fig. II. 26: $U_{DC} = f(\alpha)$ d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau à volume V_d inférieur ou égal à 30 μ l	35
Fig. II. 27 : $U_{DC} = f(\alpha)$ d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau à volume V_d supérieur à 30 μ l et inférieur à 90 μ l.....	35
Fig. II. 28 : Comparaison des performances électriques de l'isolation en silicone obtenues pour les deux volumes 60 et 90 μ l	36
Fig. II. 29: $U_{DC} = f(\alpha)$ d'une isolation en silicone avec ou sans accumulation de gouttes d'eau au niveau de sa surface proche de l'électrode à la terre.....	36

Chapitre III : Pollution des isolations superhydrophobes

Fig. III. 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS.....	41
Fig. III. 2: Phases de contournement d'une surface isolante non uniformément contaminée.....	42
Fig. III. 3: Phases de développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante sous distribution transversale non uniforme.....	43
Fig. III. 4: Phases de contournement d'une surface isolante contaminée délimitée par deux plans	43
Fig. III. 5: Couleur jaune orange de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 7$ mS/cm et $V_{g1} = 45 \mu$ l.....	44
Fig. III. 6: Couleur blanche-rose de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 180$ μ S/cm et $V_{g1} = 45 \mu$ l.....	44
Fig. III. 7: Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 29,27^\circ$, $n_r = 5$, $V_g = 45 \mu$ l et $\sigma_v = 180 \mu$ S/cm.....	45

Chapitre IV : Proposition d'un système

Fig. IV. 1: Deux types de manipulateurs.....	51
Fig. IV. 2: Robot programmable.....	51
Fig. IV. 3: Schéma du bras cartésien.....	52
Fig. IV. 4: système proposé.....	53
Fig. IV. 5: Grafcet du déroulement du cycle.....	57
Fig. IV. 6: a) Pipette électronique INTEGRA, b) Robot de pipetage.....	58
Fig. IV. 7: Exemple de raccordement avec l'automate.....	59

Chapitre V : Expérimentation sur les surfaces superhydrophobes

Fig. V.1: Principales étapes de préparation d'une surface en verre superhydrophobe....	61
Fig. V.2: Mesure de volume d'une goutte d'eau avec Micropipette (5 à 100 μ l) et son angle de contact.....	62
Fig. V. 3: Angle de contact en fonction du volume d'une goutte d'eau.....	63
Fig. V. 4: Systèmes d'électrodes utilisées.....	64
Fig. V. 5: Types d'arrangements de gouttes d'eau en zigzag et en ligne droite.....	65
Fig. V. 6: Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes.....	65
Fig. V. 7 : Etat neuf et dégradé de la surface superhydrophobe délimité par les électrodes pleines et à dents.....	66
Fig. V. 8: Tension continue négative d'expulsion de la goutte d'eau en fonction de sa position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe.....	68
Fig. V. 9: Phases de mouvement d'une goutte d'eau le long de la ligne de fuite d'une isolation superhydrophobe.....	68
Fig. V. 10: Tension négative d'expulsion individuelle des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe.....	69
Fig. V. 11: Tension continue négative d'expulsion simultanée des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe.....	69
Fig. V. 12: Tension continue négative d'expulsion de trois gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe.....	70
Fig. V. 13: Tension continue négative d'expulsion des quatre gouttes d'eau en fonction	

de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe.....	71
Fig. V. 14: Tension continue négative d'expulsion des cinq gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe.....	72
Fig. V. 15 : Phases du mouvement de cinq gouttes d'eau sur la surface interélectrode d'une isolation superhydrophobe.....	73
Fig. V. 16: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe selon un arrangement en lignes droites	74
Fig. V. 17: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur arrangement.....	74
Fig. V. 18: Tension continue négative d'expulsion de 25 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe sous un arrangement en ligne droite.....	75
Fig. V. 19: Phases du mouvement de 25 gouttes d'eau sur la surface d'une isolation superhydrophobe sous un arrangement en ligne droite	76
Fig. V. 20 : Tension continue négative d'expulsion des 25 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe sous un arrangement en zigzag.....	76
Fig. V. 21: Phases du mouvement de 25 gouttes d'eau de la surface d'une isolation superhydrophobe sous un arrangement en zigzag	77
Fig. V. 22 : Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur volume.....	77
Fig. V. 23: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau de 40 μ l recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	78
Fig. V. 24: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau de 80 μ l recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	79
Fig. V. 25: Etapes d'expulsion par groupe des gouttes d'eau de 80 μ l recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	79
Fig. V. 26: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité	80
Fig. V. 27: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau d'une conductivité de 1 mS /cm recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	81
Fig. V. 28: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau une conductivité de 20 mS /cm recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	81
Fig. V. 29: Phases d'expulsion des gouttes d'eau d'une conductivité de 20 mS /cm recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	82

Fig. V. 30: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de la masse du kaolin ajoutée à la solution.....	82
Fig. V. 31: Tension continue négative d'expulsion des gouttes de 40g de masse de kaolin recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	83
Fig. V. 32: Etape d'expulsion des gouttes d'eau de 40g de masse de kaolin recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	83
Fig. V. 33: Tension continue négative d'expulsion des gouttes de 60g de masse de kaolin recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	84
Fig. V. 34: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de géométrie des électrodes.....	85
Fig. V. 35: Tension continue négative d'expulsion des gouttes recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en utilisant des électrodes pleines.....	85
Fig. V. 36: Etape d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe, avec apparition d'un filet d'eau suivi d'une décharge.....	86
Fig. V. 37 : Tension continue négative d'expulsion des gouttes recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en utilisant des électrodes à dents.....	86
Fig. V. 38: Etape d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe, avec apparition d'une décharge.....	87
Fig. V. 39: Tension continue négative d'expulsion des gouttes recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en utilisant des électrodes à pont.....	87

B) Liste des tableaux

Tab. II.1: Valeurs des dimensions des zones sèches et des tailles des arcs électriques mesurées dans le cas des configurations pointe-plan et pointe-pointe.....	20
Tab. IV. 1 Capteurs proposés.....	54
Tab. IV. 2 Symboles des moteurs	55
Tab. IV. 3 Avantages et inconvénients.....	59
Tab. V. 1 Valeurs de la tension de contournement de la surface superhydrophobe isolante sèche en fonction de la nature des électrodes HT et terre.....	67

γ : Coefficient de tension superficielle (N/m),

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

γ_{SG} : Tension de surface Solide-Gaz (N/m),

γ_{LG} : Tension de surface Liquide-Gaz (N/m),

θ : Angle de contact ($^{\circ}$),

ϕ_s : Fraction du solide,

α_c : Angle critique correspondant de la tension de contournement la plus faible ($^{\circ}$),

σ_v : Conductivité volumique de la solution polluante (mS/cm),

α : Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface ($^{\circ}$)

- A : angle de glissement ($^{\circ}$)
A: Surface lavée de la barrière (mm)
BR : bras robotisés
C: Conductivité électrique de la goutte (mS/cm)
C_L: Capacité Longitudinale (F)
Cam: Caméscope
DDNS: Densité de dépôt non soluble (mg/cm^2)
DDSE: Densité du dépôt de sel équivalent (mg/cm^2)
D : Diode
E_p: Champ électrique propre (V/m)
E_e: Champ électrique extérieur (V/m)
E_{pl} : Electrode pleine
E_d : Electrode à dent
E_{po}: Electrode à pont
E_i : Rigidité Diélectrique Longitudinale (RDL) (V/m)
E_d: Rigidité Diélectrique Transversale(RDT) (V/m)
G: Conductance superficielle des isolateurs (V/m)
HT: Haute tension
I : Courant totale (A)
I_v : Courant de volume (A)
I_s : Courant de surface (A)
I_c: Courant de contournement (A)
I_d: Courant de perforation (A)
L_{rr}: Largeur entre deux rangées successives (cm)
L_{gg}: Distance entre deux gouttes d'eau déposées (cm)
L_{ge}: Distance entre une goutte d'eau et l'électrode haute tension (cm)
L_{gt}: Distance entre une goutte d'eau et l'électrode terre (cm)
L_{eff}: largeur effective (cm)
l_p : Largeur de la bande polluée (mm)
L_p : Longueur totale de la bande polluée de l'isolation (mm)
L_f: Longueur de la ligne de fuite de l'isolation (cm)
L_{dd}: Distance entre deux gouttes d'eau déposées (mm)
L_{de}: Distance entre une goutte d'eau et l'électrode haute tension (mm)

- L_c : La distance entre les électrodes (mm)
- I_{rr} : Distance entre les centres des deux rangées adjacentes (mm)
- M0 : Moteur de déplacement sur l'axe des X
- M1 : Moteur de descente/ monté du porteur de pipette sur l'axe des Y
- M2 : Moteur d'avancement/reculement du porteur de pipette sur l'axe des Z
- M0_D: Déplacement vers la droite
- M0_G: Déplacement vers la gauche
- M1_d: Descente du porteur de pipette
- M1_m: Monté du porteur de pipette
- M2_a: Avancement du porteur de pipette
- M2_r: Reculement du porteur de pipette
- mk : Masse du kaolin (g)
- M: Position de la goutte au milieu de la surface superhydrophobe
- m_f: Masse du papier filtre contenant la pollution après séchage (mg)
- m_i: Masse initiale du papier filtre (mg)
- N_r: Nombre de rangées de gouttes d'eau
- Ng: Nombre de goutte
- Oe: Objet d'essai
- PC: Ecran Ordinateur
- Q_{ac}: Charges électriques aux armatures (C)
- Q_p: Charges électriques aux armatures (C)
- R_v: Résistance transversale (Ω)
- R_s: Résistance superficielle (Ω)
- R_i: Résistance d'isolement (Ω)
- r: Rugosité
- R_a: Résistance d'affaiblissement de courant (Ω)
- S_{sh}: Surface superhydrophobe
- T_r: Transformateur
- Tr: Transformateur
- T: Position de la goutte au voisinage de l'électrode terre de la surface superhydrophobe
- U_{DC}: Tension Continue négative (kV)
- UC : Unité de commande du transformateur (kV)
- V_g: Volume de goutte (μ l)

X_0 : position initiale

X_1 : capteur de déplacement de X cm vers la droite

Y_0 : position initiale

Y_1 : capteur de position au niveau de la plaque

Y_2 : capteur de position au niveau du réservoir

Z_0 : position initiale

Z_1 : capteur de position de la 1^{er} ligne

Z_2 : capteur de position de la 2^{eme} ligne

Z_3 : capteur de position de la 3^{eme} ligne

Z_4 : capteur de position de la 4^{eme} ligne

Z_5 : capteur de position de la 5^{eme} ligne

Le contournement des isolateurs par un arc électrique, dû à la pollution, est l'une des causes principales de l'interruption de l'alimentation en énergie des réseaux électriques. La maîtrise des conditions optimales du fonctionnement de ces réseaux, vis-à-vis de ce type de défaut d'isolement, commence par le choix d'isolateurs qui présentent les meilleures performances sous pollution. A ce titre, plusieurs solutions comme la nature du matériau isolant qui confèreraient à ce dernier des meilleures performances isolantes. Nous citerons à titre d'exemple les isolations hydrophiles, ces dernières se mouillent, deviennent conductrices et entraînent le court-circuit de l'isolation. Par la suite, les chercheurs ont poussé l'étude et découvrent les surfaces hydrophobes sur lesquelles l'humidité se dépose sous forme de gouttes mais reste collée à celles-ci. Certes ces surfaces présentent des zones sèches mais ont une meilleure performance comparativement aux surfaces hydrophiles. Dernièrement la recherche a montré que ces surfaces se dégradent rapidement dans les régions très humides à cause des décharges répétitives qui mènent au contournement de l'isolation et entraîne sa dégradation.

Afin de contourner ce problème, il fallait trouver un matériau qui ne se mouille pas, les chercheurs se sont donc inspirer de la nature et ont fabriqué des surfaces superhydrophobes, celles-ci sont formées d'une couche sous forme de coussins d'air sur lesquels la goutte se pose est arrive à se libérer facilement de la surface. Cependant, il existe très peu de recherches dans le sens d'intégrer ce type de matériaux dans l'énergie électrique.

Suite à cette brève analyse, le but du présent travail consiste à mener des investigations sur cette surface afin de déterminer la performance de cette dernière sous tension continue négative et de déterminer le degré d'expulsion des gouttes d'eau de cette surface en fonction des paramètres suivants: nombre de gouttes, de rangées, géométrie des électrodes, volume, conductivité et masse de kaolin ajoutée aux gouttes d'eau.

C'est pour cette raison que nous proposons de subdiviser ce présent travail en cinq chapitres. Le premier sera dédié à la caractérisation des surfaces superhydrophobes, leurs propriétés électriques et spéciales, leurs types et leurs applications. Le second sera consacré à l'état de l'art sur la performance électrique des isolations superhydrophobes sous tension continue négative. Le troisième chapitre fera l'objet de la caractérisation de la pollution, ses conséquences néfastes sur les équipements électriques et les techniques de lutte contre elle. Dans le quatrième chapitre nous ferons une proposition d'un système automatisé permettant la rapidité, la facilité et la précision de la position des gouttes d'eau déposées automatiquement. Le dernier chapitre, constituant la partie essentielle de notre travail, sera dédié à l'étude

expérimentale de l'évolution de la tension d'expulsion de gouttes d'eau déposées sur une surface superhydrophobe conçue et réalisée par nous même en fonction des paramètres géométriques et électriques sur ces perles d'eau.

Et enfin nous terminerons notre étude par une conclusion générale.

**Chapitre I : Caractérisation des surfaces
superhydrophobes**

I.1 Introduction

Ce présent chapitre a pour but principal la définition et la caractérisation de la superhydrophobie, l'hydrophobie et l'hydrophilie, la présentation des divers types de matériaux superhydrophobes naturels et artificiels, leurs propriétés électrique et spéciales ainsi que leurs domaines d'application.

I.2 Définitions

I.2.1 Mouillabilité [1]

La mouillabilité caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étale sur une surface solide. Elle dépend de l'angle de contact que forme une goutte d'eau déposée sur cette dernière.

I.2.2 Angle de contact [1]

On appelle angle de contact θ , l'angle que forme la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée. Ses valeurs varient de 0 à 180°, en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

I.2.2.1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact

Si l'angle de contact est presque égale à 0°, alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite superhydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Fig. I. 1a).

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 (Fig. I. 1b).

Si l'angle de contact est compris entre 90° et 150°, alors la surface est hydrophobe et la goutte d'eau sera bombée (Fig. I. 1c).

Si l'angle de contact est compris entre 150° et 180°, on dit que la surface est superhydrophobe et la goutte d'eau sera presque sphérique (Fig. I. 1d) [1].

La forme de la goutte déposée est le résultat de trois tensions différentes (γ_{SL} , γ_{SG} , γ_{LG}) décrites par l'équation de Young [2] comme suit:

$$0 = \gamma_{LG} \cdot \cos\theta + \gamma_{SL} - \gamma_{SG}$$

$$\cos\theta = \frac{(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

γ : coefficient de tension superficielle;

γ_{SL} : Tension de l'interface Solide Liquide;

γ_{SG} : Tension de l'interface Solide Gaz;

γ_{LG} : Tension de l'interface Liquide Gaz;

La tension superficielle est une propriété des liquides permettant de maintenir en équilibre leur surface libre. Cette grandeur intervient principalement dans la formation des gouttes, ainsi que dans les propriétés de mouillabilité des surfaces par les liquides.

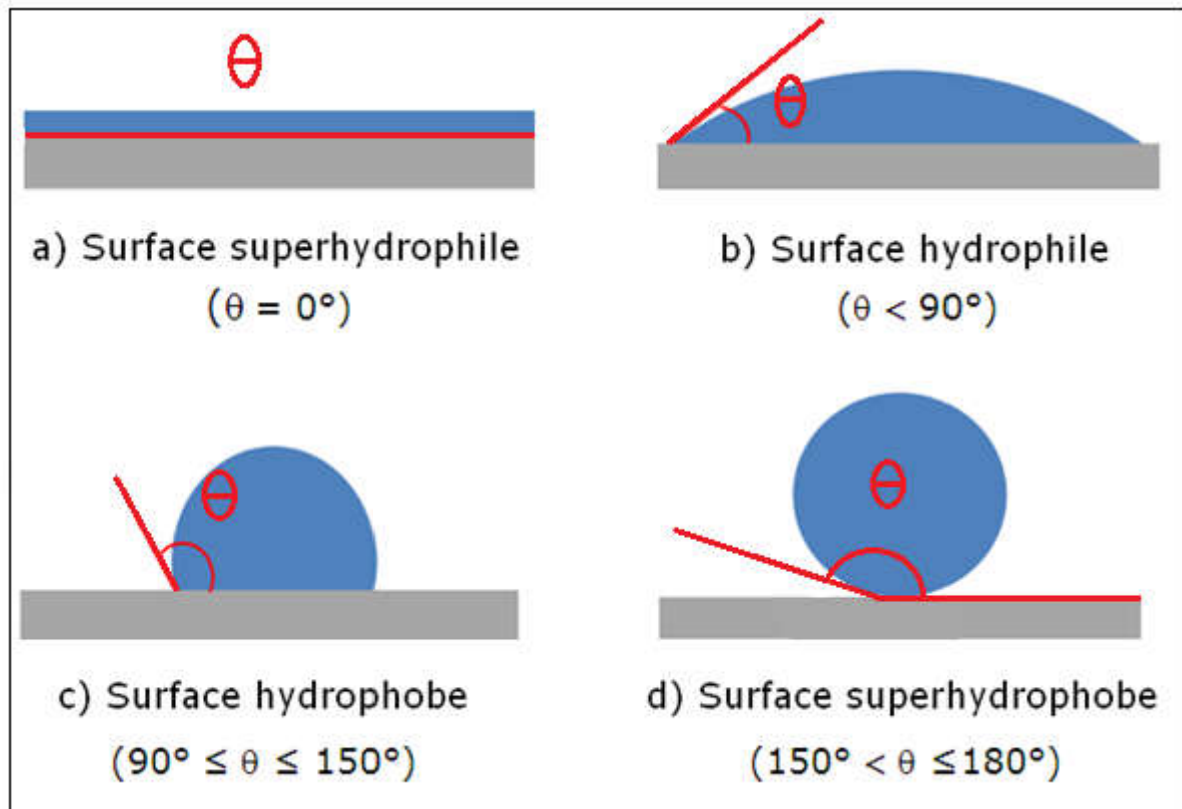


Fig. I. 1: Comportement d'une goutte sur une surface [3]

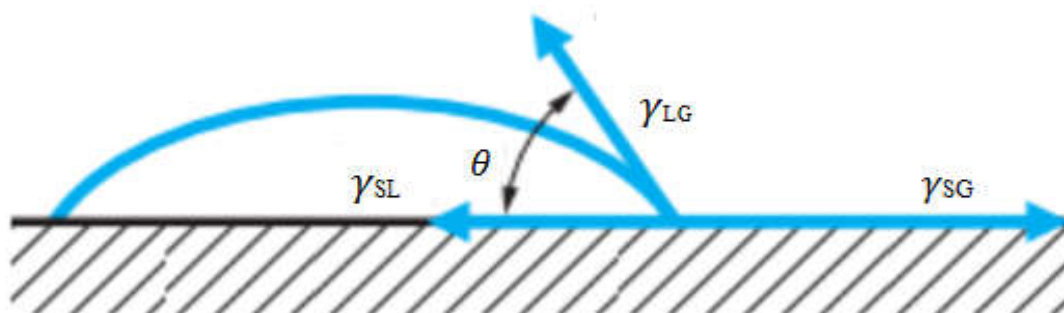


Fig. I. 2: Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface [4]

Sur la figure I. 2, sont présentés les deux cas, qui peuvent se différencier grâce à l'angle de glissement (A), illustré par la figure I. 3. C'est l'angle limite (cas de superhydrophobie), avant que la goutte ne se mette en mouvement. Si cet angle est inférieur à 10 degrés, on est dans le cas Cassie Baxter et s'il est supérieur à 20 degrés c'est le cas de Wenzel [1].

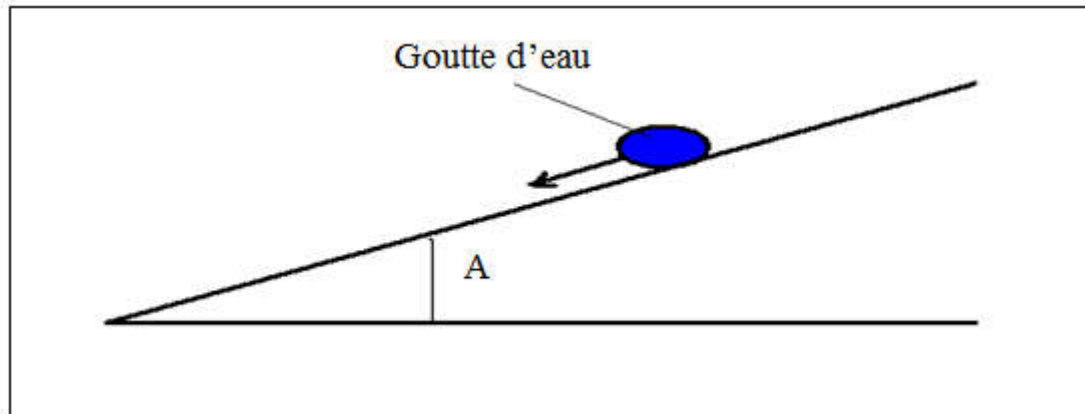


Fig. I. 3: Angle de glissement [1]

I.2.2.1.1 Effet Wenzel [5]

En 1936, Wenzel affirme que lorsqu'on pose une goutte d'eau sur une surface présentant une faible densité d'aspérités, l'épouse, vu que la rugosité s'imprègne et donc retient la goutte sur son support, dans ce cas, le mouillage est partiel.

La relation de Wenzel est la suivante:

$$\cos\theta^* = r \cos\theta \tag{I. 2}$$

r : la rugosité ($r > 1$);

θ : angle de contact sans la rugosité;

θ^* : l'angle de contact avec la rugosité;

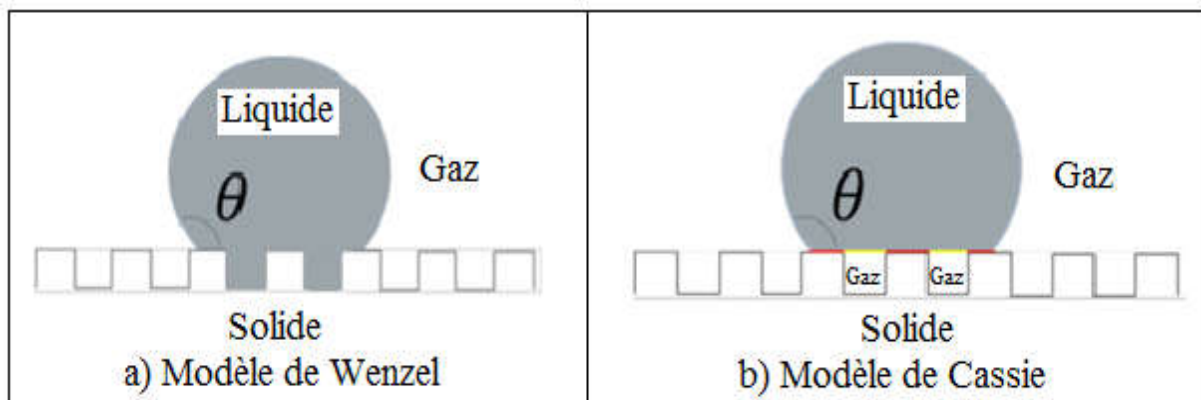


Fig. I. 4: Modèles de Wenzel et de Cassie

I.2.2.1.2 Effet Cassis [6]

Huit ans plus tard, contrairement à Wenzel, Monsieur Cassis Baxter affirme qu’une goutte posée sur une surface ayant un grand nombre d’aspérités n’est en contact qu’avec leurs sommets. Dans ce cas, la goutte ne s’accroche pas voir pas du tout à son support, ce qui crée, des poches d’air entre le solide et le liquide, donc, l’hydrophobie du matériau augmente.

Si non, dans le cas où la surface ne contient pas beaucoup d’aspérités, la goutte d’eau s’empalera sur son support comme l’a affirmé Wenzel.

Equation de Cassis est la suivante :

$$\cos\theta^* = \varphi s \cos\theta - (1 - \varphi s) \tag{I. 3}$$

Avec

θ : angle de contact sans la rugosité ;

θ^* : angle de contact avec la rugosité ;

φs : la fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose ;

$(1 - \varphi s)$: la proportion de surface d’air sur laquelle la goutte est posée.

I.2.3 Surface superhydrophile

Une surface superhydrophile est une surface ayant un angle de contact presque égal 0° avec une goutte d’eau [7].

I.2.4 Surface hydrophile

Une surface hydrophile ($\theta < 90^\circ$) [1] est caractérisée par son aptitude à créer des liaisons d’hydrogène avec des gouttes d’eau qui, en les déposant sur celle-ci, s’étalent, dans ce cas, le contact entre la surface et les gouttes d’eau est maximal (Fig. I. 5a) [8].

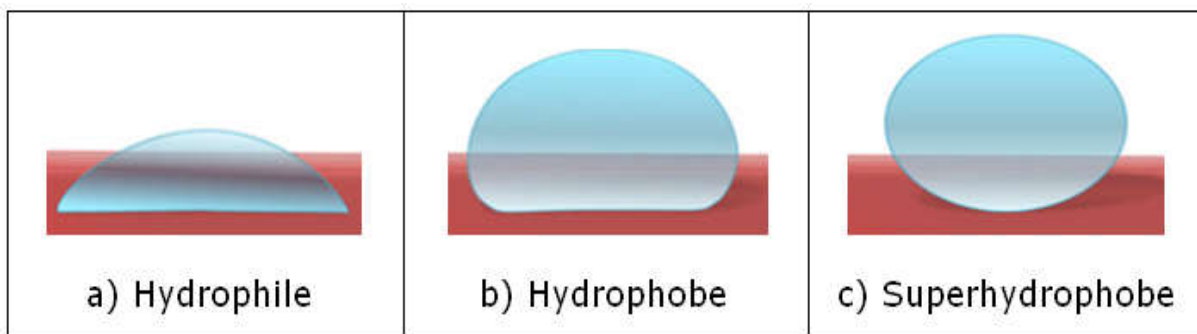


Fig. I. 5: Goutte d’eau sur une surface hydrophile à superhydrophobe [9]

I.2.5 Non mouillabilité

La non-mouillabilité désigne la capacité de la surface d’un matériau à ne pas pouvoir créer des liaisons d’hydrogènes avec une goutte d’eau, c’est ce qui l’empêche de s’étaler sur la surface [10].

I.2.5.1 Surface hydrophobe

Contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes ont du mal à créer des liaisons d'hydrogène avec les gouttes d'eau, qui, en les déposant sur celle-ci, se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau (Fig. I. 5b) [11].

I.2.5.2 Surface Superhydrophobe

Les matériaux superhydrophobes sont une catégorie des matériaux hydrophobes ayant un angle de contact supérieur à 150° .

En y déposant une goutte d'eau, cette dernière a tendance à se rassembler en gardant une forme sphérique (Fig. I. 1d et I. 5c) [1].

La caléfaction est le degré extrême de la superhydrophobicité, on l'atteint en déposant une goutte d'eau sur une plaque chauffante à 300° . La goutte ne s'évapore pas, ceci est dû au film de vapeur qui se crée entre elle et la plaque chauffante, ce qui explique sa mobilité, longévité et son angle de contact proche de 180° [12].

I.3 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles

I.3.1 Surfaces superhydrophobes naturelles

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

I.3.1.1 Insectes

a) Gerris [13]

Le gerris se déplace librement sur l'eau grâce aux micros poiles hydrophobes sur ses pattes qui accentuent l'effet de la tension superficielle (c'est le résultat de l'augmentation de l'énergie à l'interface entre deux fluides) entre ces dernières et la surface de l'eau ; ce qui crée une pellicule suffisante pour supporter le poids de l'insecte sur la surface de l'eau. Les pattes du gerris semblent réaliser le plus grand angle de contact avec de l'eau connu pour les systèmes naturels: $167.6 \pm 4.4^\circ$ (Fig. I. 6).



Fig. I. 6: Gerris sur l'eau

b) Moustique [14]

Le moustique possède yeux superhydrophobes. Des observations au microscope à balayage électronique (MEB: Fig. I. 7a) ont révélé qu'ils étaient dotés de plots, assemblés en réseaux hexagonaux (Fig. I. 7b), et eux-mêmes sont recouverts de petits piliers d'une centaine de nanomètres (Fig. I. 7c et I. 7d).

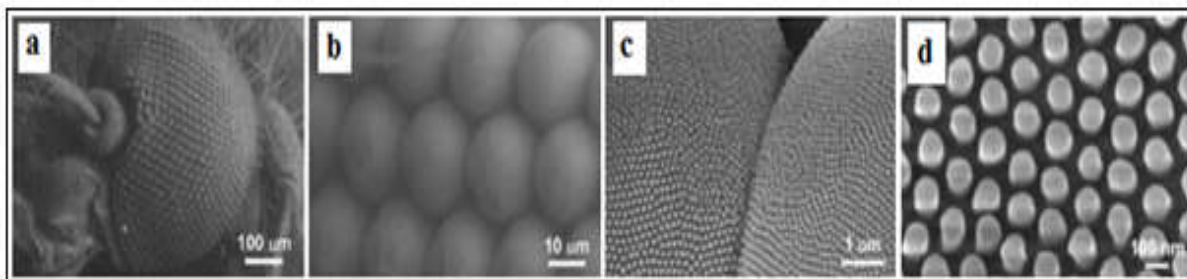


Fig. I.7 : Images MEB d'un œil de moustique à différents grossissements (a: vue macroscopique, b: image des micro-plots qui constituent l'œil, c: Zoom sur deux micro-plots, eux-mêmes couverts de plus petits plots d'un diamètre de 100 nm, d: images tirées de [14])

c) Ailes de cigales [15]

Grâce à leur structure nanométrique, les ailes de cigales ont des propriétés d'antireflets. De plus, les textures sont recouvertes d'une cire qui rend ces ailes superhydrophobes. Une goutte d'eau posée sur leur surface possède un angle de contact proche de 160° (Fig. I. 8).



Fig. I. 8: Cigale (a: aile de la cigale, b: images MEB de la nanostructure de l'aile)

I.3.1.2 Animaux**a) Gecko**

Le gecko est l'un des rares espèces de reptile vivant dans le désert possédant une peau superhydrophobe. Celle-ci est constituée de petites bosses recouvertes de poils [16] microscopiques bien alignés, appelés soies, sur leurs pieds (Fig. I. 9). Leur longueur s'étend de 20 à 70 mm et leur diamètre de 3 à 7 mm. Ces poils rejettent l'eau et donc le gecko s'auto-nettoie [17].

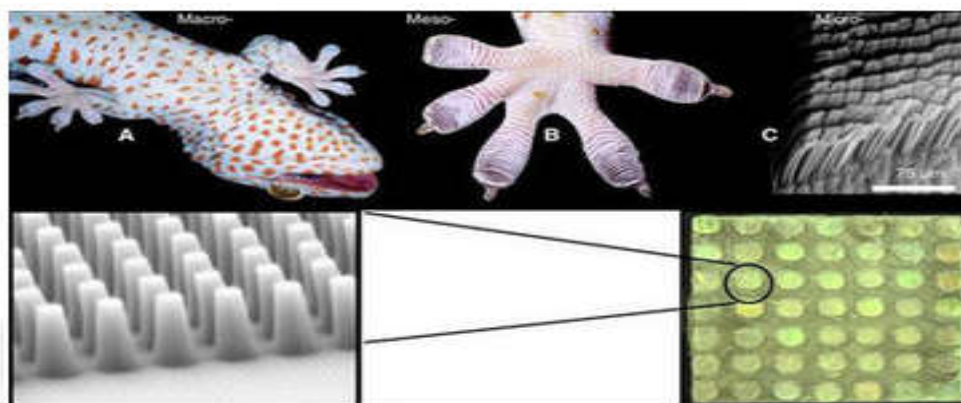


Fig. I. 9: Gecko (A : Photo du gecko, B: patte du gecko, C: Nanostructure de sa peau [17])

b) Poissons [18]

Sous l'eau, on ne parle plus de superhydrophobie mais de superoléophobie, une caractéristique qui correspond à un solide, liquide (eau ou huile). Cette propriété protège les poissons et les requins de la pollution marine (Fig. I. 10).

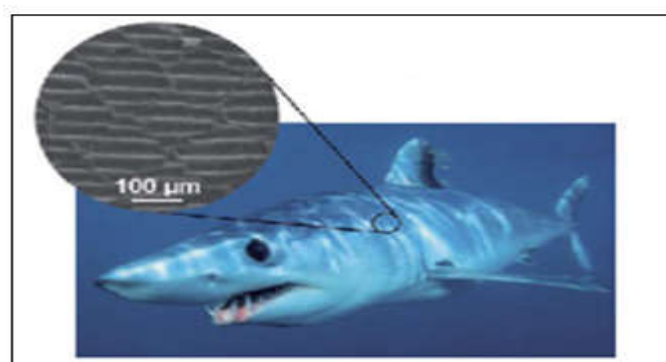


Fig. I. 10: Ecailles d'un requin

c) Canard

Les plumes de canard sont recouvertes d'une graisse superhydrophobe sécrétée par son bec, ce qui lui permet de rester sec à la sortie de l'eau (Fig. I. 11) [19].



Fig. I. 11: Canard sur l'eau et goutte d'eau sur sa plume [20]

I.3.1.3 Végétaux

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

a) Lotus [21]

La feuille de lotus est une surface superhydrophobe ayant un angle de contact supérieur ou égale à 150° . A l'échelle microscopique, la surface de la feuille de lotus est composée de petites collines micrométriques qui, à leur tour, sont recouvertes de petits cristaux de cire nanoscopiques (Fig. I. 12 a). Quand une goutte d'eau tombe sur la feuille de lotus, celle-ci se pose réellement sur les cristaux de cire, ces dernières étant superhydrophobe et autonettoyants permettent à la goutte d'eau de rouler jusqu'au centre de la feuille emportant avec elle toutes les saletés.

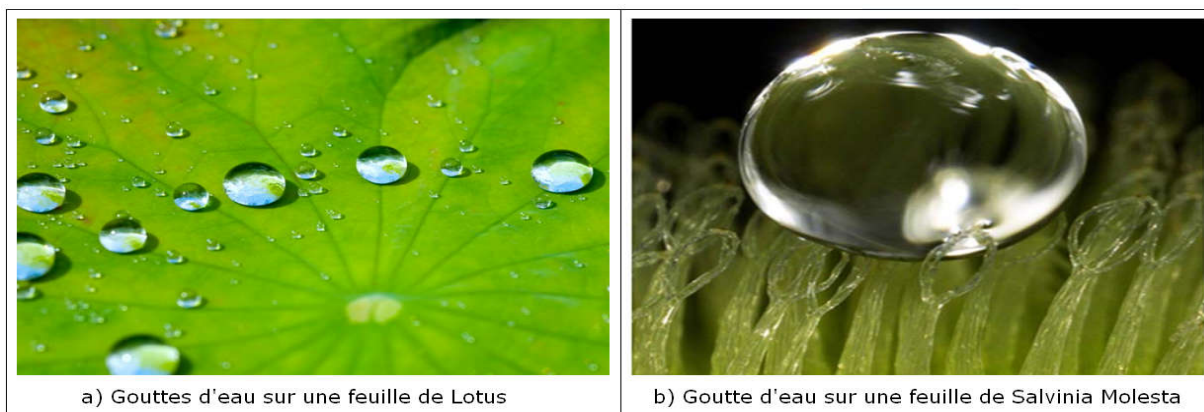


Fig. I. 12: Feuille de Lotus et Salvinia Molesta

b) *Salvinia molesta* [22]

La *Salvinia molesta* est une algue aquatique (fougère) superhydrophobe. Sa surface n'étant pas lisse, mais recouverte de petits fouets hydrophiles qui en contact avec l'eau piègent ses molécules, ce qui crée une barrière d'air entre ces molécules et la surface de la fougère qui reste sèche (Fig. I. 12 b).

c) Notre Dame [23]

Est une plante aussi appelée (Lady's Mantel), recouverte de poils flexibles et hydrophiles qui ont pourtant la propriété d'être superhydrophobes (Fig. I. 13 a).

d) Népente [24]

La plante peut grâce à sa surface superhydrophobe repousser l'eau de pluie vers son intérieur en entraînant avec elle tous les insectes se déposant sur celle-ci (Fig. I. 13 b). Sa périphérie ornée de multiples couleurs sert de surface d'attraction pour les insectes.

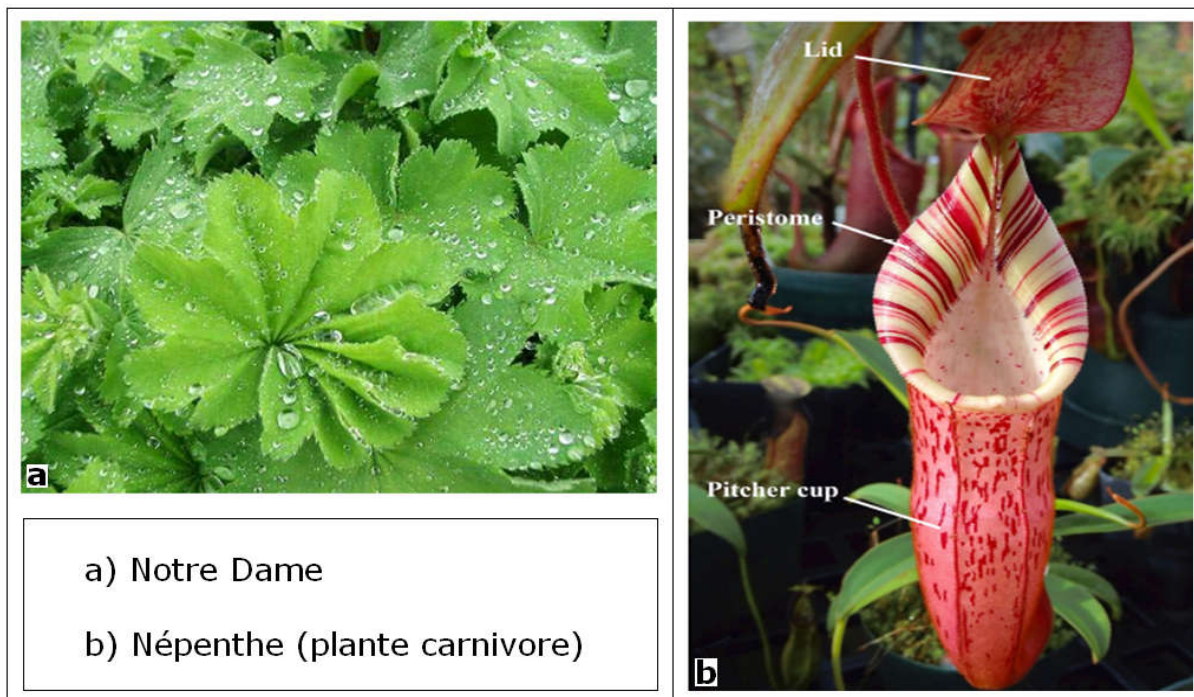


Fig. I. 13: Plantes notre Dame et Népente

I.3.2 Matériaux superhydrophobes artificiels

I.3.2.1 Nano tours d'oxyde de zinc sur silicium [25]

Saleema et coll. ont obtenu des nano tours d'oxyde de zinc sur du silicium (Fig. I. 14 a) par dépôt en bain chimique qui se compose de $Zn(NC>3)2$ et de NH_4OH à $70\text{ }^\circ C$ dans un four, favorisant ainsi l'accroissement en forme de tours. Les rugosités sont ensuite traitées avec de l'acide stéarique, recouvrant entièrement les rugosités et diminuant l'énergie de surface. A base de cette méthode la surface devient superhydrophobe avec un angle de contact de $173 \pm 1^\circ$ dû à la présence d'une structure binaire réduisant la surface de contact et favorisant l'emprisonnement d'air dans la nanostructure.

I.3.2.2 Film d'argent sur du cuivre [26]

En une seule étape Sarkar et coll. ont obtenu un film d'argent superhydrophobe sur du cuivre. Le film est obtenu en introduisant un coupon de cuivre dans une solution de nitrate d'argent et d'acide benzoïque pour différentes périodes. Les analyses par diffraction de rayon X (XRD) ont montré que le cuivre était recouvert d'oxyde de cuivre et d'oxyde d'argent. En faisant l'analyse à l'aide d'un microscope électronique à balayage on remarque l'arrangement de la micro-nano structure (Fig. I. 14b). L'angle de contact sur cette surface est de 162° et a des applications potentielles en réduction de la traînée dans l'eau.

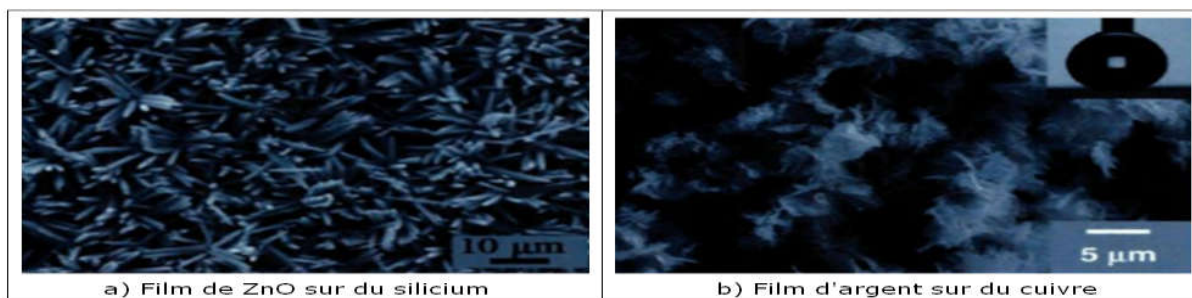


Fig. I. 14: Films de ZnO sur silicium et d'argent sur du cuivre

I.3.2.3 Gravure chimique de l'aluminium [27]

Cette méthode a été utilisée par Sarkar et Coll. le procédé consiste à graver de l'aluminium avec de l'acide chlorhydrique (HCl) puis le recouvrir de téflon par plasma. La (Figs. I. 15a et I. 15b) montre une augmentation de la rugosité avec le revêtement. Les analyses de la surface montrent le dépôt de téflon sur la surface, et l'angle de contact optimal atteint $164 \pm 1^\circ$ avec des propriétés autonettoyantes avec l'écoulement de l'eau. Le procédé utilisé s'avère toutefois coûteux. Il offre des applications potentielles en réduction de l'adhérence de la glace.

I.3.2.4 Nanoparticules de silice dans une matrice d'époxy [28]

Le revêtement superhydrophobe pour les éoliennes était obtenu par Karmouch et coll. A base de mélange des nanoparticules de silice de 15 à 25 nm de diamètre qui servent à donner la rugosité et favoriser l'emprisonnement d'air, avec une résine époxy diluée avec du toluène qui sert d'agent abaisseur d'énergie et d'élément de résistance à l'usure. En faisant l'analyse à l'aide d'un microscope électronique à balayage (Fig. I. 15c) montre la présence de particules en grappes exhibant une topographie à l'échelle du micro et du nano. En utilisant l'époxy comme agent regroupant permet d'obtenir une résistance élevée à l'érosion allouant le revêtement à être utilisé sous les intempéries. En variant la concentration de silice, l'angle de contact sur cette surface atteint 152° au maximum avec 2.5 % masse de silice.

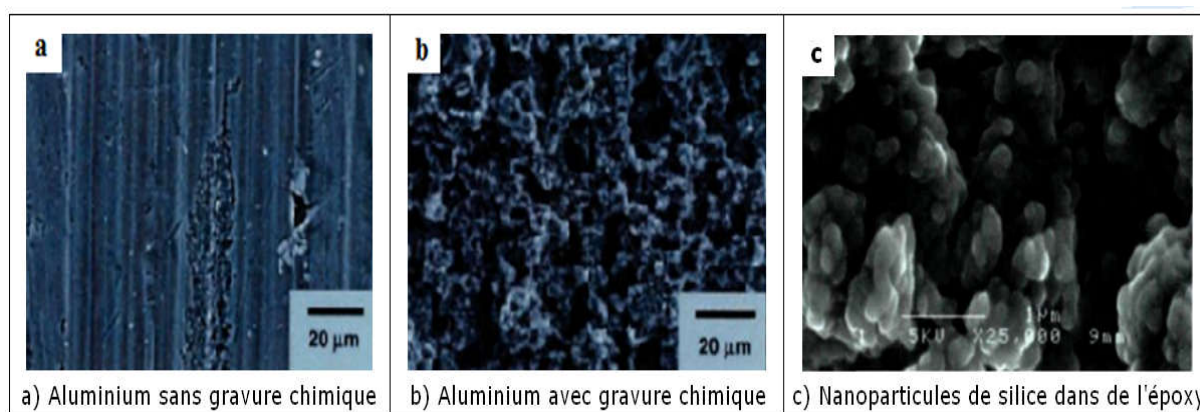


Fig. I. 15 : Aluminium avec et sans gravure chimique et de la silice dans une matrice d'époxy

I.4 Propriétés électriques [29]

I.4.1 Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre E_p à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique (E_e) extérieur appliqué (Fig. I. 16). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

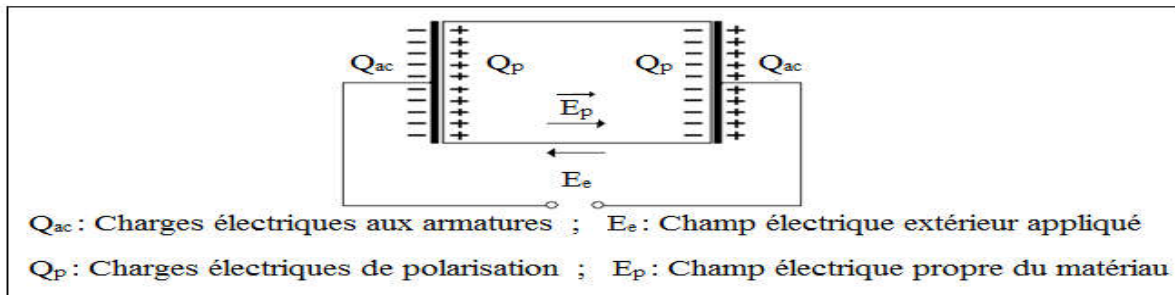


Fig. I. 16: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

I.4.2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction. De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

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

- On parle de rigidité diélectrique transversale (RDT), lorsque le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau. Par contre la rigidité diélectrique longitudinale (RDL) est obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface du matériau (Fig. I. 17).

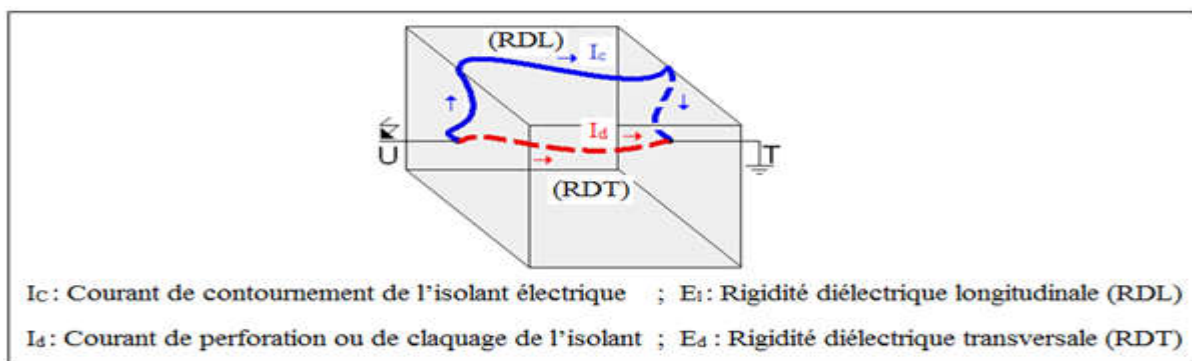


Fig. I. 17: Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)

I.4.3 Résistance d'isolement

On distingue trois types de résistivités (Fig. I. 18):

Résistance transversale ou volumique (R_v)

Elle est déterminée en appliquant un champ 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.

Résistance superficielle (R_s)

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

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.

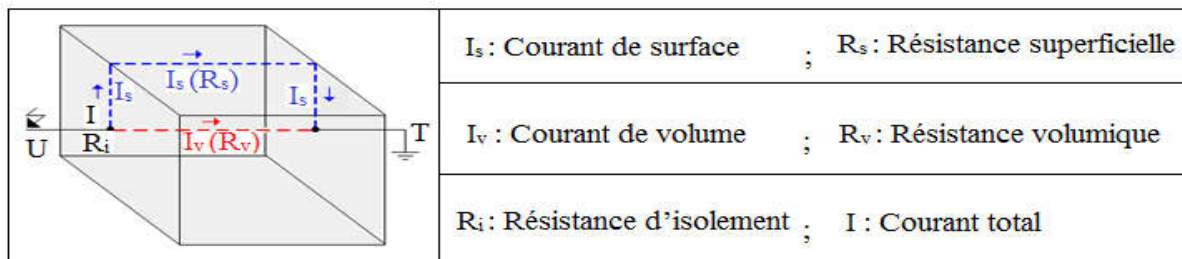


Fig. I. 18: Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique

I.4.4 Facteur de pertes

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Fig. I. 19).

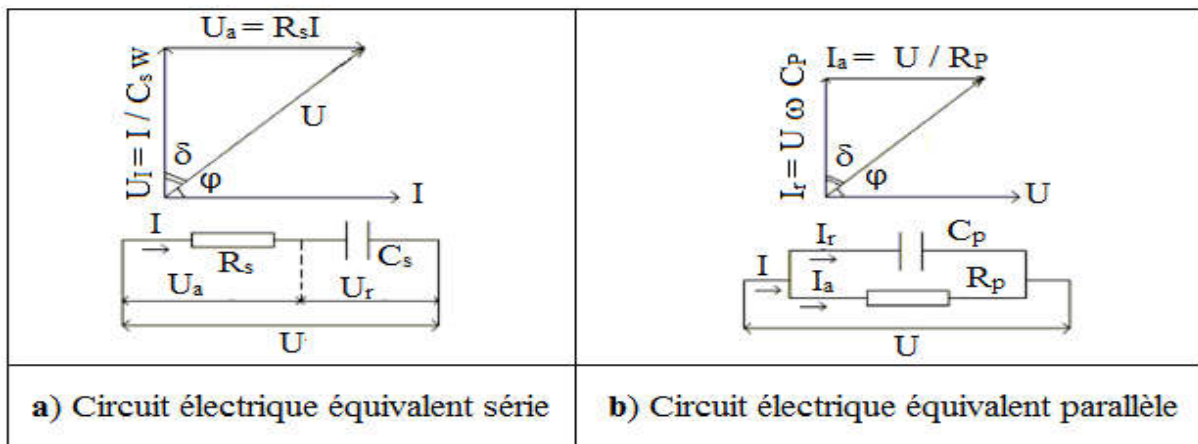


Fig. I. 19: Circuit électrique équivalent série et parallèle

I.5 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes

I.5.1 Dépôt par vapeur chimique [30]

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.

I.5.2 Dépôt électrochimique [31]

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).

I.5.3 Photolithographie [32]

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.

I.5.4 Techniques utilisant le plasma [33]

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.

I.6 Applications

Les industriels s'intéressent de plus en plus au phénomène de la superhydrophobie car elle répond à de nombreux besoins et problèmes des industriels, ainsi que pour les consommateurs.

I.6.1 Béton intelligent [34]

Des chercheurs américains ont mis au point un type de béton qui résiste à l'eau et aux fissures. Ce béton est intelligent grâce à sa composition moléculaire (une surface "pointue") le rendant presque complètement étanche. En versant de l'eau sur ce type de béton, elle forme des gouttelettes qui roulent hors de sa surface.

I.6.2 Ultra - Ever Dry [35]

Ultra - Ever Dry, est un revêtement super hydrophobe qui, en le pulvérisant sur une surface d'un objet, il crée une barrière d'air sur celle-ci. Comme applications de ce type de revêtement, on peut citer: Anti humidité, anti corrosion, anti gel, anti contamination, anti nettoyant.

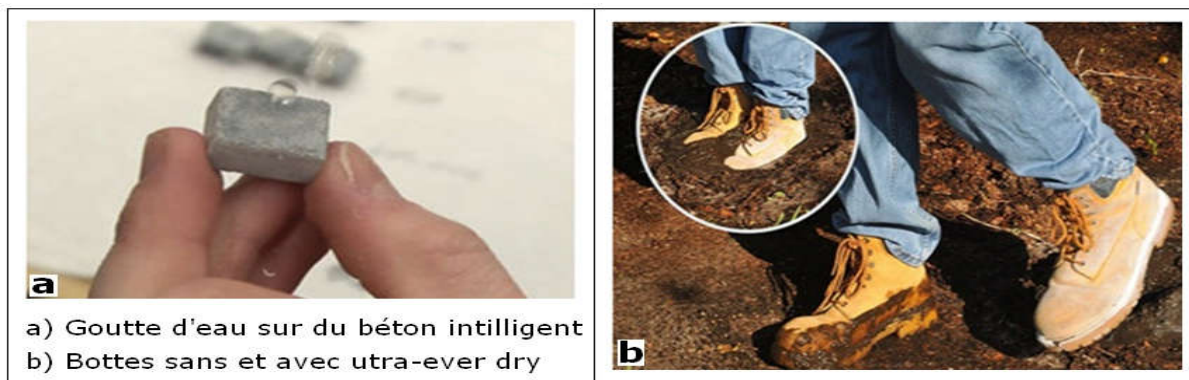


Fig. I. 20: Béton intelligent et bottes sans et avec traitement ultra-ever dry

I.6.3 StoLotusan [36]

On peut l'utiliser sous forme de revêtement de façade avec effet lotus (en béton, en ciment).

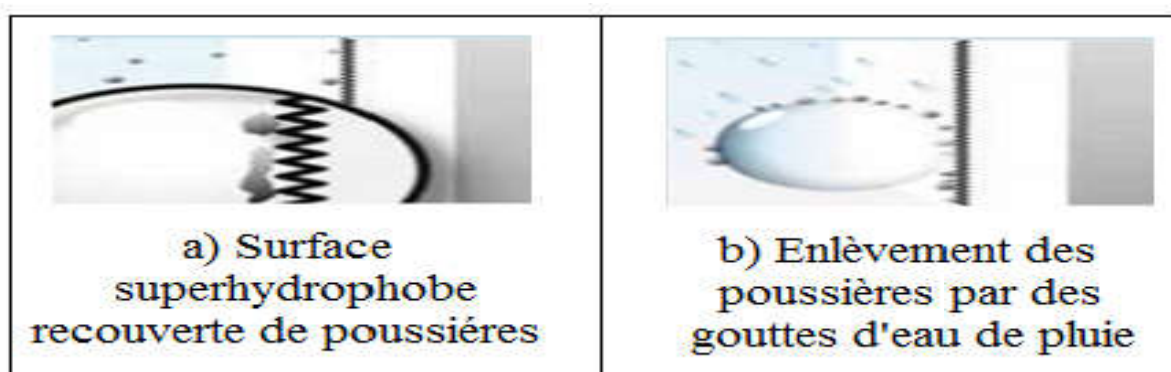


Fig. I. 21: Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus

I.6.4 Transport maritime [37]

Les consommations de carburants fossiles, dans le domaine des transports, ne cessent d'accroître. Dans le but de diminuer ces consommations, plusieurs équipes travaillent à obtenir des alliages plus légers, ou encore des géométries plus aéro- hydrodynamiques.

Toutefois, ces modifications atteignant un apogée, l'utilisation d'un revêtement de surface superhydrophobe offrant une mouillabilité faible, pourrait être la solution. En effet, une surface de contact réduite entre l'eau et le solide en addition à une affinité chimique réduite avec l'eau pourrait diminuer la friction en surface. Plusieurs techniques permettent d'obtenir des surfaces possédant ces caractéristiques.

Lorsqu'on émerge une sphère superhydrophobe dans l'eau, un film d'air se crée autour d'elle (fig. I. 22b) et diminue la friction, ce qui lui permet de se déplacer plus rapidement qu'un sphère ordinaire (fig. I. 22a), qui au contact avec l'eau, elle se retrouve enduite. Cette propriété reste conservée même lors d'une chute d'environ 0,15 m comme le montrent les figures (I. 22c et I. 22d).

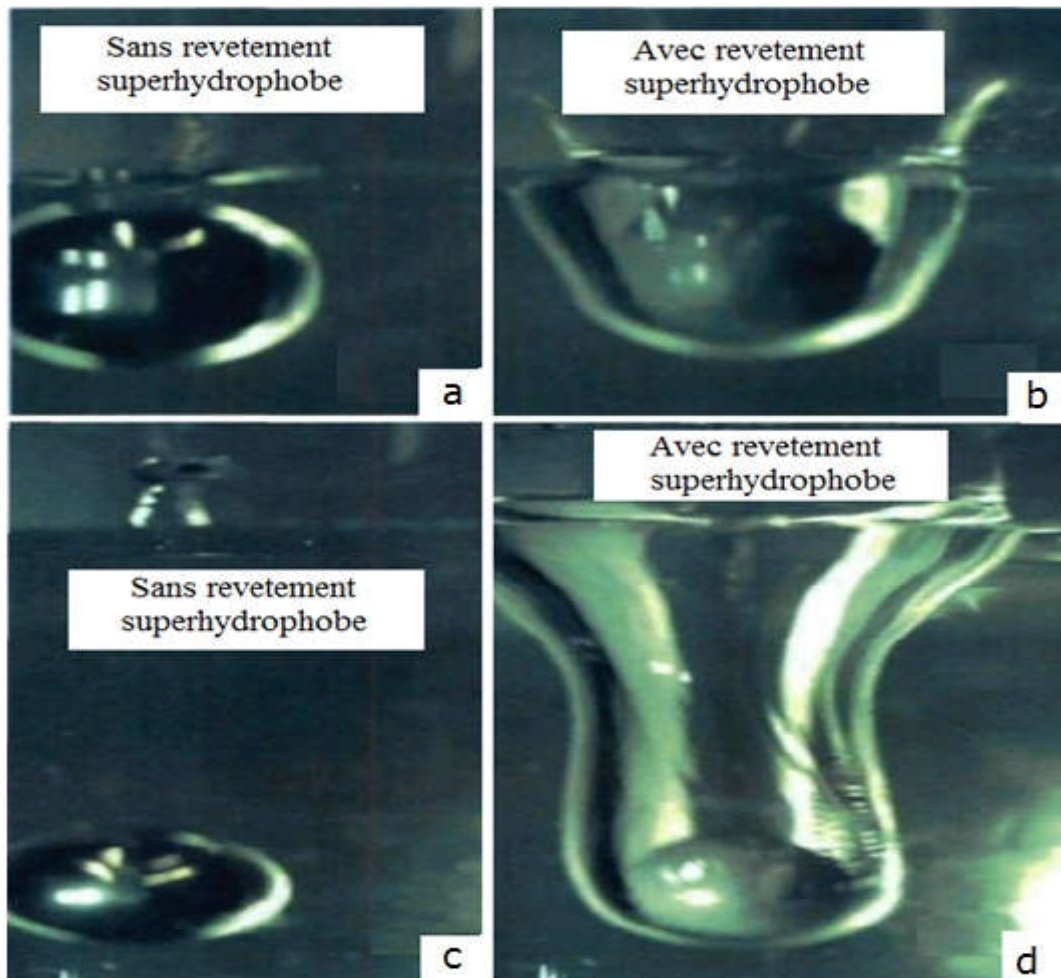


Fig. I. 22: (a) sphère d'aluminium sans revêtement (b): sphère superhydrophobe, Chute d'environ 0,15 m (c): une sphère en aluminium et (d): une sphère superhydrophobe

I.7 Conclusion

L'objectif recherché à travers ce chapitre était la caractérisation de la superhydrophobicité des surfaces et sa comparaison à l'hydrophobicité et l'hydrophilie. Différents types d'objets, d'animaux, d'insectes et de plantes possédant cette propriété ont été présentés dans ce chapitre.

Les diverses techniques de fabrication de matériaux artificielles à caractère superhydrophobe ont été aussi décrites. De plus leurs propriétés ainsi que leurs domaines d'applications ont été passés en revue.

Il résulte des applications données dans ce chapitre que la superhydrophobie n'a pas été introduite dans le domaine électrique. Il serait très intéressant d'investir dans ce domaine si l'on désire améliorer la performance électrique des surfaces isolantes de protection des équipements électrique.

Chapitre II : Etat d'art sur la performance

électrique d'une isolation hydrophile
superhydrophobe sous tension continu négative

II.1 Introduction

Aujourd'hui plusieurs pays se focalisent sur le transport de l'énergie électrique en courant continu tels que l'Allemagne, le Canada, la Chine, USA..., afin de réduire les pertes d'énergie et de s'emparer de l'énergie réactive. Pour cela les chercheurs et les fabricants de matériels électriques ont doublé les efforts pour faire face au risque de dégradation accélérée des matériaux destinés à l'isolation électrique. Pour cette raison, les constructeurs d'isolateurs réels ont mis sur le marché deux types d'isolateurs d'isolement de lignes et postes électriques: les uns sont hydrophiles, les autres hydrophobes. Certes ces derniers présentent une meilleure performance sous pollution humide que les premiers, mais ces derniers temps leur dégradation accélérée sous conditions de forte humidité a été maintes fois prouvée. C'est pour ces raisons qu'un regard est porté par plusieurs chercheurs sur des surfaces à caractère superhydrophobe.

Dans ce qui suit, des investigations essentielles effectuées par différents chercheurs sur la performance électrique des surfaces isolantes hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobes sous conditions de pollution et sous tension continue négative, seront passées en revue.

II.2 Performance électrique des surfaces isolantes hydrophiles

II.2.1 Pollution uniforme

F. BOUCHALGA et R. BOUDISSA [38] ont étudié le développement des décharges électriques parallèles, sur une large surface isolante uniformément polluée sous tension continue. Les paramètres d'influence considérés dans cet article sont: la largeur de la surface polluée, le degré de contamination et la polarité de la tension continue, Pour chaque paramètre d'influence, une série de 25 essais a été réalisée et la valeur retenue est la moyenne arithmétique du nombre de mesures effectuées dans les mêmes conditions. Ces auteurs ont utilisé comme modèle, une plaque en verre rectangulaire de dimensions 40 cm × 30 cm × 0.6 cm et différentes formes d'électrodes (tiges, plans) ont été exploitées. Les électrodes du système à configuration plan-plan sont en fer et de forme parallélépipédique arrondie, de 0.3 cm d'épaisseur, 3 cm de largeur et à longueur variant entre 4 et 32 cm (Fig. II.1). Avec une distance interélectrode (L_f) est égale à 10 cm. Celle-ci est maintenue fixe durant tous les essais et pour toutes les configurations utilisées dans leur étude. Les tiges en fer des systèmes pointe-pointe, pointe-plan ou multi-pointes-pointes, sont fixées sur des tubes en PVC de 45 cm de longueur et de 4 cm de diamètre troués le long de leur taille conformément aux figures II.1b, II.1c et II.1d. Les arrangements multi-pointes-pointes ont servi à la création de décharges parallèles conformément à la figure II.1d. La solution polluante utilisée comprend de l'eau distillée ou de robinet, 20 g/l de kaolin et du sel de table. La

conductivité électrique désirée est obtenue en ajoutant une quantité bien déterminée de sel à la solution considérée. Sa valeur est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile. Les valeurs utilisées dans cette étude s'étalent entre 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 6 mS/cm . La largeur de la bande polluée varie entre 0 et 32 cm, Avant chaque essai, la surface en verre est nettoyée et rincée à l'eau distillée puis séchée à l'aide d'un papier mouchoir. L'application du dépôt polluant sur la surface isolante est réalisée par le biais d'une éponge propre, sur laquelle est apportée au moyen d'une seringue, un volume de 2 ml de pollution durant chaque essai. La solution doit être toujours agitée avant son application sur l'isolation. La visualisation des décharges parallèles a été réalisée par une caméra rapide connectée à un PC pour le traitement de l'image à l'aide d'un logiciel adapté. Pour réaliser les essais ils ont utilisé un modèle expérimental, composé d'une surface isolante sur laquelle repose un système à géométrie différentes (Fig. II.1). Le circuit de mesure de la tension de contournement est illustré par la figure II.2.

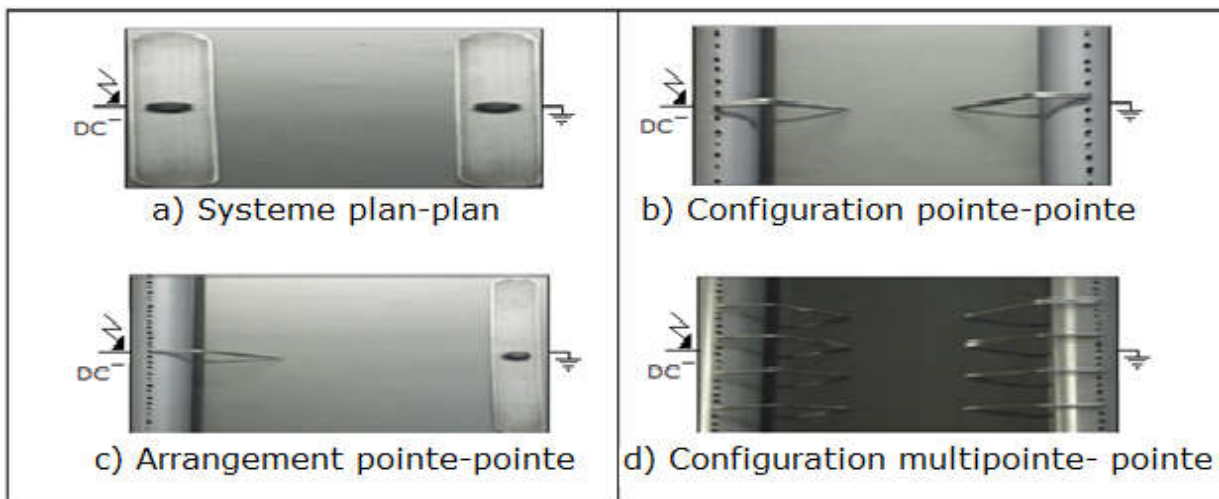


Fig. II.1: Différentes configurations d'électrodes étudiées

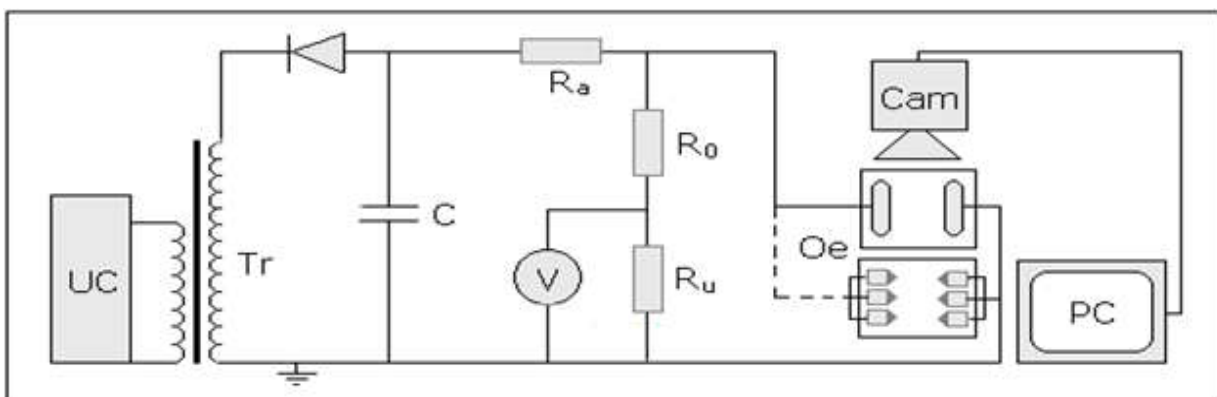


Fig. II.2: Schéma de mesure et de visualisation (UC: Unité de Commande du transformateur; Tr: Transformateur BT/HT; Cam: Caméra rapide; PC: Ecran; Oe: Objet d'essai)

La caractérisation de la largeur effective d'une décharge électrique a été réalisée à l'aide de trois méthodes différentes, à savoir la mesure de la zone sèche, la tension de contournement et établissement d'une formule empirique reliant la largeur effective à la taille de l'arc électrique et le nombre de zones sèches créées en série le long de la ligne de fuite de l'isolation. Les résultats de mesures, émanant de la méthode d'évaluation des dimensions des zones sèches, créées aux alentours des électrodes haute tension et terre des géométries suscitées, sont résumés dans le tableau II.1. Les auteurs ont conclu que la valeur de la largeur de la zone la plus asséchée est de l'ordre de 19.10 cm.

configuration	Valeur moyenne après une série de 20 essais			
	Largeur asséchée en cm (HT)	Largeur asséchée en cm (Terre)	Longueur de l'arc négatif en cm (HT)	Longueur de l'arc positif en cm (Terre)
pointe-pointe	3.8	7	3.17	5.06
Pointe-plan	8.76	19.10	5.66	1.45

Tab. II.1: Valeurs des dimensions des zones sèches et des tailles des arcs électriques mesurées dans le cas des configurations pointe-plan et pointe-pointe

Sur la figure II.3 sont présentées sur les mêmes systèmes d'électrodes des photos de zones sèches obtenues de façon similaire au cas précédant. Les auteurs ont déduit que la taille de la zone sèche entourant la pointe sous tension négative est plus petite que celle formée au niveau de l'électrode terre positive.

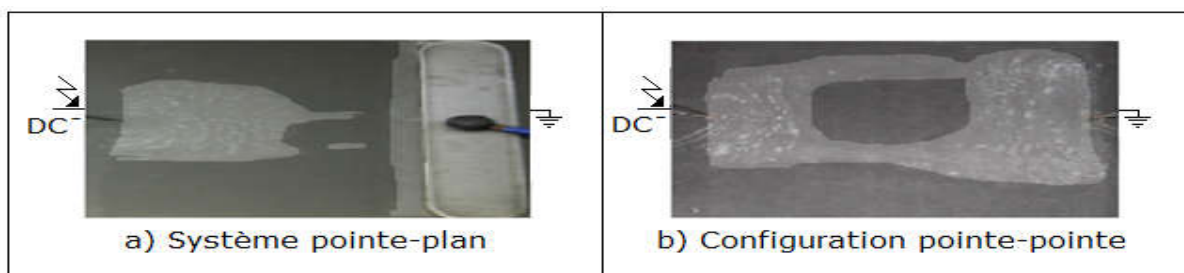


Fig. II.3: Taille des zones polluées asséchées dans les systèmes pointe-plan et pointe-pointe

L'application de la deuxième méthode à l'isolation sous contrainte de tension négative donne la caractéristique $U_{DC} = f(l_p)$, illustrée par la figure II.4. Dans le cas de la configuration plan-plan, il a été constaté que l'allure de la tension de contournement d'une même surface isolante contaminée, selon les mêmes conditions, décroît jusqu'à une largeur limite de l'ordre de 20 cm, et à partir de laquelle sa rigidité diélectrique longitudinale demeure inchangée.

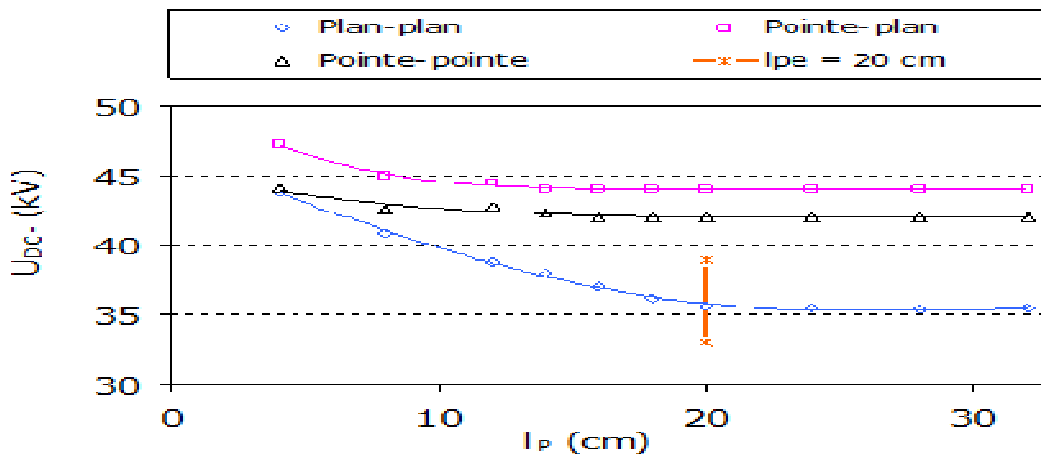


Fig. II.4: $U_{DC} = f(l_p)$ pour différentes configurations ($\sigma_v = 3$ mS/cm)

Les auteurs ont établi une équation liant la largeur effective de la décharge à la ligne de fuite de l'isolation et qui a pour forme:

$$L_{eff} = 2L_f \tag{II.1}$$

La valeur de la largeur effective de la décharge déduite de l'expression ci dessus est égale à 20 cm.

Les figures II.5, II.6 et II.7 donnent l'évolution de la tension négative de contournement en fonction de la largeur de la bande polluée de l'isolation et de la conductivité électrique de la couche polluante.

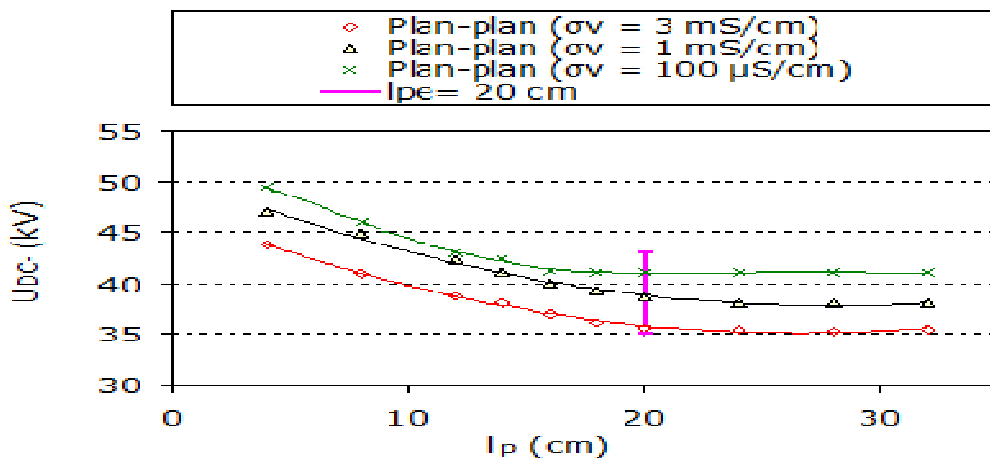


Fig. II.5: $U_{DC} = f(l_p)$ d'une surface isolante comprise entre deux plans

Il en résulte une diminution de la performance du système plan-plan en fonction de l'augmentation du degré de pollution (Fig. II.5). Quant à l'influence de la croissance de la conductivité électrique de la surface isolante sur la largeur effective de l'arc dans la bande polluée est négligeable. Cependant, dans le cas des configurations pointe-pointe et pointe-plan

la conductivité de la couche de pollution n'exerce aucun effet sur la rigidité diélectrique longitudinale de la surface isolante (Fig. II.6, II.7).

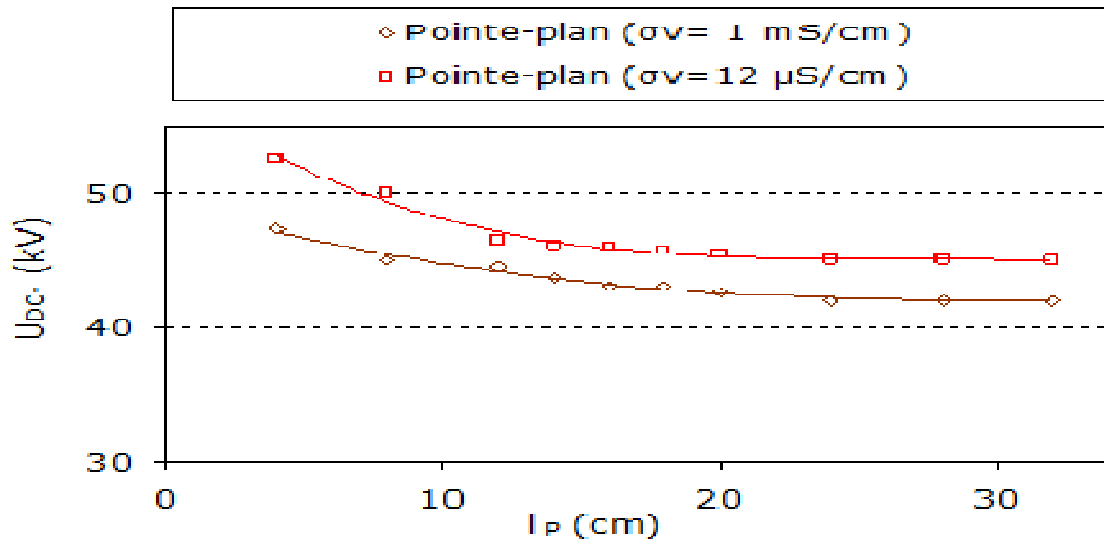


Fig. II.6: $U_{DC} = f(l_p)$ d'une surface isolante délimitée par une pointe et un plan

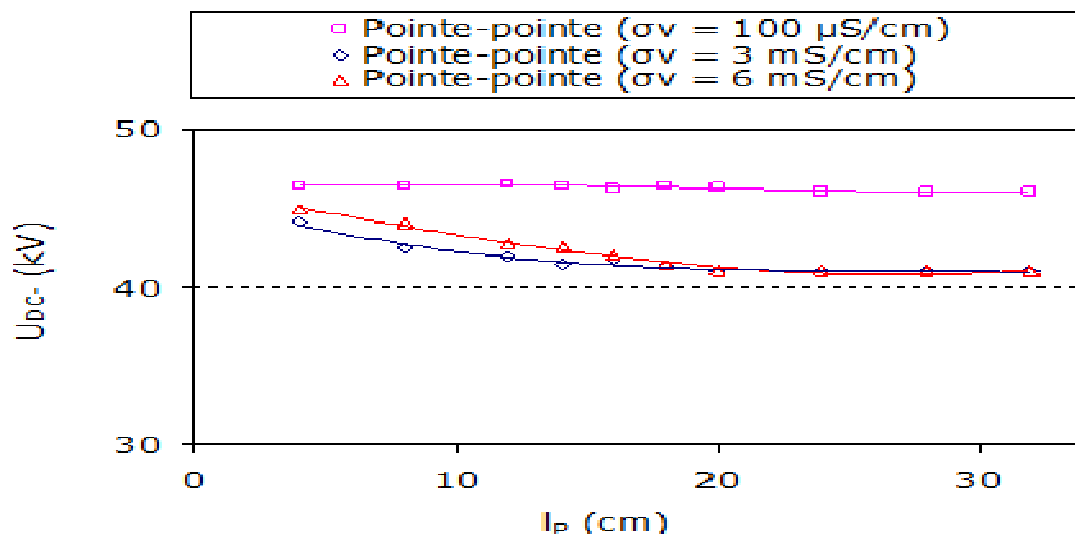


Fig. II.7: $U_{DC} = f(l_p)$ d'une surface isolante limitée par deux pointes

Les auteurs ont démontré que les courbes de tension de contournement correspondant aux arrangements multi-pointes-pointes et plan-plan sont pratiquement confondues (Fig. II.8). La largeur effective de la décharge électrique n'est pas influencée par la forme des électrodes. Ce qui entraîne en conséquence, la clarté de l'équivalence électrique entre les systèmes multi-pointes-pointes et plan-plan.

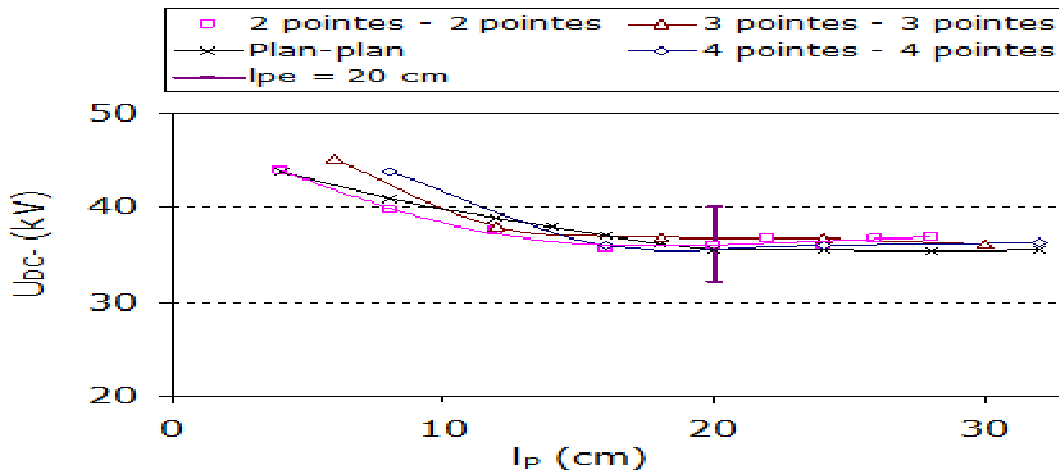


Fig. II.8: $U_{DC} = f(I_p)$ des arrangements multi-pointes-pointes et plan-plan plan

II.2.2 Pollution non uniforme

F. Bouchelga et all [39] ont effectué des travaux expérimentaux se rapportant à l'effet des décharges électriques parallèles sur la performance d'une isolation en verre non uniformément polluée sous tension continue négative. Afin de réaliser une telle étude, ces auteurs ont utilisé une isolation plane mise sous conditions d'une distribution transversale non uniforme de pollution. Ils ont opté pour un modèle expérimental correspondant à une plaque en verre dont sa surface est délimitée par deux électrodes planes. La ligne de fuite de celle-ci a été gardée constante et sa largeur est subdivisée en deux zones à conductivité électrique et taille variable. Sa performance électrique a été déterminée séparément en fonction du rapport de leurs conductivités électriques et leurs largeurs respectives.

Ces essais ont été appuyés par la visualisation des arcs électriques parallèles se développant simultanément et indépendamment sur les deux bandes de pollution suscitées. L'installation électrique utilisée dans le cadre de cette étude est illustrée par le schéma de mesure de la tension de contournement (Fig. II. 9).

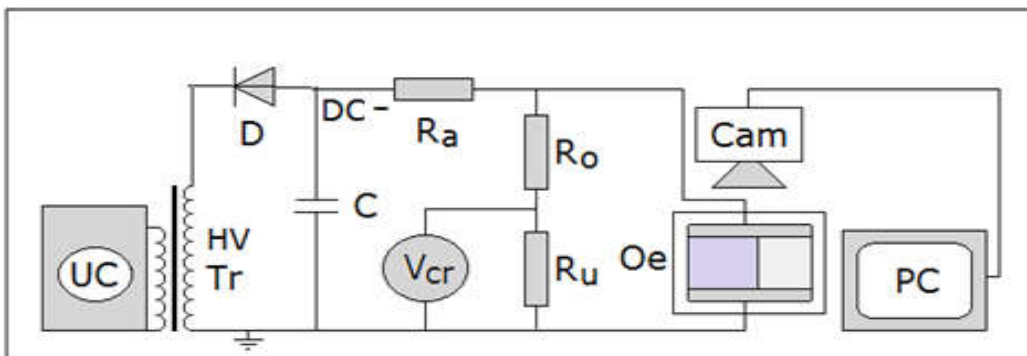


Fig. II. 9: Schéma de mesure de la tension de contournement de l'isolation polluée et de visualisation des décharges électriques résultantes

L'effet du rapport de conductivités électriques différentes de ses deux zones sur la performance électrique sous tension continue négative est illustré par la figure II. 10. Dans ce cas de figure la taille de l'isolation prend quatre valeurs différentes ($L_p = 8, 20, 24, 28$ cm) et chacune d'elles est subdivisée en deux zones partielles à surface égale à la moitié de celle de l'isolation. Ces deux zones sont différemment polluées de telle sorte que la surface de la zone fortement contaminée ait pour valeur de la conductivité électrique égale à $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ et reste constante tout au long des essais effectués dans cette section. Par contre la surface de la zone faiblement polluée voit la valeur de sa conductivité électrique varier entre 0 et $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

La figure II. 10 montre un déclin de la performance électrique de l'isolation non uniformément contaminée jusqu'à une valeur proche de celle obtenue en pollution uniforme correspondant à un rapport de conductivités égale à 0,33. Au-delà de cette limite la tension de contournement garde la valeur acquise.

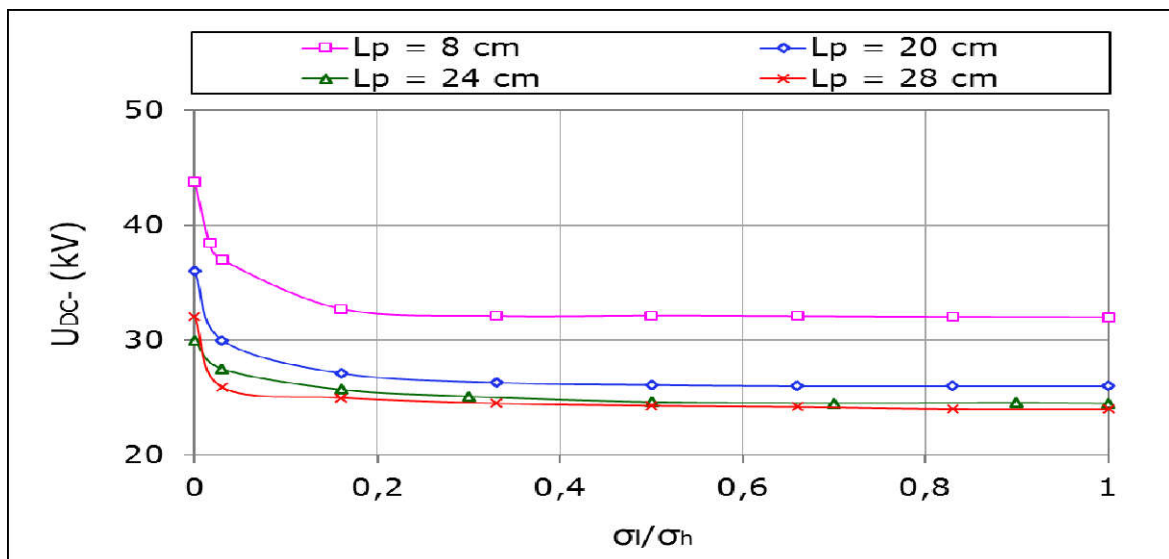


Fig. II. 10: Tension de contournement négative en fonction du rapport des conductivités des deux zones différemment polluées de l'isolation (σ_l : variable de 0 à $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$, $\sigma_h = 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$, L_p : longueur totale de la bande polluée de l'isolation)

Par contre la figure II. 11 illustre le déclin de la performance électrique d'une isolation sous conditions de pollution non uniforme jusqu'à une valeur limite de la largeur totale de l'isolation de l'ordre de 24 cm et au-delà de laquelle la tension de contournement de celle-ci demeure constante quel que soit le rapport de conductivités des deux zones différemment contaminées.

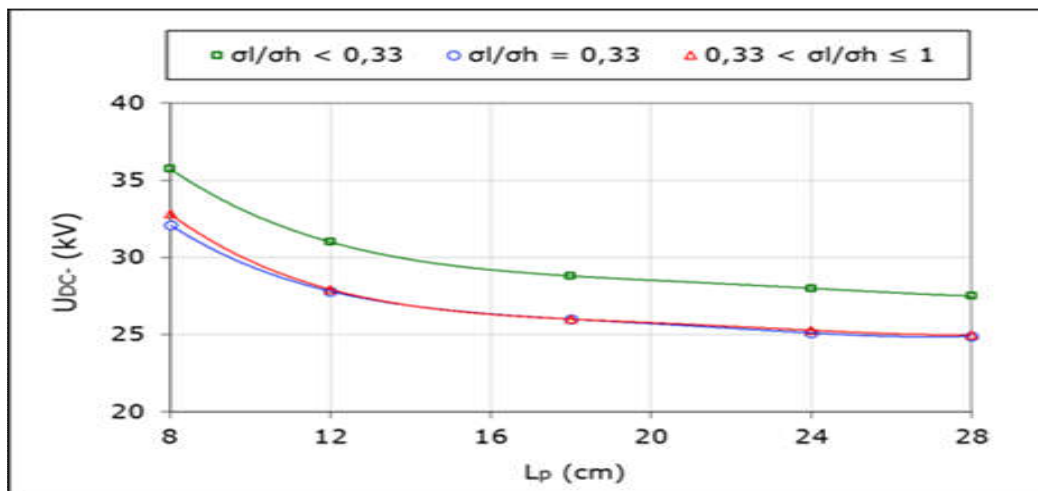


Fig. II. 11: $U_{DC} = f(l_p)$ pour divers rapports de conductivités électriques des deux zones polluées de l'isolation

Les figures II.12 et II. 13 représentent respectivement les quatre phases de l'évolution des décharges parallèles sur les deux zones différemment polluées et celles du contournement. Sous polarité négative, les auteurs ont remarqué tout d'abord l'apparition des arcs électriques positifs dans la zone fortement polluée du côté de l'électrode terre qui sont suivis par des arcs électriques négatifs du côté HT de la même zone (Figure II.12a). En troisième phase, des arcs électriques positifs prennent naissance tardivement dans la zone faiblement polluée (Figure II.12 b). En dernière phase, l'arc précurseur arrive à sa longueur critique et contourne la zone fortement polluée bien avant la formation des arcs électriques négatifs et parallèles dans la bande faiblement contaminée de l'isolation (Figure II.12d). Dans ce cas de figure ($L_p < 2 L_c$), il existe un seul arc critique et précurseur juste avant le contournement de l'isolation sous condition de répartition transversale non uniforme de pollution.

Les auteurs ont conclu que c'est toujours la surface de la zone fortement polluée qui est souvent contournée par une décharge électrique indépendamment du rapport des conductivités examinées. La zone fortement polluée est dotée d'une conductivité très grande et par conséquent une résistance de la couche de pollution recouvrant sa surface plus faible. Ceci explique son court-circuit très fréquent par l'arc électrique de contournement de cette zone et l'extinction de l'arc évoluant dans la zone faiblement contaminée.

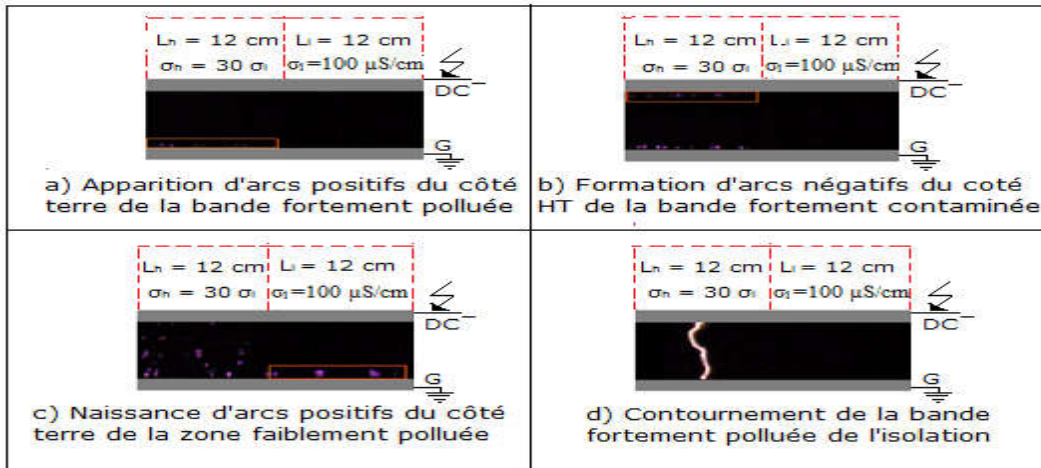


Fig. II. 12: Evolution des décharges électriques parallèles sur une surface non uniformément contaminée ($L_1 = 12$ cm avec $\sigma_1 = 100 \mu\text{S/cm}$ et $L_2 = 12$ cm avec $\sigma_2 = 30 \sigma_1 = 3000 \mu\text{S/cm}$)

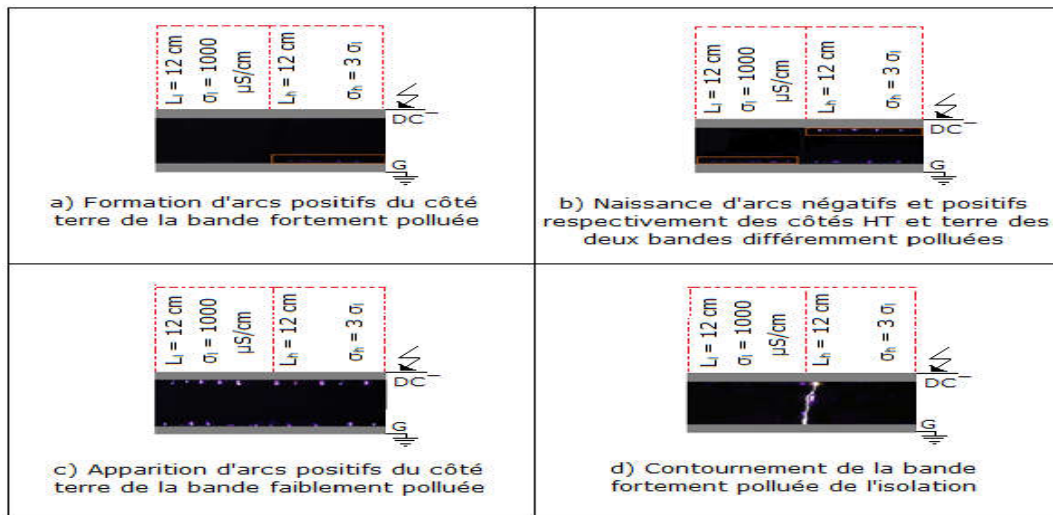


Fig. II. 13: Phases de contournement d'une surface isolante non uniformément contaminée ($L_p = 24$ cm, $L_1 = 12$ cm avec $\sigma_1 = 1000 \mu\text{S/cm}$ et $L_2 = 12$ cm avec $\sigma_2 = 3 \sigma_1 = 3000 \mu\text{S/cm}$)

Bien que les arcs électriques, issus de la zone fortement contaminée, prennent naissance avec une très légère avance sur ceux émanant de la zone faiblement polluée (Fig II.13a et 13b), mais ceux-ci finissent par se faire rattraper à cause du très faible écart de valeur des conductivités électriques des deux zones de l'isolation et la figure II.13 c met en évidence et en relief la similitude de l'intensité et des tailles des différents arcs électriques positifs et négatifs développés à ce stade. Celui-ci ressemble à la situation rencontrée lors de l'isolation mise sous condition de pollution uniforme, où les arcs électriques se rivalisent dans leur progression en diminuant en nombre. Celui qui aurait atteint sa taille critique, il entraînera le contournement de l'isolation indépendamment de la nature de la zone (faiblement ou fortement conductrice) dans laquelle il se trouve à l'instant du contournement de l'isolation.

Les auteurs ont aussi étudié l'effet de la variation du rapport de longueur des deux zones différemment polluées. Cet effet est illustré par la figure II. 14. Celle-ci montre une décroissance de la performance électrique de l'isolation entre deux valeurs correspondant respectivement au cas où l'isolation en verre est faiblement et uniformément contaminée avec un dépôt polluant de conductivité électrique égale à $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ ou $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ et celui où l'isolation est totalement recouverte d'une couche de pollution de conductivité électrique élevée ayant pour valeur égale à $5000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

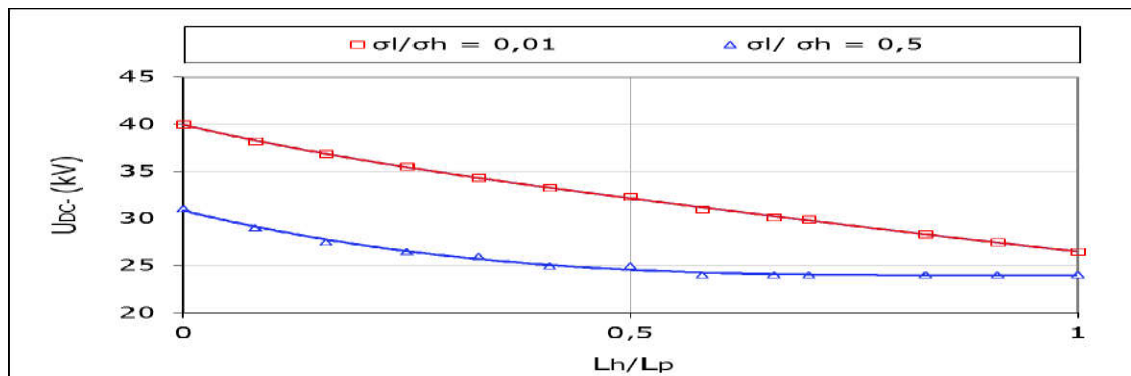


Fig. II. 14: Variation de la tension de contournement négative en fonction du rapport des longueurs des deux bandes différemment contaminées ($L_p = 24 \text{ cm}$)

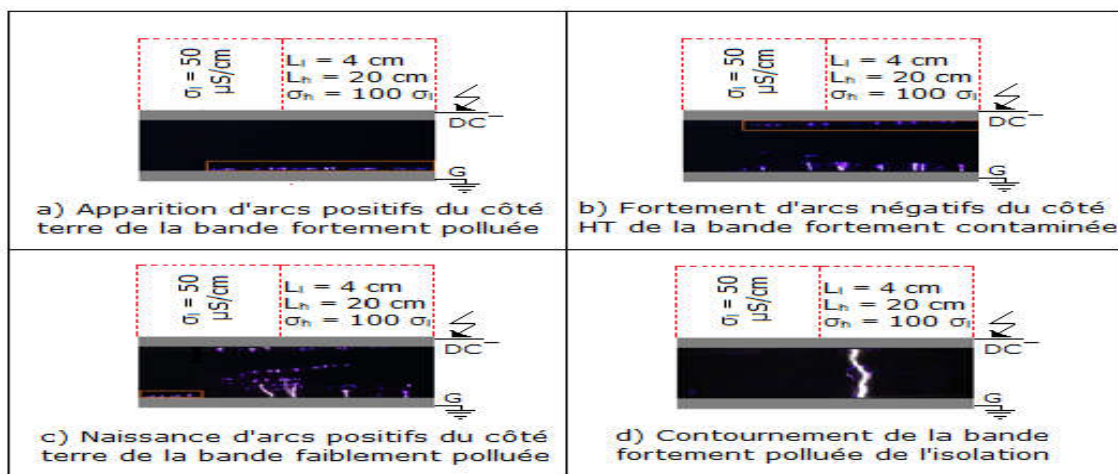


Fig. II. 15: Phases de développement des décharges électriques parallèles sur une isolation non uniformément polluée

Les auteurs ont étudié les phases de développement des décharges électriques parallèles sur une isolation non uniformément polluée avec les dimensions suivantes: $L_p = 24 \text{ cm}$, $L_l = 4 \text{ cm}$ avec $\sigma_l = 50 \mu\text{S}/\text{cm}$, $L_h = 20 \text{ cm}$ avec $\sigma_h = 100 \sigma_l = 5000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Ces différentes phases sont illustrées par la figure II. 15. Ils ont souligné que dans ce cas, le contournement de l'isolation s'effectue dans la zone fortement polluée avant la progression des décharges électriques parallèles dans la zone faiblement polluée.

II.3 Performance électrique des surfaces isolantes hydrophobes

II.3.1 Arrangement de gouttes d'eau en ligne droite

R. Boudissa et all [40] ont effectué des travaux expérimentaux se rapportant à l'effet de l'angle d'inclinaison sur la performance électrique d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue négative et positive. Afin de réaliser une telle étude, ces auteurs ont utilisé une surface en silicone parallélépipédique délimitée par une géométrie d'électrodes planes à champ électrique quasi uniforme, illustrée par la figure II.16. Celle-ci est constituée d'une plaque en silicone de dimensions 130 mm x 120 mm x 6 mm, sur laquelle sont posées les deux électrodes en fer pleines de forme cylindrique, dont l'une est reliée à la terre et l'autre à la haute tension. La largeur l des électrodes pleines est de 120 mm, leur diamètre ϕ_e est de 30 mm et arrondies à leur extrémités de telle sorte à ce que leur rayon de courbure soit égal à 15 mm. La ligne de fuite totale de l'isolation entre les électrodes de base L_c est fixée à 60 mm. Les valeurs du volume des gouttes d'eau choisies dans le cadre de cette étude sont prises égales à 20, 30, 45, 60 et 90 μl . les valeurs de la conductivité électrique de ces gouttes d'eau sont respectivement de 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10 mS/cm . Les gouttes d'eau sont disposées sous forme de rangées en ligne droite sur la ligne de fuite de l'isolation à raison de 5 gouttes par rangée. Afin de faire varier l'angle d'inclinaison de la surface isolante par rapport à l'horizontale α , un dispositif illustré par la figure II. 17, a été confectionné. Celui-ci est en bois, de 500 mm x 500 mm x 400 mm de dimensions. Il est peint de plusieurs couches de vernis afin de l'empêcher d'absorber les gouttes d'eau atterrissant sur celui-ci à la fin de chaque essai. Sa paroi supérieure est reliée à une rotule lui permettant de passer de la position horizontale ($\alpha = 0^\circ$) à la position verticale ($\alpha = 90^\circ$). La fixation d'un angle d'inclinaison quelconque peut être obtenue au moyen de deux tiges passant par des trous appropriés, réalisés spécialement sur ses deux faces verticales opposées afin de bloquer la paroi à une position correspondant à l'angle suscitée (Fig. II. 17a). La figure II. 17b donne par exemple la position correspondant à l'angle α égal à 90° .

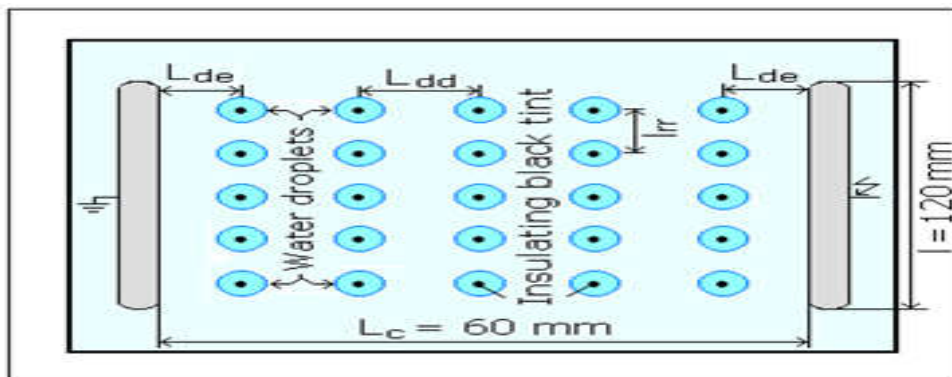


Fig. II. 16: Constellation des gouttes d'eau sur une isolation en silicone et leurs paramètres géométriques (l_{rr} : distance entre les centres de deux rangées adjacentes de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation, L_{dd} : distance entre les centres de deux rangées successives de gouttes d'eau le long de la ligne de fuite L_c , L_{de} : distance entre l'électrode haute tension ou terre et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche de celles-ci le long de cette ligne de fuite)

La connexion du modèle expérimental aux circuits électriques de mesure de la tension de contournement de l'isolation et de visualisation du phénomène de décharge électrique évoluant sur sa surface est illustrée par la figure II. 18.

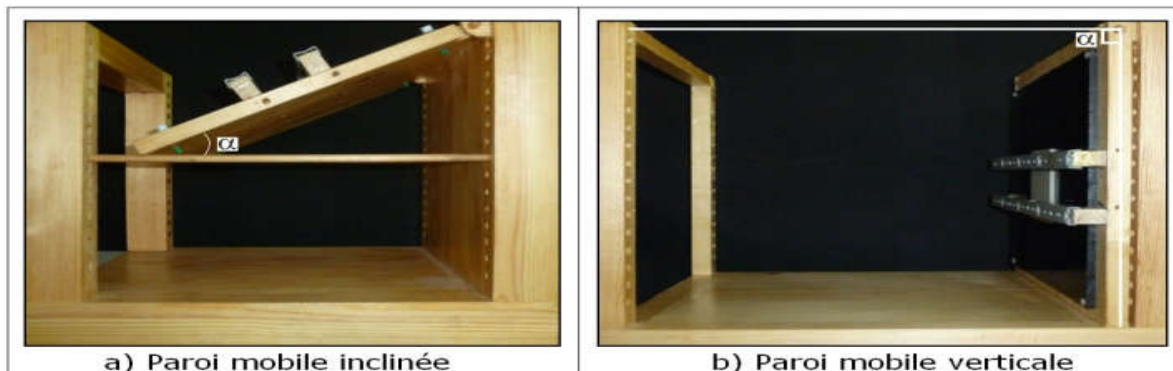


Fig. II. 17: Dispositif de variation d'angle d'inclinaison de l'isolation

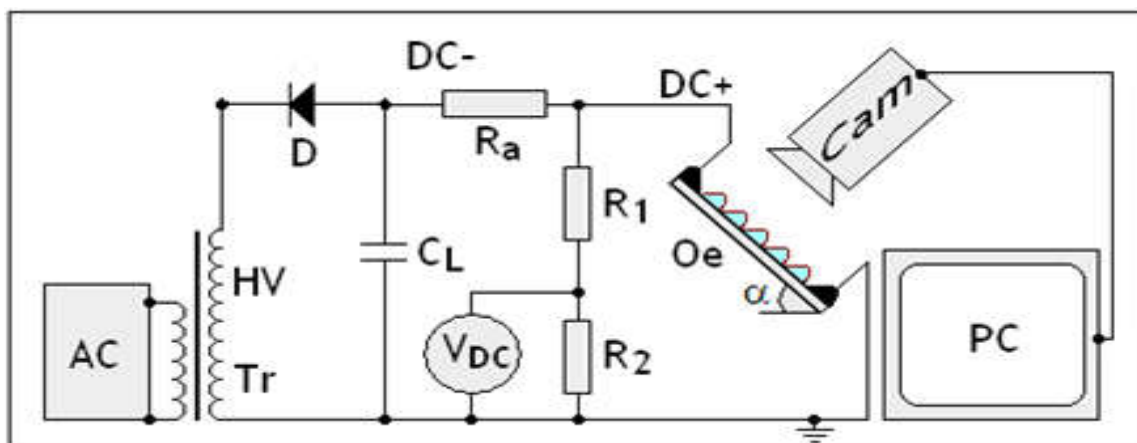


Fig. II. 18: Schéma de mesure de tension de contournement de l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface

L'effet du nombre de rangées de gouttes d'eau sur la performance électrique d'une surface isolante en silicone hydrophobe sous tension continue négative est illustré par la figure II. 19. Dans ce cas de figure, un volume moyen de 45 μl des gouttes a été choisi par les auteurs. Il en résulte que pour une distance quelconque entre les centres de deux rangées successives situées sur la largeur de l'isolation, un déclin rapide de la tension de contournement de l'isolation à partir d'une valeur correspondant à l'absence de gouttelettes d'eau sur la surface de ce dernier jusqu'à une valeur limite du nombre de rangées de gouttes d'eau a été constaté. A partir de ce nombre limite, elle demeure constante indépendamment du nombre de rangées supplémentaires ajoutées sur la largeur de celle-ci.

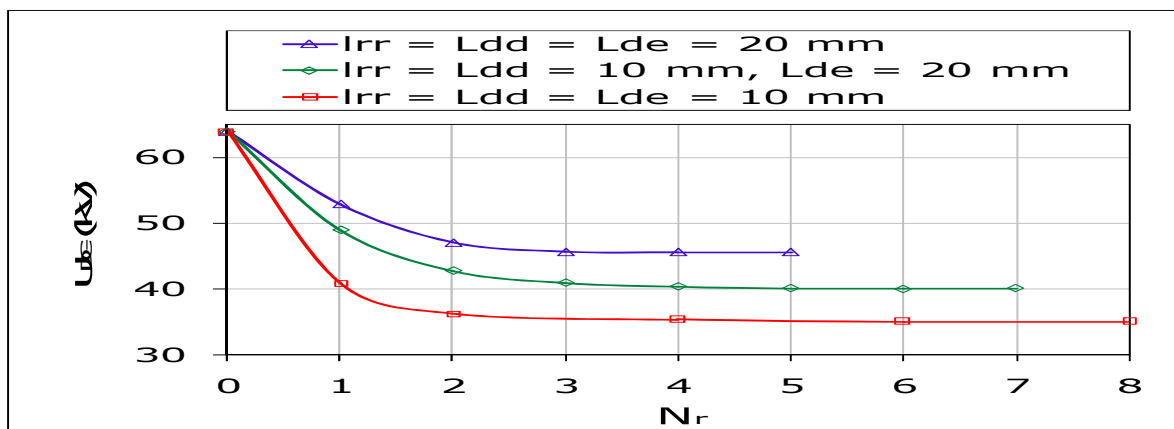


Fig. II. 19: $U_{DC} = f(N_r, L_{dd}, L_{de}, L_{rr})$ pour une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ($V_d = 45 \mu\text{l}$, $\alpha = 0^\circ$)

Les auteurs ont montré que l'influence simultanée du volume des gouttes d'eau et de l'angle d'inclinaison de l'isolation hydrophobe se traduit par l'existence d'un couple de valeurs de ces deux paramètres pour lesquelles la caractéristique du matériau, $U_{DC} = f(\alpha)$, présente un minimum. La plus faible valeur de la performance enregistrée dans cette étude est obtenue sur une isolation en silicone hydrophobe en position horizontale et recouverte de grosses gouttes d'eau à faible conductivité électrique. La chute totale de celle-ci s'élève à 69 % dans ce cas.

- De plus, une élévation de la conductivité électrique des gouttes d'eau peut générer une chute supplémentaire de la performance de l'isolation de l'ordre de 12 %, de telle sorte que la diminution totale de celle-ci peut atteindre 82 % sous conditions de forte pollution humide.
- Enfin, moyennant l'hypothèse que la taille des gouttes d'eau de pluie, est de loin plus volumineuse que celle des gouttelettes formées sur les isolateurs en silicone sous tension lors du phénomène de forte condensation, les résultats émanant de cette étude montrent dans ce cas qu'une inclinaison des ailettes des isolateurs en polymères supérieure ou égale à 50° peut

maintenir leur performance électrique suffisamment élevée de telle sorte que sa chute totale par rapport au cas d'une atmosphère propre et sèche ne dépasse guère 15 %. Si de plus le rapport des volumes des petites et grandes gouttes d'eau est très inférieur à l'unité et le pourcentage des minuscules gouttes est très élevé, il faudra s'attendre à ce que l'écart de performance de l'isolation par rapport au cas d'une atmosphère propre et sèche soit plus réduit encore.

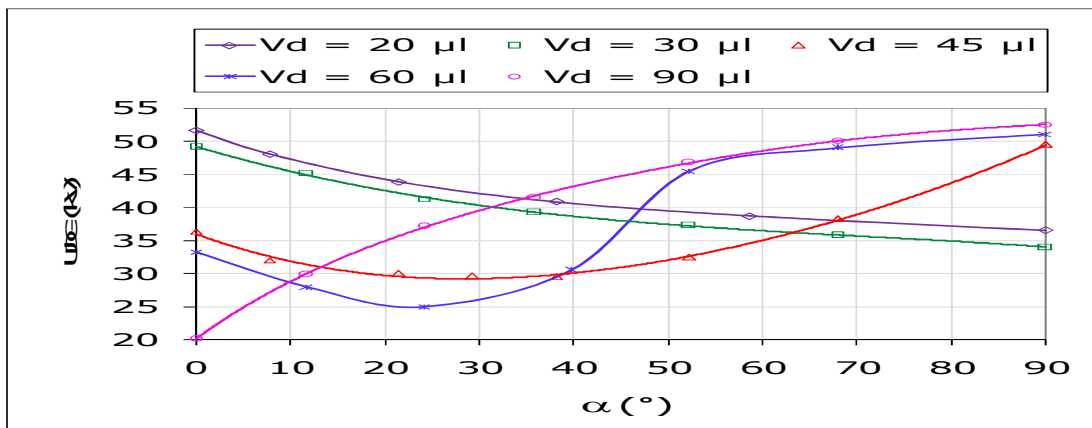


Fig. II. 20: $U_{DC} = f(\alpha, V_d)$ pour une isolation en silicone hydrophobe ($N_r = 5$ rangées, $I_{rr} = L_{de} = L_{dd} = 10$ mm, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)

II.3.2 Arrangement de gouttes d'eau en zigzag

R. Boudissa et all [41] ont effectué des travaux expérimentaux se rapportant à la recherche d'une inclinaison appropriée à la performance électrique optimale d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau disposées en zigzag sous tension continue négative. Pour cela, ces auteurs ont utilisé une isolation en silicone hydrophobe illustrée par la figure II. 21 sur laquelle ont été déposées, selon un arrangement manuel composé de plusieurs rangées de gouttes d'eau à volume et conductivité électrique variables, en lignes droites le long de sa largeur et de sa ligne de fuite, ce type de constellation de gouttes d'eau présente une longueur de la ligne de fuite sèche de l'isolation plus petite que celle offerte par un arrangement en zigzag décrit par le quart de paramètres I_{rr} , L_{dd} , L_{dh} et L_{dt} ou bien I_{rr} , L_{DD} , L_{dh} et L_{dt} . Les échantillons, exploités dans le cadre de cette étude, se présentent sous forme de plaques en silicone de dimensions 140 mm x 120 mm x 6 mm, le degré de leur hydrophobicité a été vérifié au moyen de la mesure de l'angle de contact statique d'une goutte d'eau de 50 μl de volume déposée sur leur surface et dont la valeur obtenue est estimée à environ 104°. Sur ces échantillons est déposé un jeu d'électrodes en acier pleines de forme cylindrique à extrémités semi-sphériques, dont l'une est reliée à la terre et l'autre à la haute tension. La largeur l des électrodes est de 100 mm, leur diamètre ϕ_e est de 20 mm et le rayon de chaque demi-sphère est égal à 10 mm. La ligne de fuite totale de l'isolation entre les électrodes de base L_c est fixée à 60 mm tout au long des divers essais effectués. Afin de

se rapprocher le plus possible de l'intervalle des volumes de gouttes d'eau se formant sur une isolation en silicone sous tension lors du phénomène de très forte condensation naturelle où le diamètre de celles-ci est inférieur ou égal à 3 mm et ceux résultant des pluies naturelles dont le diamètre est inférieur ou égal 6 mm, les auteurs ont choisi de travailler avec des volumes égaux à (20, 30, 45, 60 et 90) μl . La mesure de leur volume avec exactitude a été effectuée à l'aide d'une seringue graduée en dizaines de microlitres. Dans le but de faire varier l'angle d'inclinaison de la surface isolante par rapport à l'horizontale α , les auteurs ont utilisé un dispositif en bois illustré par la figure II. 22, de 500 mm x 500 mm x 400 mm de dimensions. Il est peint de plusieurs couches de vernis afin de l'empêcher d'absorber les gouttes d'eau quittant la surface en silicone inclinée et atterrissant au fond de celui-ci à la fin de chaque essai de contournement du matériau. L'isolation en silicone ainsi que les deux électrodes sont fixées sur la paroi supérieure mobile du dispositif par deux supports en PVC. Cette dernière est reliée à une rotule permettant à l'isolation de se faire positionner manuellement à un angle d'inclinaison α quelconque compris entre 0° (position horizontale - Fig. II. 22a) et 90° (position verticale - Fig. II. 22c). La fixation d'un angle d'inclinaison arbitraire (Fig. II. 22b) peut être réalisée à l'aide de deux tiges en bois vernissées qui passent par des trous appropriés et réalisés spécialement sur ses deux faces verticales opposées afin de bloquer la paroi mobile à une position correspondant à l'angle suscitée (Fig. II. 22b).

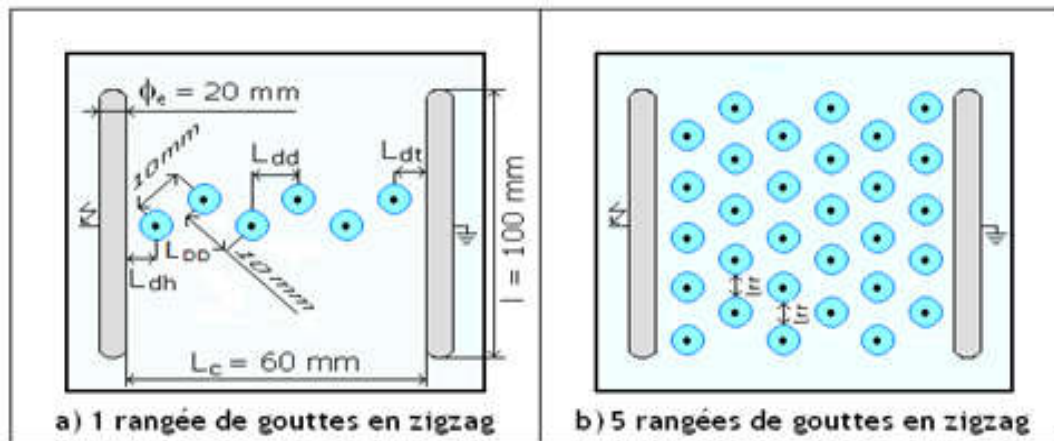


Fig. II. 21: Arrangement en zigzag de plusieurs rangées de gouttes d'eau sur la surface d'une isolation en silicone (L_{DD} : distance entre les centres de deux gouttes d'eau successives d'une rangée oblique à la surface délimitée principalement par les deux électrodes, L_{dd} : distance entre les centres de deux rangées de gouttes d'eau successives le long de la ligne de fuite L_c , L_{dh} : distance entre l'électrode haute tension ou terre et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche de celles-ci et L_{dt} : distance entre les centres de deux rangées de gouttes d'eau en zigzag et adjacentes sur la largeur de l'isolation)

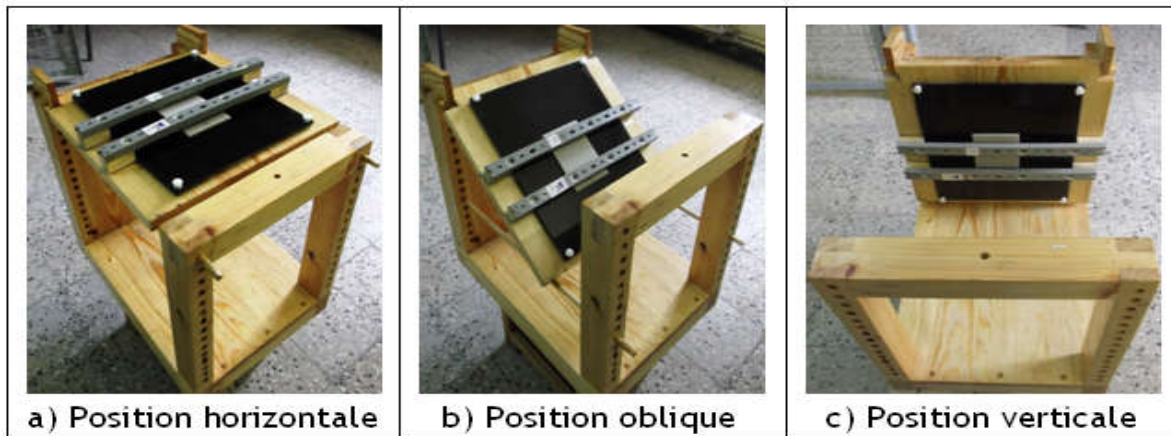


Fig. II. 22 : Support de l'isolation en silicone à armature supérieure mobile à angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale variant entre 0 et 90 °

La connexion du modèle expérimental aux circuits électriques de mesure de la tension de contournement de l'isolation et de visualisation du phénomène de décharge électrique évoluant sur sa surface est illustrée par la figure II. 23.

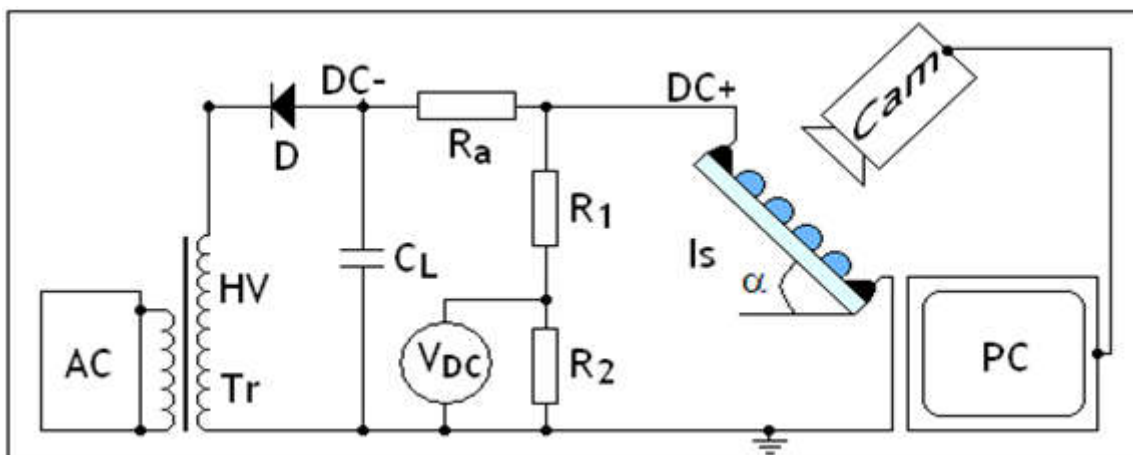


Fig. II. 23: Schéma de mesure de tension de contournement de l'isolation avec gouttes d'eau et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface (Tr: Transformateur; AC: Appareil de commande automatique ou manuelle de la tension appliquée à l'isolation à tester; I_s : Isolation en silicone; Cam: Caméra rapide; PC: Ecran Ordinateur, 1: Sortie DC+ et 2: Sortie DC-)

L'effet du nombre de rangées de gouttes d'eau d'un volume de 45 μl sur la performance électrique d'une surface isolante en silicone hydrophobe sous tension continue négative est illustré par la figure II. 24. Les auteurs ont mis en évidence l'existence d'un nombre limité de rangées de gouttes d'eau à partir duquel la performance électrique de l'isolation, à angle d'inclinaison nul, est minimale et constante.

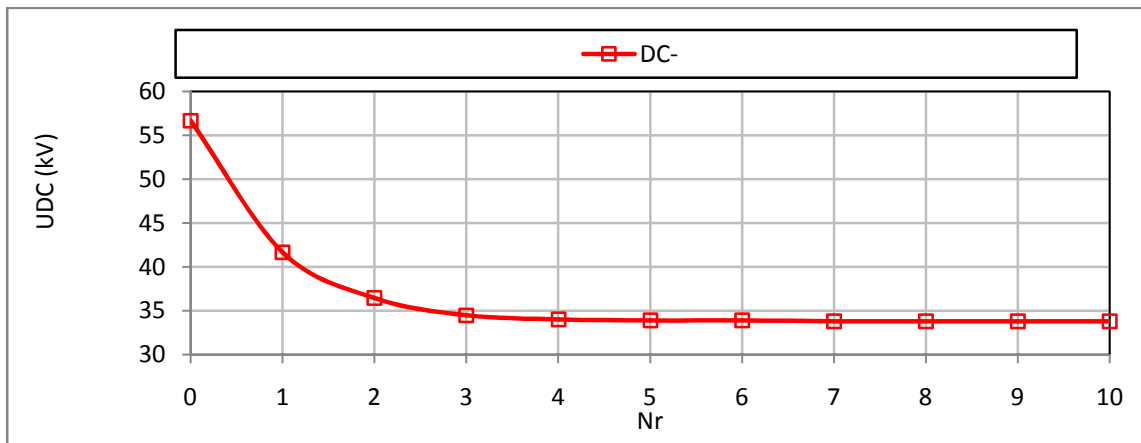


Fig. II. 24: $U_{DC} = f(N_r)$ de gouttes d'eau recouvrant une isolation en silicone hydrophobe ($\alpha = 0^\circ$, $V_d = 45 \mu\text{l}$)

L'effet du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation en silicone hydrophobe en position horizontale ($\alpha = 0^\circ$) sur sa performance électrique illustré par la figure II. 25, Il en résulte un déclin rapide de la tension de contournement de l'isolation à une valeur faible pour un volume égal à $90 \mu\text{l}$ et une conductivité électrique de l'ordre de $180 \mu\text{S/cm}$. Cette valeur est estimée à 29 % en DC- dans l'intervalle du volume étudié. Ce déclin de performance peut être expliqué par l'augmentation de la surface de la zone humide avec l'apport de nouvelles rangées de gouttes d'eau et par conséquent le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation.

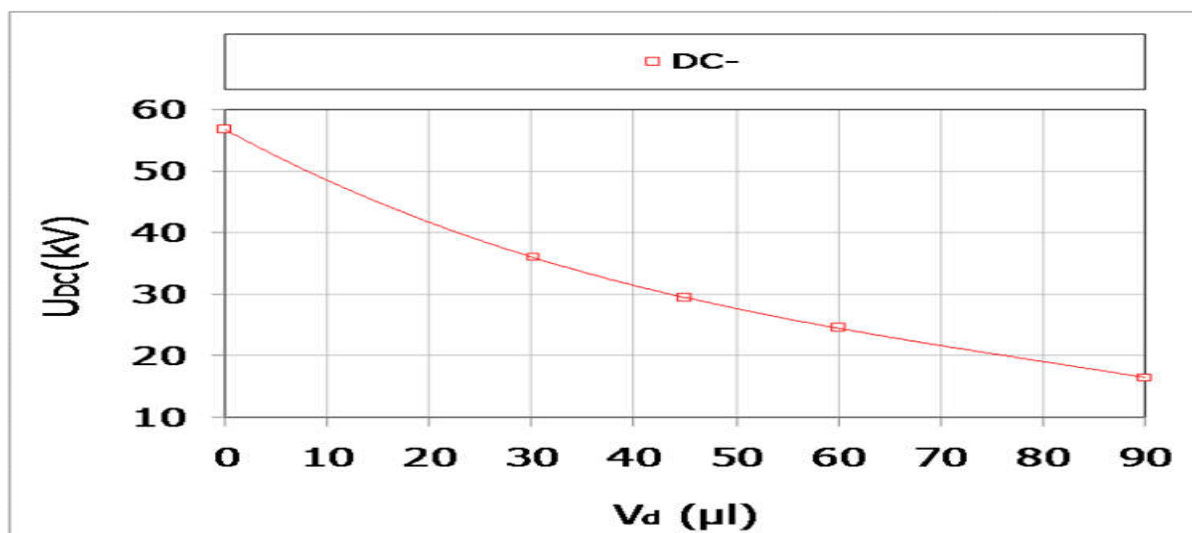


Fig. II. 25: $U_{DC} = f(V_d)$ des gouttes d'eau recouvrant une isolation en silicone ($\alpha = 0^\circ$, $l_{rr} = L_{DD} = 10 \text{ mm}$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$)

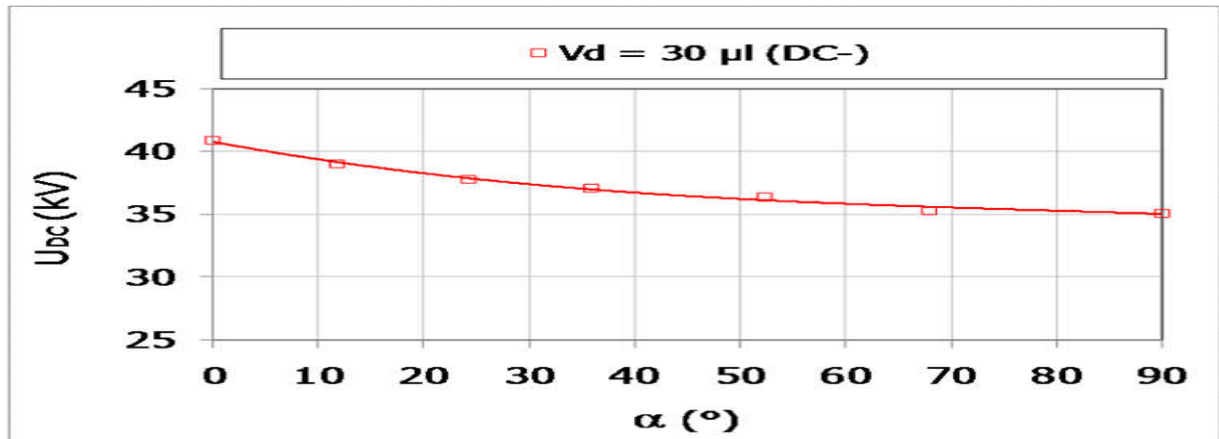


Fig. II. 26: $U_{DC} = f(\alpha)$ d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau à volume V_d inférieur ou égal à $30 \mu\text{l}$

Les auteurs se sont intéressés à la quantification de l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface d'une isolation en silicone sur sa performance électrique lorsque celle-ci est recouverte de multiples gouttes d'eau en zigzag, à volume variable et conductivité électrique égale à $180 \mu\text{S/cm}$. Pour ces raisons, les valeurs de N_r et des deux grandeurs I_{rr} et L_{DD} ont été prises égales respectivement à 5 et 10 mm (Fig. II. 21). L'évolution de la tension de contournement en fonction de ces paramètres est illustrée respectivement par les figures II. 26, II. 27 et II.28 à partir desquels les auteurs ont pu trouver une correspondance d'un angle d'inclinaison nul de l'isolation à un profil favorable pour un isolateur lorsqu'elle est recouverte de gouttes d'eau à volume inférieur à $30 \mu\text{l}$, par contre celui-ci lui est très défavorable sous l'effet d'une pluie naturelle à grosses gouttes d'eau ($V_d \leq 110 \mu\text{l}$).

La performance électrique diminue jusqu'à atteindre 40 % de celle de la même isolation sans ces gouttes d'eau, lorsque celle-ci est inclinée d'un angle $0^\circ < \alpha < 50^\circ$ et recouverte de gouttes d'eau de pluie à volume moyen variant entre $45 \mu\text{l}$ et $60 \mu\text{l}$.

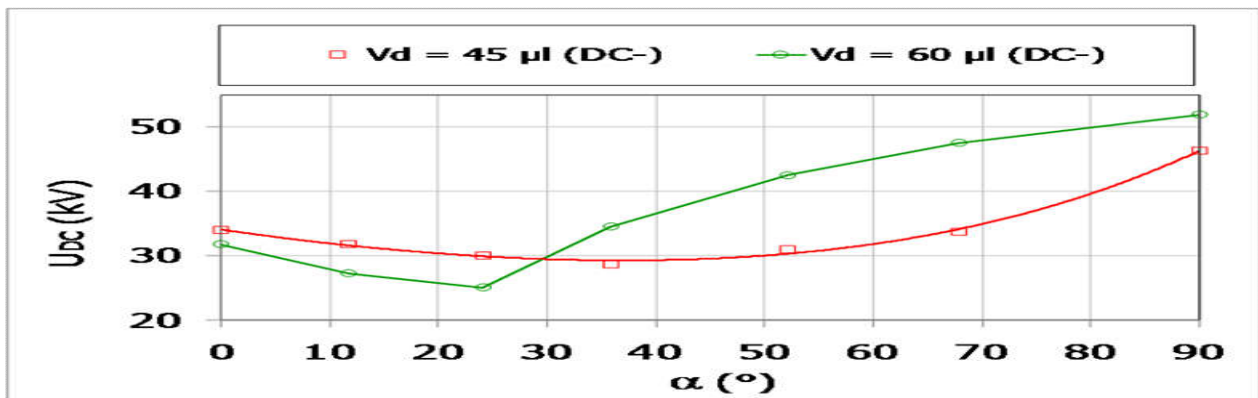


Fig. II. 27 : $U_{DC} = f(\alpha)$ d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau à volume V_d supérieur à $30 \mu\text{l}$ et inférieur à $90 \mu\text{l}$

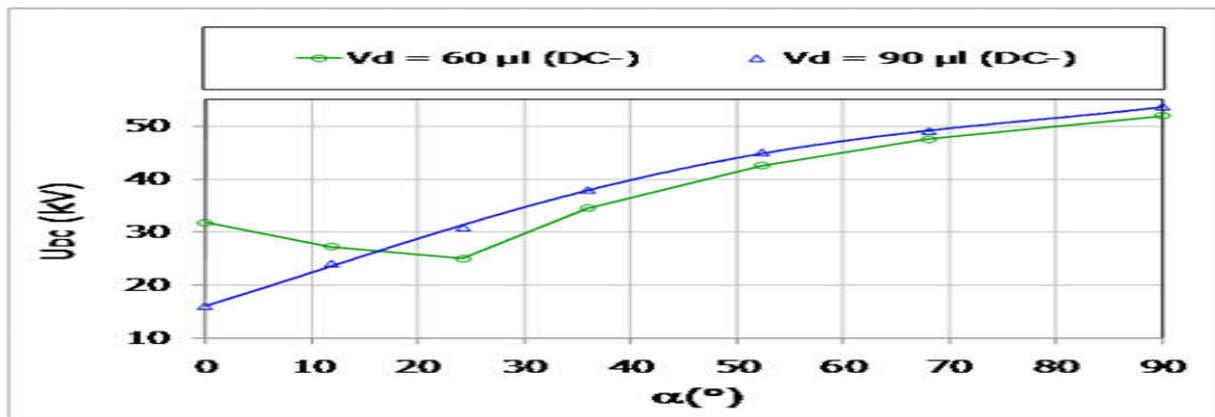


Fig. II. 28 : Comparaison des performances électriques de l'isolation en silicone obtenues pour les deux volumes 60 et 90 μl

Les auteurs se sont par la suite intéressés à la quantification de l'effet de l'accumulation d'eau sur la surface de l'isolation située au voisinage de l'électrode à la terre sur la performance électrique de l'isolation en silicone. La conductivité des gouttes d'eau est fixée à 180 $\mu\text{S/cm}$, le résultat de cette étude, illustré par la figure II. 29, montre que l'influence de ce paramètre est négligeable, à faible conductivité électrique, par recouvrement partiel de la surface une isolation en silicone.

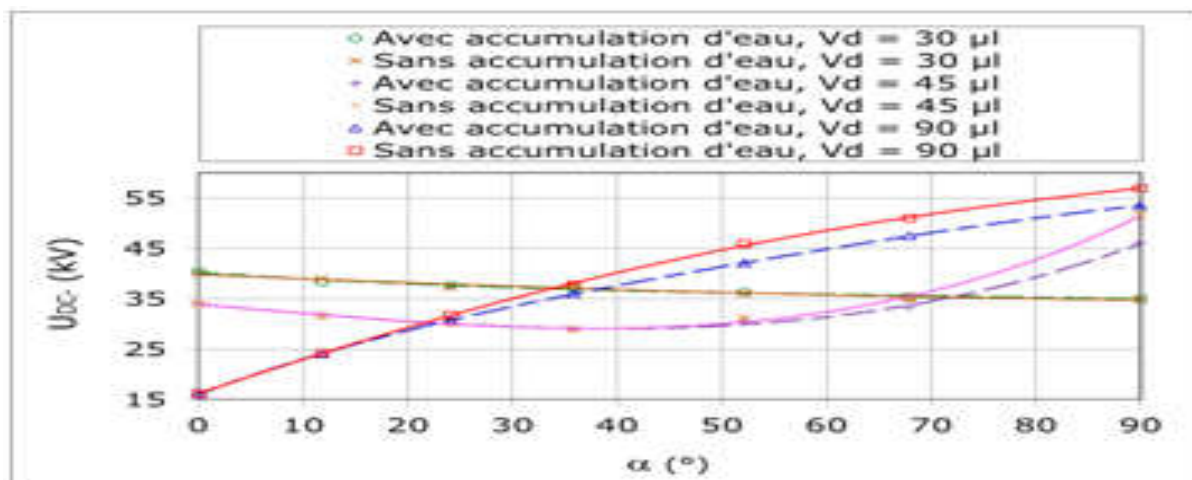


Fig. II. 29: $U_{DC} = f(\alpha)$ d'une isolation en silicone avec ou sans accumulation de gouttes d'eau au niveau de sa surface proche de l'électrode à la terre

II.4 Performance électrique des surfaces superhydrophobes

L'analyse bibliographique fait ressortir que l'effet de la superhydrophobie d'une surface isolante sous tension continue négative comparativement à la tension continue positive et alternative ne suscite pas d'intérêt chez certains chercheurs.

Ceci explique l'intérêt porté par nous sur ce type de contraintes de tension dans le cadre de notre thème de fin d'étude.

II.5 Conclusion

Suite à l'analyse des résultats des travaux récents se rapportant à la performance électrique des isolations quelconques sous tension continue négative et conditions de pollution humide, il a été constaté l'existence d'énormes investigations sur la performance électrique des isolations hydrophiles et hydrophobes. Après quelques décennies l'emploi de ces derniers matériaux, il s'est avéré que leur dégradation accélérée sous condition de forte humidité selon les chercheurs, le contournement d'un tel problème est subordonné par le passage des isolations superhydrophobes. Or notre analyse fait ressortir l'inexistence de résultats sous cette contrainte de tension continue négative. Pour ces raisons il est impératif de développer des recherches dans ce sens afin de développer des recherches dans ce problème. Le thème de notre projet de fin d'étude s'inscrit justement dans cette optique d'idées.

**Chapitre III : Pollution des isolations
superhydrophobes**

III.1 Introduction

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement de ces structures. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle de la surface isolante et par suite la diminution de la tension de tenue de cette dernière. Ils peuvent dans les cas les plus critiques, conduire à un contournement total, ce qui constitue la situation la plus grave. La connaissance des différentes sources de pollution et le degré de pollution, est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

III.2 Définitions [42]

III.2.1 Pollution

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

III.2.2 Couche de pollution

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

III.2.3 Degré de pollution

C'est la valeur de la quantité (salinité, conductivité de la couche, densité du dépôt de sel) qui caractérise la pollution artificielle appliquée sur l'isolation en essai.

III.2.4 Salinité

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

III.3 Sources de pollution [43]

Trois principales sources de pollution peuvent être distinguées: pollution naturelle (marine, désertique), pollution industrielle et pollution mixte.

III.3.1 Pollution naturelle

III.3.1.1 Pollution marine

Dans les installations au voisinage de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi une couche de sel qui recouvre toute leur surface. Humidifiée par les embruns eux-mêmes, cette couche devient de plus en plus conductrice. Des courants de fuite encore plus intenses prennent naissance, et des arcs peuvent se développer jusqu'à engendrer le contournement total de l'isolation.

III.3.1.2 Pollution désertique

Dans les régions désertiques, la pollution est engendrée surtout par des tempêtes de sable. La densité de sel dans le sable est très élevée. La rosée matinale est la seule source d'humidification dans ces régions qui favorise la conduction sur la surface isolante.

III.3.1.3 Autre type de pollution naturelle

Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau de pluie naturelle peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau de pluie n'est jamais parfaitement isolante, celle-ci peut entraîner le contournement de l'isolation. C'est le contournement sous pluie naturelle.

III.3.2 Pollution industrielle

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières. Elles sont faiblement conductrices, mais hygroscopiques en présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières fait diminuer considérablement la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles; les agents polluants peuvent être insecticides, engrais, grains de pollens. Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quand il s'agit des facteurs tels que les fumées et les gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

III.3.3 Pollution mixte

La pollution mixte résulte de la combinaison d'une ou plusieurs pollutions précitées, c'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. Par conséquent, quelle que soit la source de pollution, on observe la formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement sur des surfaces isolantes. La nature et les caractéristiques des agents contaminants sont très variées. Généralement, ils ne provoquent pas à court terme une dégradation de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement sur des surfaces isolantes, provoque la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution, quelle que soit sa nature.

III.4 Sévérité de pollution d'un site

Différentes méthodes de mesure de sévérité de pollution d'un site, largement employées, ont été basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées [44]. Dans ce cas, les principales méthodes suivantes ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site.

III.4.1 Densité du dépôt non soluble (DDNS) [44]

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de produits non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS s'effectue comme suit :

La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé (Fig. III. 1). La DDNS peut être calculée à l'aide de la relation III. 1 suivante :

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \quad (\text{III. 1})$$

Où: DDNS : est la densité de dépôt non soluble en mg/cm^2 ;

m_f : est la masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg ;

m_i : est la masse initiale du papier filtre en mg ;

A : est la surface lavée de la barrière en cm^2 ;

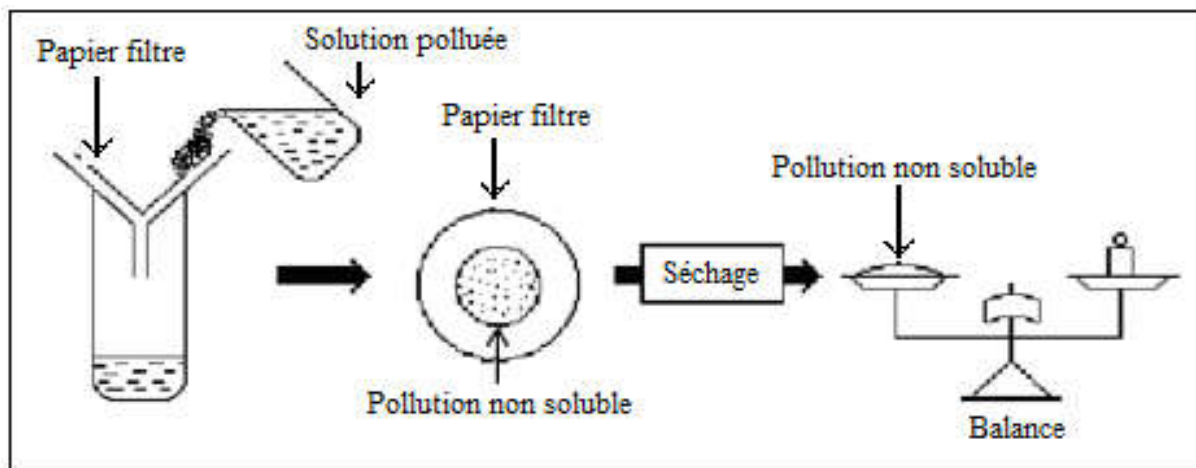


Fig. III. 1:Schéma et procédé de mesure de la DDNS

III.4.2 Conductance superficielle

La conductance superficielle (G) des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir du rapport du courant électrique (I) traversant l'isolation, à la tension appliquée à celle-ci, conformément à la formule III.2.

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{III. 2})$$

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur [45]. Cette méthode est donc un paramètre qui caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche), laquelle détermine la performance d'une surface isolante. Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général elle présente des résultats dispersés [42, 45, 46, 47, 48]

III.4.3 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) [46]

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par cm^2 de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau.

Tout d'abord, des échantillons de pollution doivent être prélevés à la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs. En suite, le dépôt est récupéré par lavage à l'aide d'un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. La DDSE peut être calculée à partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température.

III.5 Conséquents de la pollution sur les équipements électriques

III.5.1 Contournement d'une surface isolante hydrophile

III.5.1.1 Pollution non uniforme [39]

Le contournement d'une surface isolation subdivisée en deux zones différemment polluées de telle sorte que le rapport de leurs conductivités soit égal à 0,33 ($\sigma_1 = 1000 \mu\text{S/cm}$ et $L_h = L_l = 12 \text{ cm}$, $\sigma_h = 3 \sigma_l = 3000 \mu\text{S/cm}$) est illustré par la figure III 2, les arcs électriques, issus de la zone fortement contaminée, prennent naissance avec une très légère avance sur ceux émanant de la zone faiblement polluée (Fig III. 2a et III. 2b), mais ceux-ci finissent par se faire rattraper à cause du très faible écart de valeur des conductivités électriques des deux zones de l'isolation et la figure III. 2c met en évidence et en relief la similitude de l'intensité et des tailles des différents arcs électriques positifs et négatifs développés à ce stade. Celui-ci ressemble à la situation rencontrée lors de l'isolation mise sous condition de pollution uniforme, où les arcs électriques se rivalisent dans leur progression en diminuant en nombre. Celui qui aurait atteint sa taille critique, il entraînera le contournement de l'isolation indépendamment de la nature de la zone (faiblement ou fortement conductrice) dans laquelle il se trouve à l'instant du contournement de l'isolation.

Les phases de développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante sous distribution transversale non uniforme ($L_p = 24 \text{ cm}$, $L_l = 20 \text{ cm}$ avec $\sigma_l = 50 \mu\text{S/cm}$, $L_h = 4 \text{ cm}$ avec $\sigma_h = 100 \sigma_l = 5000 \mu\text{S/cm}$) sont présentées en figure III. 3. Il est à souligner que lorsque la valeur de largeur de la zone faiblement polluée ($L_l = 20 \text{ cm}$, $\sigma_l = 50 \mu\text{S/cm}$) est supérieure à 18 cm, Il en résulte que le contournement de la surface isolante est généré dans la zone fortement polluée.

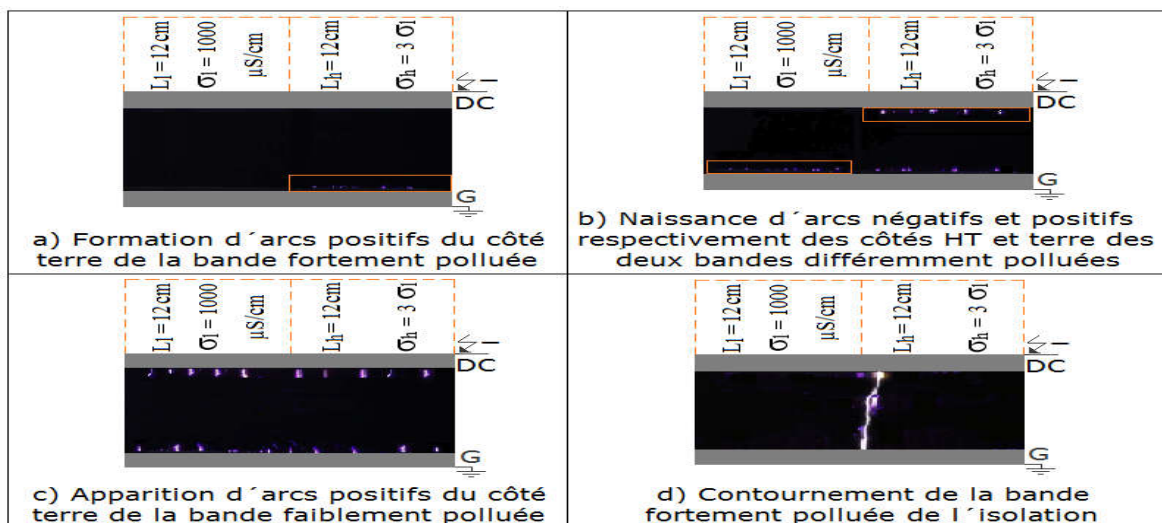


Fig. III. 2: Phases de contournement d'une surface isolante non uniformément contaminée ($L_p = 24 \text{ cm}$, $L_l = 12 \text{ cm}$ avec $\sigma_l = 1000 \mu\text{S/cm}$ et $L_h = 12 \text{ cm}$ avec $\sigma_h = 3 \sigma_l = 3000 \mu\text{S/cm}$)

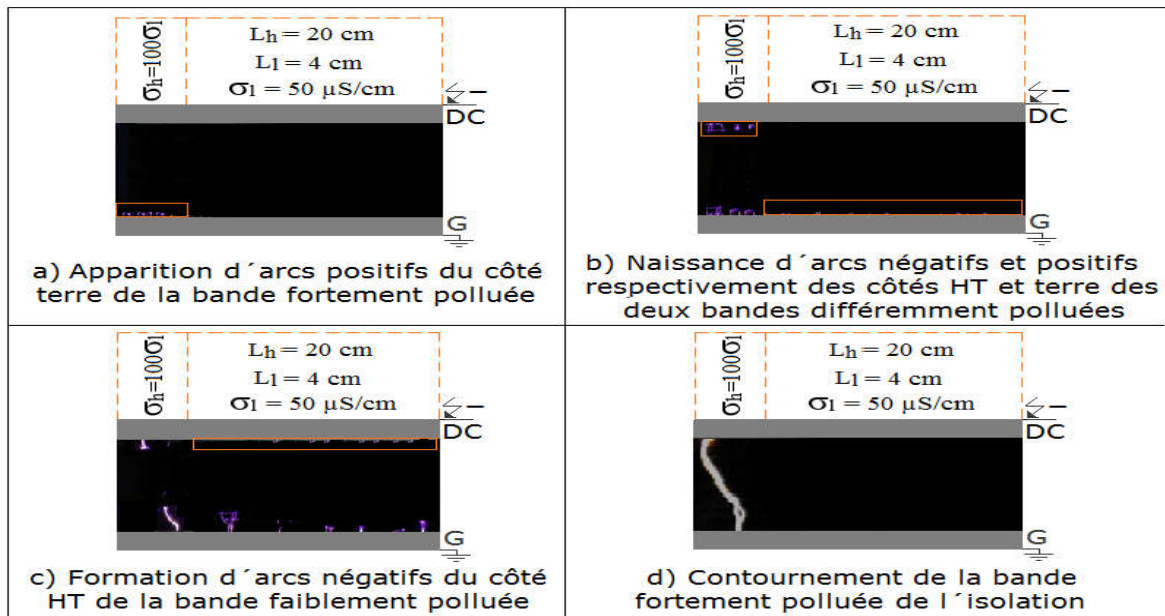


Fig. III. 3: Phases de développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante sous distribution transversale non uniforme ($L_p = 24$ cm, $L_l = 20$ cm avec $\sigma_l = 50$ μ S/cm, $L_h = 4$ cm avec $\sigma_h = 100 \sigma_l = 5000$ μ S/cm)

III.5.1.2 Pollution uniforme [38]

Le contournement d'une surface hydrophile, délimitée par deux électrodes planes mise sous conditions de pollution et sous tension continue négative, est régi par l'apparition des arcs électriques parallèles brûlant simultanément au dessus de deux zones sèches connectées en série. Ces deux zones apparaissent très fréquemment au sein des électrodes haute tension et terre. Il est à remarquer que les arcs formés au niveau de l'électrode mise à la terre sont très lumineux et à élancement plus élevée que ceux issus de l'électrode haute tension. La différence de taille entre ces deux types d'arcs est justifiée par le fait que la naissance et le développement des décharges électriques parallèles positives ont eu lieu bien avant celles de signe contraire (Fig. III. 4).

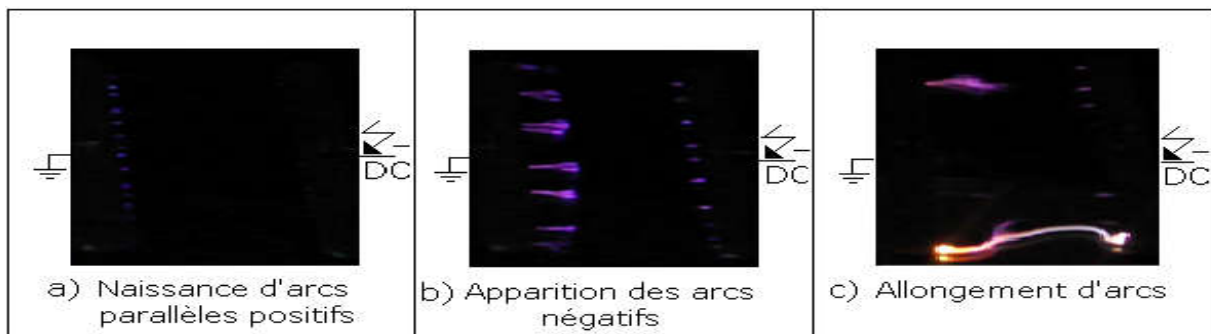


Fig. III. 4: Phases de contournement d'une surface isolante contaminée délimitée par deux plans

III.5.2 Contournement d'une surface isolante hydrophobe [49]

III.5.2.1 Surface en silicone en position horizontale

Les figures III. 5 et III. 6 expliquent les principales phases de contournement d'une surface horizontale en silicone recouverte de gouttes d'eau de 45 μl de volume et pour deux conductivités volumiques différentes (180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 7 mS/cm) et mise sous tension continue négative.

La différence de couleur émise par ces deux décharges est due probablement aux différentes longueurs d'ondes émises par les gouttes d'eau à divers degrés de salinité. Concernant le trajet de la décharge, il y'a discontinuité sur celui donné en figure III. 6b par rapport celui indiqué sur la figure III. 5b. Enfin le dégagement de chaleur est plus fort en figure III. 5c qu'en figure III. 6c. L'empreinte laissée par la décharge électrique de contournement sur la deuxième rangée de gouttes d'eau, est illustrée par les figures III. 5d et III. 6d. Il est à remarquer que le chemin de gouttes d'eau est plus discontinu lorsque la conductivité des gouttes d'eau est plus faible.

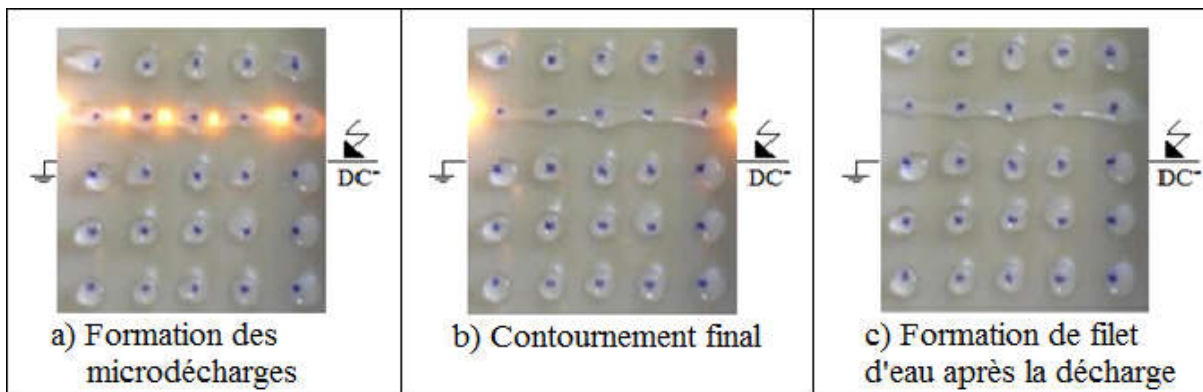


Fig. III. 5: Couleur jaune orange de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 7 \text{ mS}/\text{cm}$ et $V_{g1} = 45\mu\text{l}$

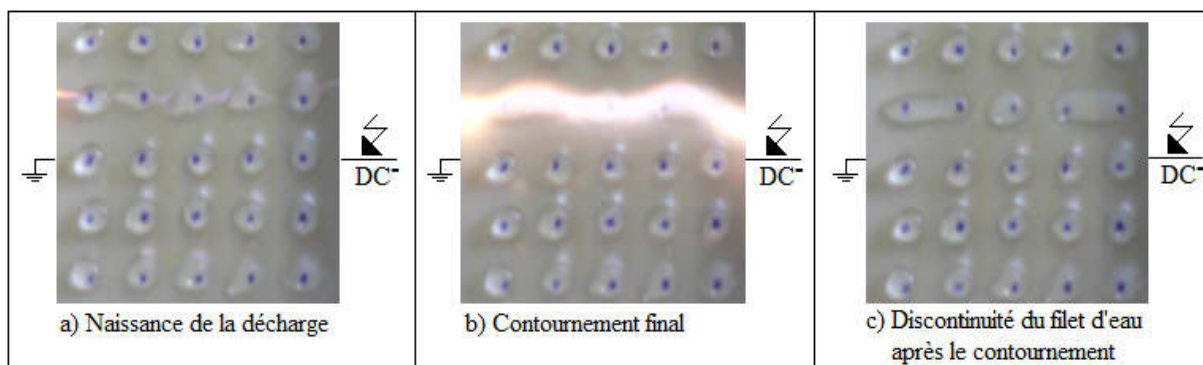


Fig. III. 6: Couleur blanche-rose de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $V_{g1} = 45\mu\text{l}$

III.5.2.2 Surface en silicone inclinée

La figure III. 7 illustre les différentes phases de contournement d'une surface recouverte de gouttes d'eau et inclinée selon un angle critique $\alpha_c = 29,27^\circ$. L'évolution de la décharge dans ce cas s'étale sur deux rangées afin de provoquer le contournement final.

Avant l'application de la tension, la forme des gouttes d'eau est quasi-sphérique (Fig. III. 7a), après application de la tension celles-ci se déplacent vers l'électrode terre et commencent à se déformer (Fig. III. 7b). Pendant ce mouvement les gouttes les plus proches de l'électrode HT plus rapides arrivent à joindre celles, moins rapides et éloignées de l'électrode sous tension. Leur jonction peut donner naissance à un filet d'eau en forme de cylindre à diamètre variable. A ce moment là une décharge émane de l'électrode haute tension et s'amorce dans l'intervalle d'air entre celle-ci et la première extrémité du filament d'eau et commence à glisser dessus à condition que celui-ci soit continu. Dans le cas d'établissement d'un court-circuit entre les deux électrodes la probabilité d'un contournement de l'isolation est très élevée.

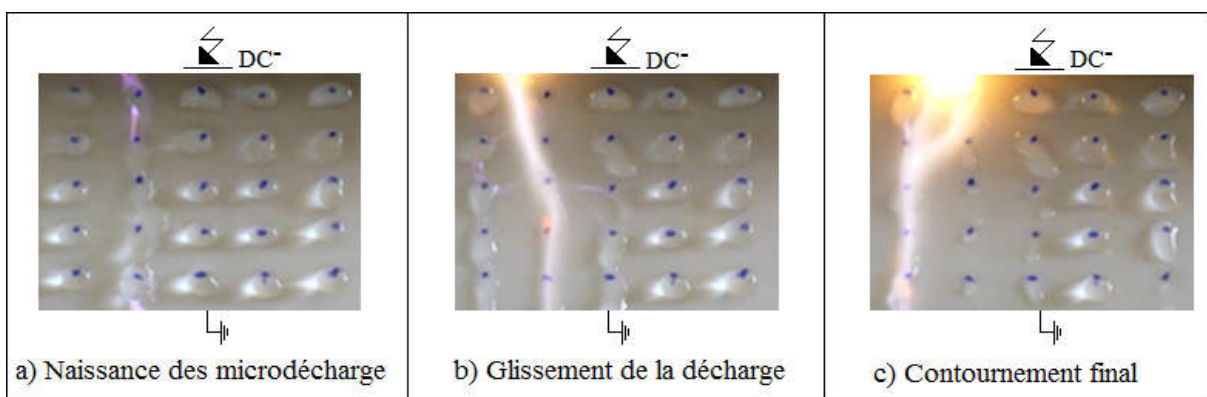


Fig. III. 7: Différentes phases de contournement de la surface isolante pour $\alpha_c = 29,27^\circ$, $n_r = 5$, $V_g = 45 \mu\text{l}$ et $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ (α_c : Angle critique correspondant à la tension de contournement la plus faible)

Sous tension continue négative, le champ appliqué est unidirectionnel et orienté de l'électrode terre vers celle de HT. Les gouttelettes ont tendance à se manifester dans le sens contraire du champ électrique le poids des gouttes l'emporte sur la force électrique et la force de frottement. Elle commence à se dilater en direction de l'électrode terre (Fig.III.7b). Au cours de ce mouvement, certaines d'entre elles arrivent à se joindre à d'autres moins rapides qu'elles et voient leur taille s'accroître ensuite allongée.

Au fil du temps le champ électrique s'intensifie au tour des gouttes déformées et particulièrement sur celles proches de l'électrode terre, afin d'atteindre la valeur critique d'ionisation de l'air au point triple de contact des gouttelettes d'eau avec l'air et la surface du matériau. Des microdécharges apparaissent sur des petits filets partiels (Fig.III.7b). Leur

extinction peut survenir si les distances séparant ces filets partiels s'agrandissent pour se rabattre sur d'autres filets d'eau partiels plus rapprochés (Fig. III. 7c).

Ce phénomène peut se poursuivre jusqu'à ce qu'un filet d'eau plus long s'offre à la décharge pour lui servir de chemin de glissement et engendrer un contournement de l'isolation (Fig.III.7d). Il est à souligner que pendant qu'un filament d'eau se désintègre, un autre se forme sur d'autres rangées sous l'action conjuguée de la force électrique et le poids des gouttes. Ce déplacement latéral de la décharge sur la surface à gouttes s'opère généralement sur une largeur correspondant au maximum à 5 rangées équidistantes de 1cm réparties sur la largeur de film en silicone.

III.6 Simulation de la pollution au laboratoire

III.6.1 Essais sous pollution artificielle

Ils consistent à reproduire les conditions de la pollution naturelle en laboratoire. Ils sont aujourd'hui très utilisés et ont l'avantage d'être rapides. Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont celle de la couche solide, du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide.

III.6.1.1 Méthode de la couche solide

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante [50].

III.6.1.2 Méthode du brouillard salin [43]

La solution saline utilisée dans cette méthode représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placée dans un brouillard salin. D'après la classification des sites pollués, les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à $160 \text{ kg}/\text{m}^3$.

III.6.1.3 Méthode de pollution liquide [43]

Dans cette méthode, la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de kaolin ou de méthylcellulose. La conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium (comme pour la méthode de la couche solide). Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire.

III.7 Techniques de lutte contre la pollution

Deux techniques sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs pour but d'allonger la ligne de fuite ;
- L'utilisation des matériaux polymères qui sont collés sur la surface des isolateurs afin de prolonger la ligne de fuite [51]

III.7.1 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)

L'utilisation des isolateurs plats réduit de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [52].

III.7.2 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)

Le graissage protège temporairement les isolateurs et ce grâce à ses propriétés hydrophobes,. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est longue, pénible et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [44].

III.7.3 Revêtements à base de silicones

Cette méthode consiste à appliquer à la surface des isolateurs, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante par pulvérisation ou au pinceau. Ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution [53].

III.8 Conclusion

Le contournement dû à la pollution atmosphérique affecte très souvent le comportement des lignes aériennes, et l'isolement. L'optimisation de l'isolement devient donc un point très important en vue de réduire les pertes occasionnées par le contournement.

Il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés, afin de mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, revêtements hydrophobes...), permettent de disposer aujourd'hui des solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le terrain.

La performance électrique d'une isolation dans un milieu pollué et humidifié varie en fonction de l'état de surface de l'isolation. Elle croît en passant d'une surface hydrophile à hydrophobe puis superhydrophobe.

**Chapitre IV : Système automatique de dépôt de
gouttes d'eau**

IV.1 Introduction

Au cours de la réalisation de ce mémoire, nous avons constaté que les membres du laboratoire répètent à la longueur de la journée les mêmes mouvements, qui consiste à poser une ou plusieurs gouttes d'eau sur la plaque superhydrophobe. Dans cette optique, nous proposons un robot qui s'avère intéressant pour remplacer cette tâche pénible.

De nos jours, l'utilisation des systèmes automatisés dans la recherche a franchi un cap important avec la naissance des Bras Robotisés (BR), puisqu'ils ont remplacé l'homme dans les tâches nuisant à sa santé, comme par exemple peindre des voitures, la peinture utilisée contient des produits dangereux surtout lorsqu'elle est inhalée. De plus, les BR permettent d'accomplir des tâches plus rapides et plus sûres que l'homme, car ils permettent de manipuler avec beaucoup de précision et de manière flexible.

IV.2 Définition et historique

IV.2.1 Définition [54]

Un robot est un dispositif mécanique poly-articulé mis par des actionneurs et commandé par un contrôleur accomplissant automatiquement une grande variété des tâches qui sont généralement considérées comme dangereuses, pénibles, répétitives, impossibles pour les humains ou dans un but d'efficacité supérieure.

Le terme robot vient du terme robota, qui veut dire le travail forcé ou corvée.

IV.2.2 Historique [55]

En 1947 : L'apparition de premier manipulateur électrique télé-opéré

En 1945 : Invention du premier robot qui peut être programmé.

En 1961 : Montage d'un robot sur une chaîne de fabrication de General Motors.

En 1961 : Premier robot avec contrôle en effort.

En 1963 : Le premier contrôle du robot avec vidéo.

IV.3 Avantage de la robotisation

IV.3.1 Facteurs économiques [56]

Réduction des coûts de main-d'œuvre :

- un robot est capable de travailler en 3x8 de façon constante et peut réaliser à lui seul les tâches de différents opérateurs
- Après programmation, un robot peut travailler seul la nuit et le week-end
- Flexibilité de la gestion de production

- Un robot s'adapte à différentes tâches et peut donc aisément être affecté à des opérations multiples, selon les impératifs de l'entreprise

Amélioration de la qualité :

Les robots industriels ont la capacité de reproduire une même tâche répétitive sans dégradation des performances

IV.3.2 Facteurs humain [56]

Augmentation de la sécurité sur les postes de travail ;

Evolution des fonctions des opérateurs ;

IV.3.3 Facteurs environnementaux [56]

Réduction des coûts énergétiques :

Grace à l'optimisation des procès, la robotisation d'une entreprise permet d'économiser l'énergie, notamment en termes de matière première, déchets et rejets nocifs pour l'environnement

IV.4 Les différents types des robots [56]

Robots collaboratif ;

Robots domestique ;

Robots industriels ;

Robots mobiles ;

Robots humanoïdes ;

IV.5 Classification des robots

On peut classer les robots d'un point de vue fonctionnel ou d'après leur structure géométrique.

IV.5.1 Classification fonctionnelle [57]

Le nombre de classe et les distinctions entre celles-ci varient de pays à pays, on distingue 4 classes :

- **Manipulateur à commande manuelle [57]**

La Figure IV. 1a représente les manipulateurs à commande manuelle.

- **Manipulateur automatique [57]**

La figure montre un bras manipulateur qui exerce des mouvements sans l'intervention de l'homme (Fig. IV. 1b).



Fig. IV. 1: Deux types de manipulateurs

- **Robots programmables [57]**

Ils répètent les mouvements qu'on leur a appris ou programmés sans informations sur l'environnement ou la tâche effectuée. On peut aussi faire la distinction entre robots « playback » qui reproduit la tâche apprise et robots à commande numérique qui peuvent être programmés hors-ligne.



Fig. IV. 2: Robot programmable

- **Robots intelligents [57]**

On trouve actuellement des robots de seconde génération qui sont capables d'acquérir et d'utiliser certaines informations sur leur environnement (systèmes de vision, détecteurs de proximité, capteurs, ...). Les robots de troisième génération sont capables de comprendre un langage oral proche du langage naturel et de se débrouiller de façon autonome dans un environnement complexe grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle.

IV.5.2 Classification géométrique [58]

On peut aussi classer les robots suivant leur configuration géométrique :

- La structure 3R;
- La structure dite SCARA ;
- La structure sphérique ou polaire ;
- La structure cylindrique ;
- La structure cartésienne ;

La structure la plus adaptée au système qu'on proposera dans ce qui suit (Fig. IV. 4) est la structure cartésienne, possédant 3 translations selon les axes : X, Y et Z (Fig. IV. 3) pour sa précision, sa rapidité, sa faible masse et son installation modulaire, comme par exemple, pour la fabrication des circuits imprimés ou dans les laboratoires d'analyse [59].

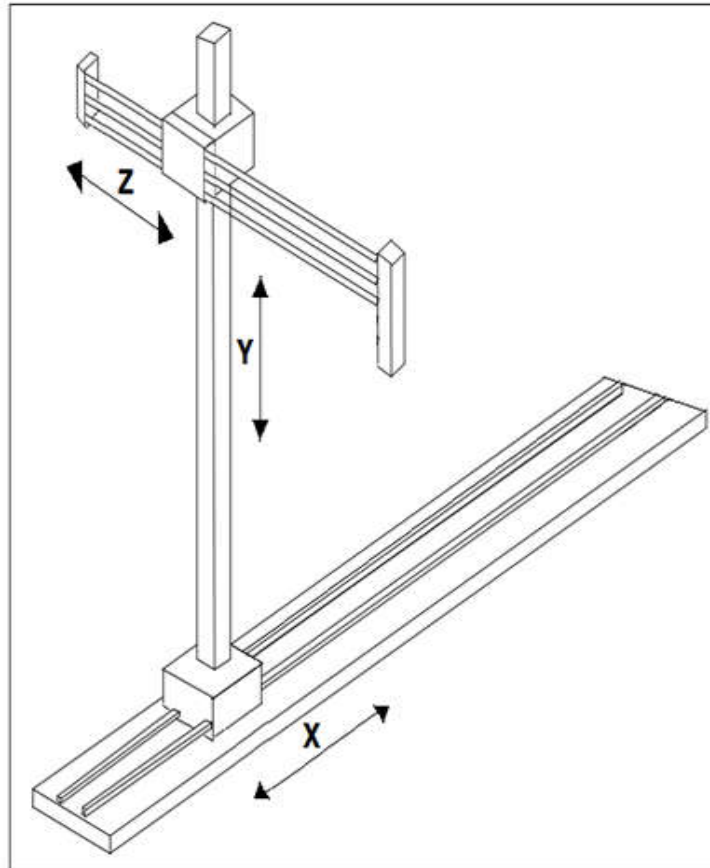


Fig. IV. 3: Fig. schéma du bras cartésien

IV.6 Système proposé

Dans le but de déposer 25 gouttes automatiquement sur une surface superhydrophobe arrangées en ligne droite, on propose le système (Fig. IV. 4) composé d'un bras cartésien manipulateur (actionné par trois moteurs pas à pas à double sens de rotation), d'une pipette électronique multicanaux et d'un petit réservoir à fin de faciliter la manipulation.

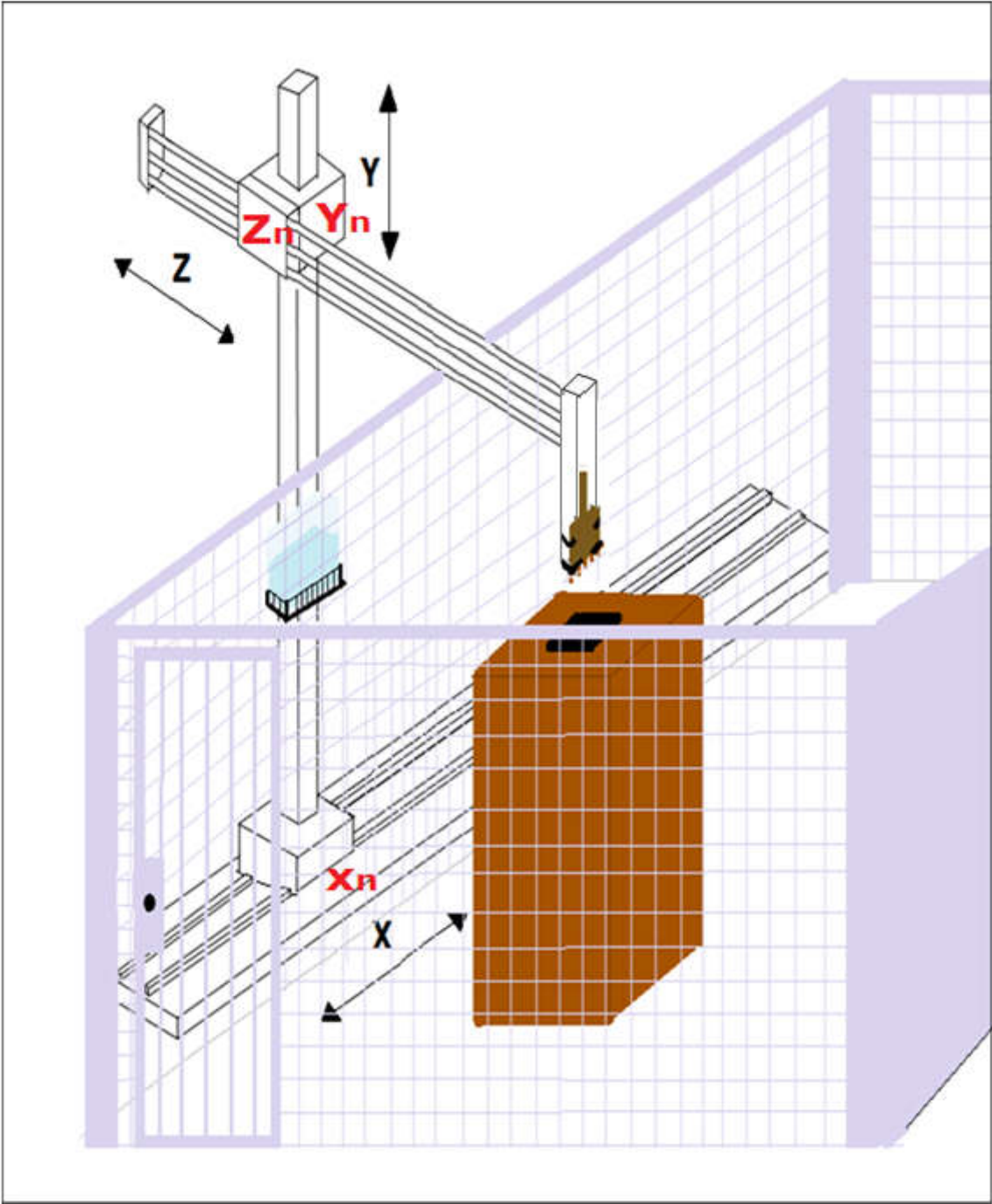


Fig. IV. 4: système proposé

IV.6.1 Fonctionnement du système proposé

Capteurs proposés :

Suivant l'axe X	Suivant l'axe Y	Suivant l'axe Z
X0 : position initiale ;	Y0 : position initiale ;	Z0 : position initiale ;
X1 : capteur de déplacement de X cm vers la droite ;	Y1 : capteur de position au niveau de la plaque ;	Z1 : capteur de position de la 1 ^{er} ligne ;
	Y2 : capteur de position au niveau du réservoir ;	Z2 : capteur de position de la 2 ^{eme} ligne ;
		Z3 : capteur de position de la 3 ^{eme} ligne ;
		Z4 : capteur de position de la 4 ^{eme} ligne ;
		Z5 : capteur de position de la 5 ^{eme} ligne ;

Tab. IV. 1 Capteurs proposés

Moteurs du système proposé :

Notre système est composé de 3 moteurs pas à pas :

M0	Moteur de déplacement sur l'axe des X	M0_D	Déplacement vers la droite
		M0_G	Déplacement vers la gauche
M1	Moteur de descente/ monté du porteur de pipette sur l'axe des Y	M1_d	Descente du porteur de pipette
		M1_m	Monté du porteur de pipette
M2	Moteur d'avancement/reculement Du porteur de pipette sur l'axe des Z	M2_a	Avancement du porteur de pipette
		M2_r	Reculement du porteur de pipette

Tab. IV. 2 Symboles des moteurs

IV.6.1.1 Déroulement du cycle :

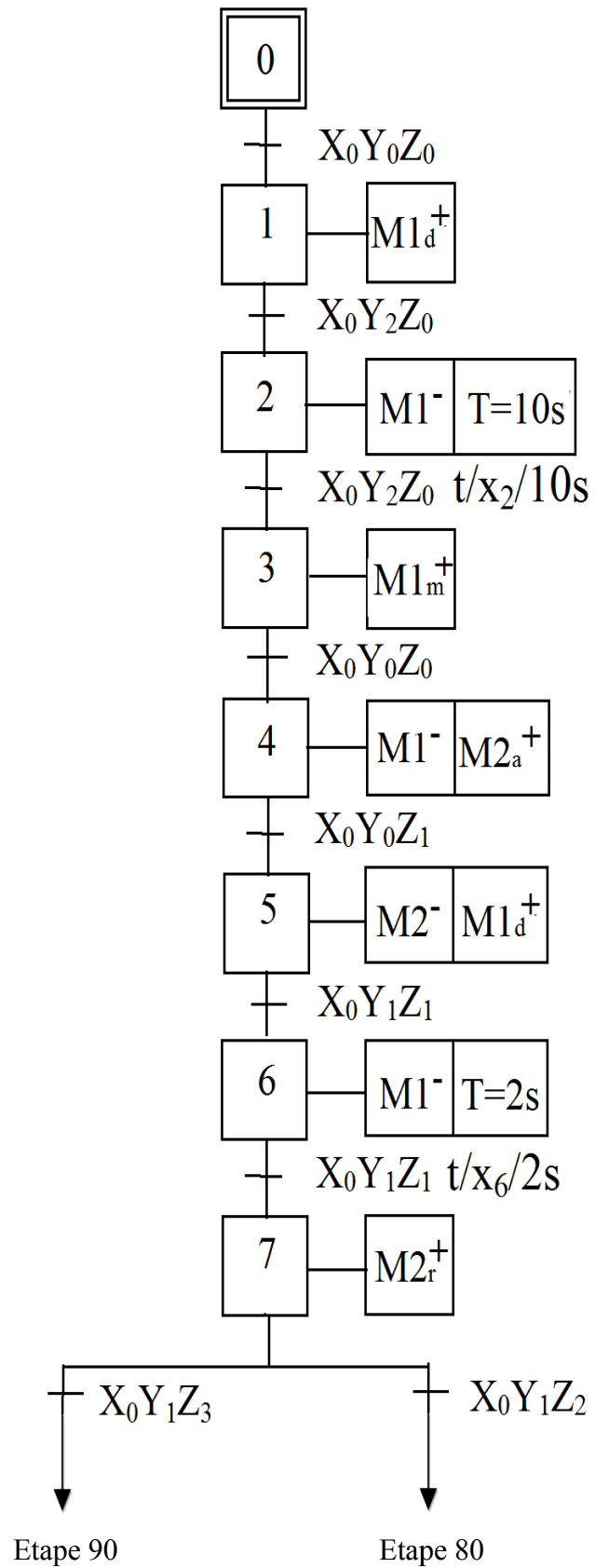
Avant le déroulement du cycle, les conditions initiales doivent être vérifiées ($X_0=1$, $Y_0=1$, $Z_0=1$).

Le moteur M1 permet la descente et la monté du porteur de pipette pour l'aspiration de d'eau du réservoir, et le dépôt des gouttes sur la plaque d'essai.

Le moteur M2 permet l'avancement et le recule du porteur de pipette (le positionner à l'intérieur de la cellule au-dessus de la plaque, et la fixation de l'espace entre les rangées).

Le moteur M0 permet le déplacement selon X pour réaliser l'arrangement zigzag des gouttes d'eau sur la plaque.

IV.6.1.2 Grafset



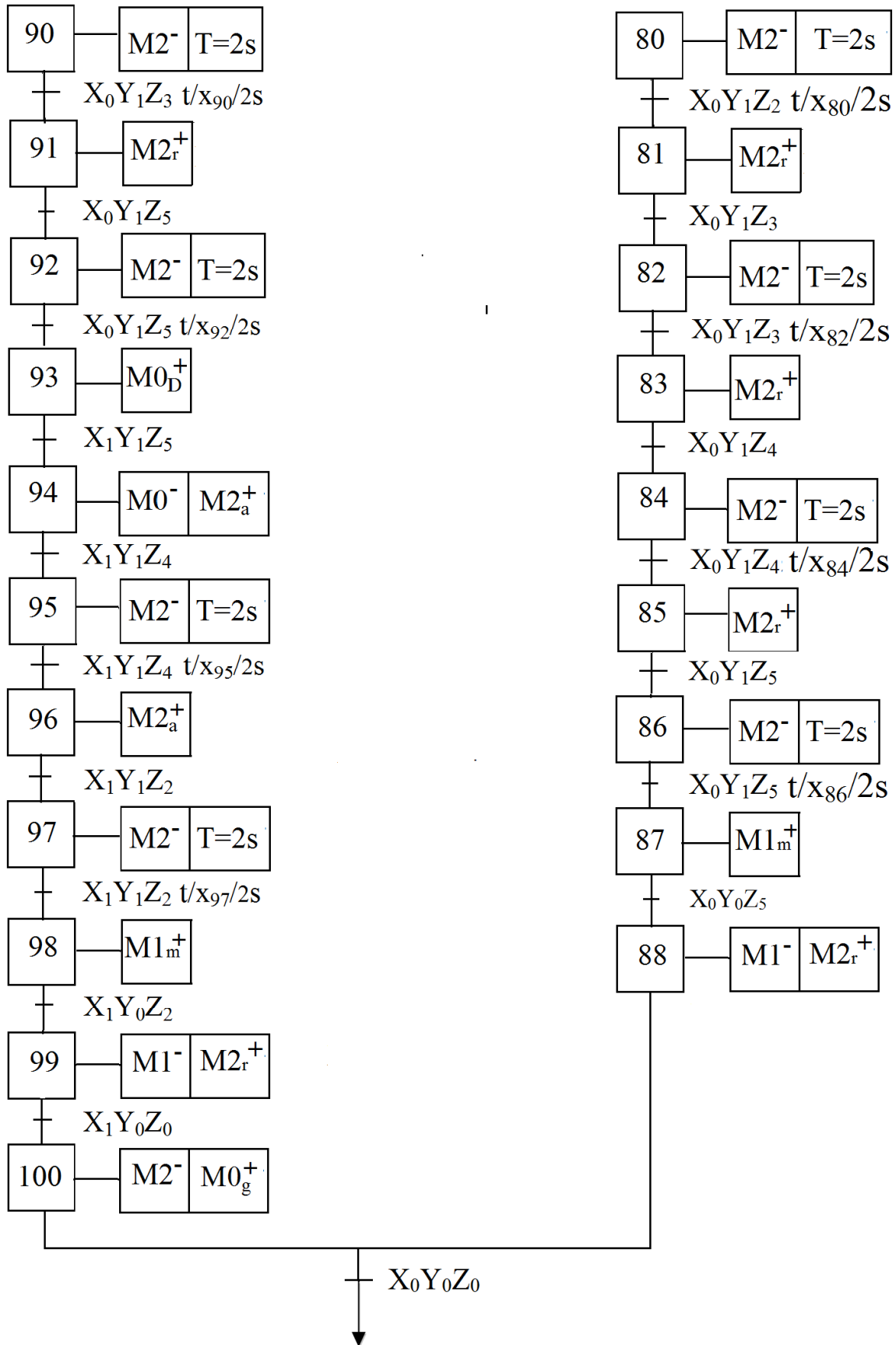


Fig. IV. 5: Grafcet du déroulement du cycle

IV.6.2 Description de la pipette VIAFLO [59]

Les pipettes VIAFLO sont des pipettes électroniques (monocanal, multicanaux) permettent d'aspirer et distribuer des liquides dans une gamme de volume compris entre 0.5 et 5000 μl .

INTEGRA a développé les pipettes afin d'optimiser les tâches habituelles de pipetage pour être à la portée de tous les laboratoires. La pipette peut être programmée par ordinateur en utilisant un support de programmation pour une pipette en implantant simplement un programme précis créé à l'aide des logiciels VIALINK sur ordinateur.

Ce type de pipettes permet d'effectuer les modifications sur les paramètres suivants pour les adapter aux applications: volume, espace entre les gouttes, vitesse d'aspiration et d'expiration, nombre de gouttes...).

IV.6.2.1 Avantage du pipetage multicanaux automatisé

- Précision de dépôt ;
- Angle de pipetage constant ;
- Contrôle de la vitesse du pipetage ;
- Gagner du temps ;

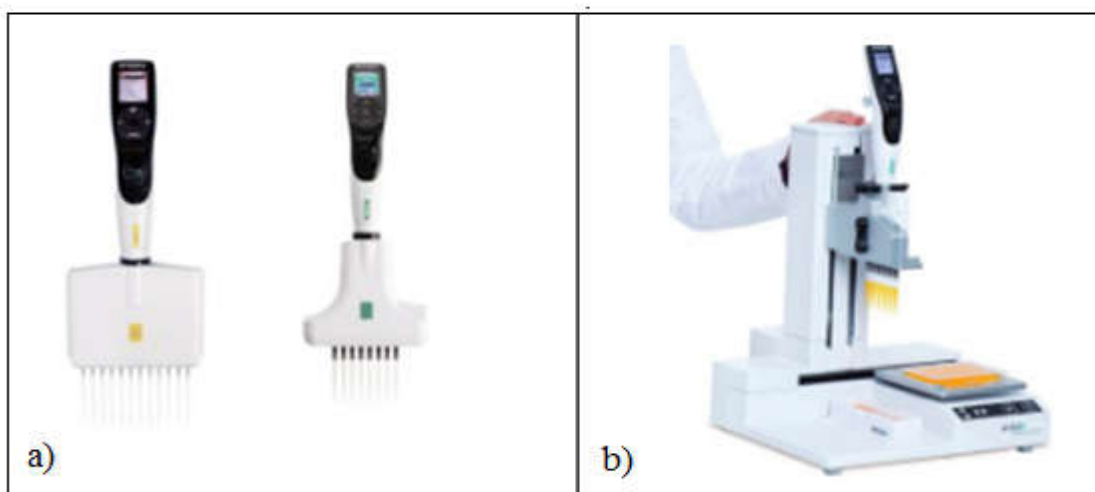


Fig. IV. 6: a) Pipette électronique INTEGRA, b) Robot de pipetage

IV.6.3 Définition d'un moteur pas a pas [60]

Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction des impulsions électriques. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions s'appelle un pas. On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour.

IV.6.3.1 Avantages et inconvénients des moteurs pas à pas [60]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Asservissement de position ou de vitesse en boucle ouverte • Fort couple à basse vitesse • Simplicité de mise en œuvre • Positionnement statique • Fiabilité • Faible prix 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionnement discret • Faible vitesse maximale • Faible puissance • Bruyant, source d'oscillations • Faible rendement

Tab. IV. 3 Avantages et inconvénients

IV.6.4 Raccordements avec l'automate

Le raccordement s'effectue à l'aide d'un l'automate (exemple : Schneider M340 avec le module de sortie TOR DRA 0805), le schéma ci-dessous montre un exemple de raccordement du module avec des cartes de commandes :

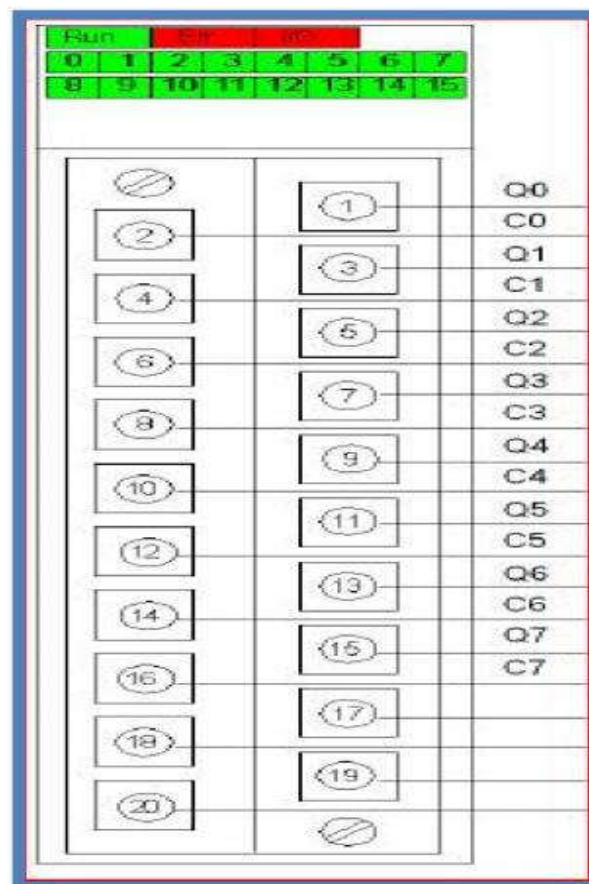


Fig. IV. 7: Exemple de raccordement avec l'automate

Selon Y (Moteur 2)

La première voie (Q0, C0) : commande du moteurs de base pour qu'il tourne dans un sens ;

La deuxième (Q1, C1) : commande du même moteur pour qu'il tourne dans le sens inverse ;

Selon X (Moteur 1)

La troisième voie (Q2, C2) : pour le clock du moteur pas à pas ;

La quatrième voie (Q3, C3) : pour le changement de sens du même moteur ;

Selon Z (Moteur 3)

La cinquième voie (Q4, C4) : pour le clock du moteur pas à pas ;

La sixième voie (Q5, Q6) : pour le changement de sens du même moteur ;

La commande de l'automate Schneider M340 s'effectue sous le logiciel « Unity Pro » avec le langage Ladder. Pour la communication entre l'automate et l'ordinateur s'effectue par la connexion Ethernet.

IV.7 Conclusion

Ce présent chapitre introduit les généralités sur la robotisation qui est de nos jours présente dans tous secteurs, ainsi qu'une étude théorique d'un robot cartésien constitué de 3 robots pas à pas adapté a notre manipulation qui est le dépôt de gouttes d'eau automatiquement sur une surface superhydrophobe. La réalisation ce dernier sera très intéressante a fin de facilité, optimiser, et d'accomplir la tache en un minimum de temps.

**Chapitre V : Expérimentation sur les
surfaces superhydrophobe**

V.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de confectionner plusieurs échantillons d'une isolation superhydrophobe et d'étudier expérimentalement l'effet des paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau déposées manuellement sur sa surface isolante superhydrophobe sur la tension continue négative de leur expulsion de celle-ci.

Comme facteurs d'influence de cette grandeur, notre choix est porté sur le nombre de gouttes d'eau et leur position par rapport aux électrodes, le nombre de rangées, les divers types de leur arrangement, leur volume, leur conductivité électrique et la masse de kaolin ajoutée à ces gouttes d'eau, en utilisant différentes géométries d'électrodes afin d'éliminer les décharges électriques qui sont la cause principal de la perte de superhydrophobicité de l'isolation considérée dans cette étude.

V. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure

V.2.1 Confection d'une surface superhydrophobe isolante

Une quantité de silicone est prise du tube (Fig. V. 1a). Celle-ci est déposée sur un morceau de bois et nous la brûlant (Fig. V. 1b). Une plaque en verre de dimensions 10 mm *10 mm * 5 mm et sur laquelle est appliquée manuellement une couche très fine de silicone est approchée de la flamme pour la recouvrir de suie émanant de la carbonisation de la silicone (Fig. V. 1b et 1c), La figure V. 1d montre la plaque totalement noircie et rincée à l'eau du robinet.

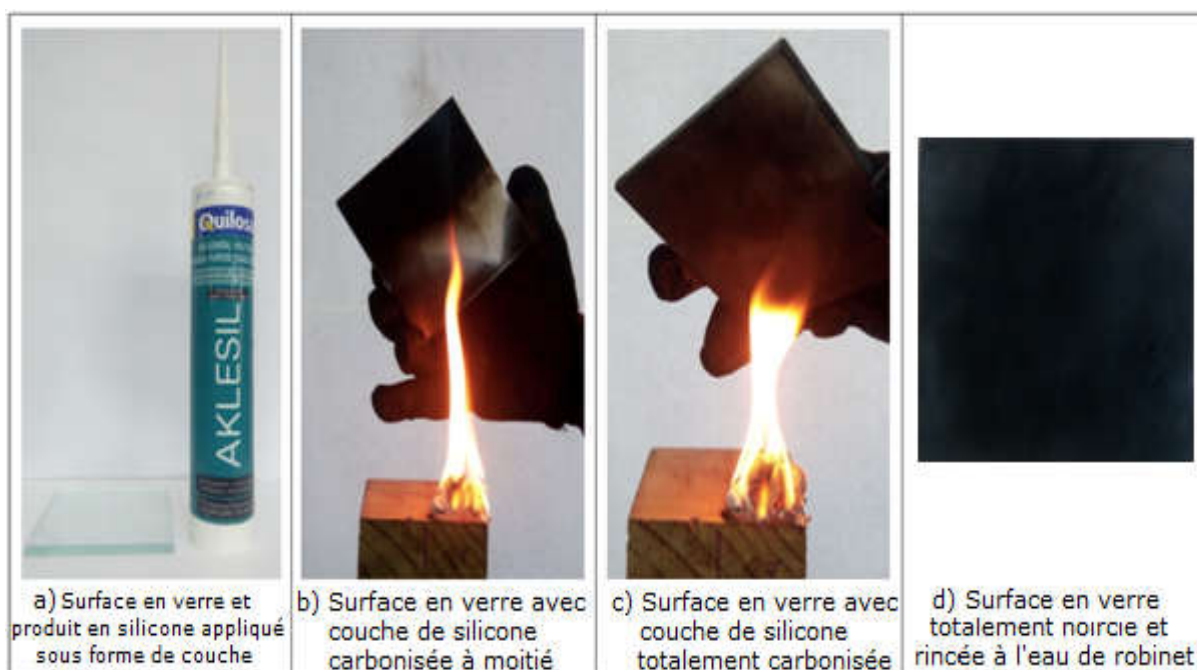


Fig. V.1: Principales étapes de préparation d'une surface en verre superhydrophobe

V.2.2 Volume des gouttes d'eau et leur angle de contact

Afin de varier le volume des gouttes d'eau, une micropipette graduée de 10 à 100 μl a été utilisée dans le cadre de cette étude (Fig. V. 2). Le volume choisi de la goutte d'eau est fixé à l'aide du compteur de la micropipette. Une quantité est aspirée de la solution se trouvant dans un bécher (Fig. V. 2a). Celle-ci est déposée sous forme de goutte d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. V. 2b).

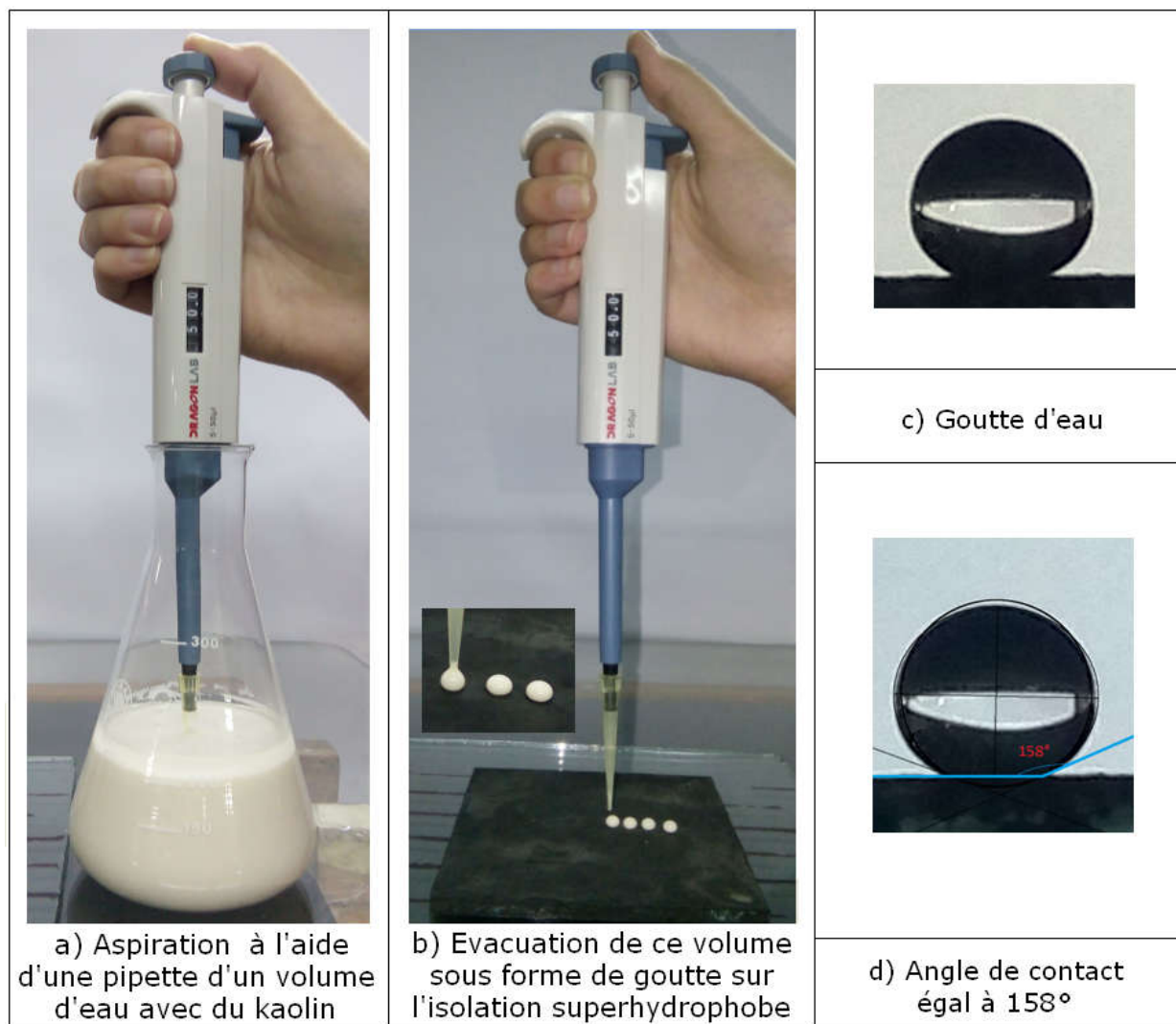


Fig. V.2: Mesure de volume d'une goutte d'eau avec Micropipette (5 à 100 μl) et son angle de contact

Les gouttes d'eau paraissent blanches sur la figure V. 2 car elles ont été mélangées à du Kaolin. Un logiciel disponible sur internet a été utilisé pour la mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau sur la surface superhydrophobe. Sa valeur est de l'ordre de 158° (Fig. V. 2c et 2d).

La figure V. 3 donne l'allure de l'angle de contact en fonction du volume de la goutte d'eau. La mesure de celui-ci a été obtenue à l'aide du logiciel suscité. Il en découle que l'angle de contact diminue avec l'élévation du volume de la goutte d'eau distillée. Ceci peut-être appliquée par le fait qu'avec croissance du volume de la goutte, celle-ci s'alourdit et s'aplatit, ce qui fait diminuer son angle de contact.

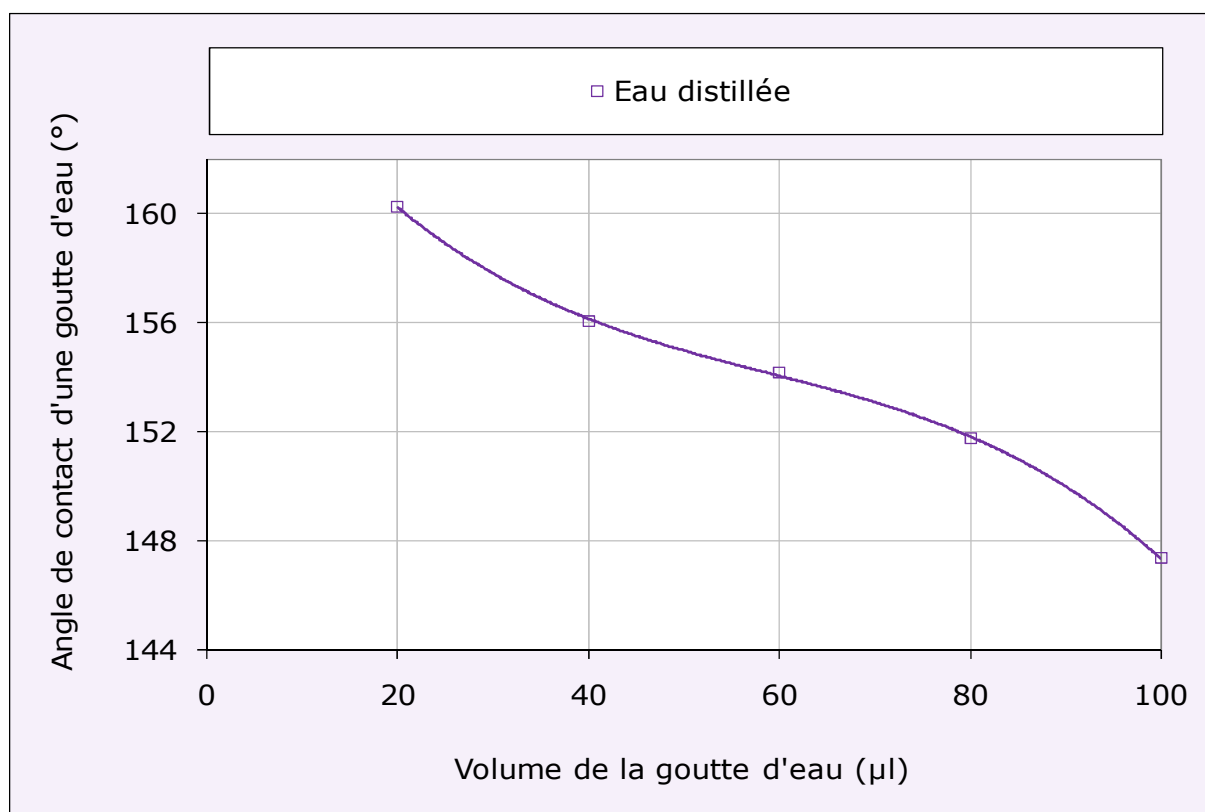


Fig. V. 3: Angle de contact en fonction du volume d'une goutte d'eau

V.2.3 Géométrie des électrodes haute tension et terre

Trois jeux de deux électrodes ont été confectionnés. Leurs caractéristiques sont illustrées par la figure V. 4. Un jeu l'électrode sont pleines (Fig. V. 4a et 4b). Le deuxième jeu est constitué de deux électrodes à dents distantes de 1,5 cm et 9 mm de hauteur (Fig. V. 4c et 4d). Le troisième jeu est composé de deux électrodes en forme de pont afin de permettre aux gouttes d'eau de quitter complètement la plaque lors de sa mise sous tension (Fig. V. 4e et 4f).

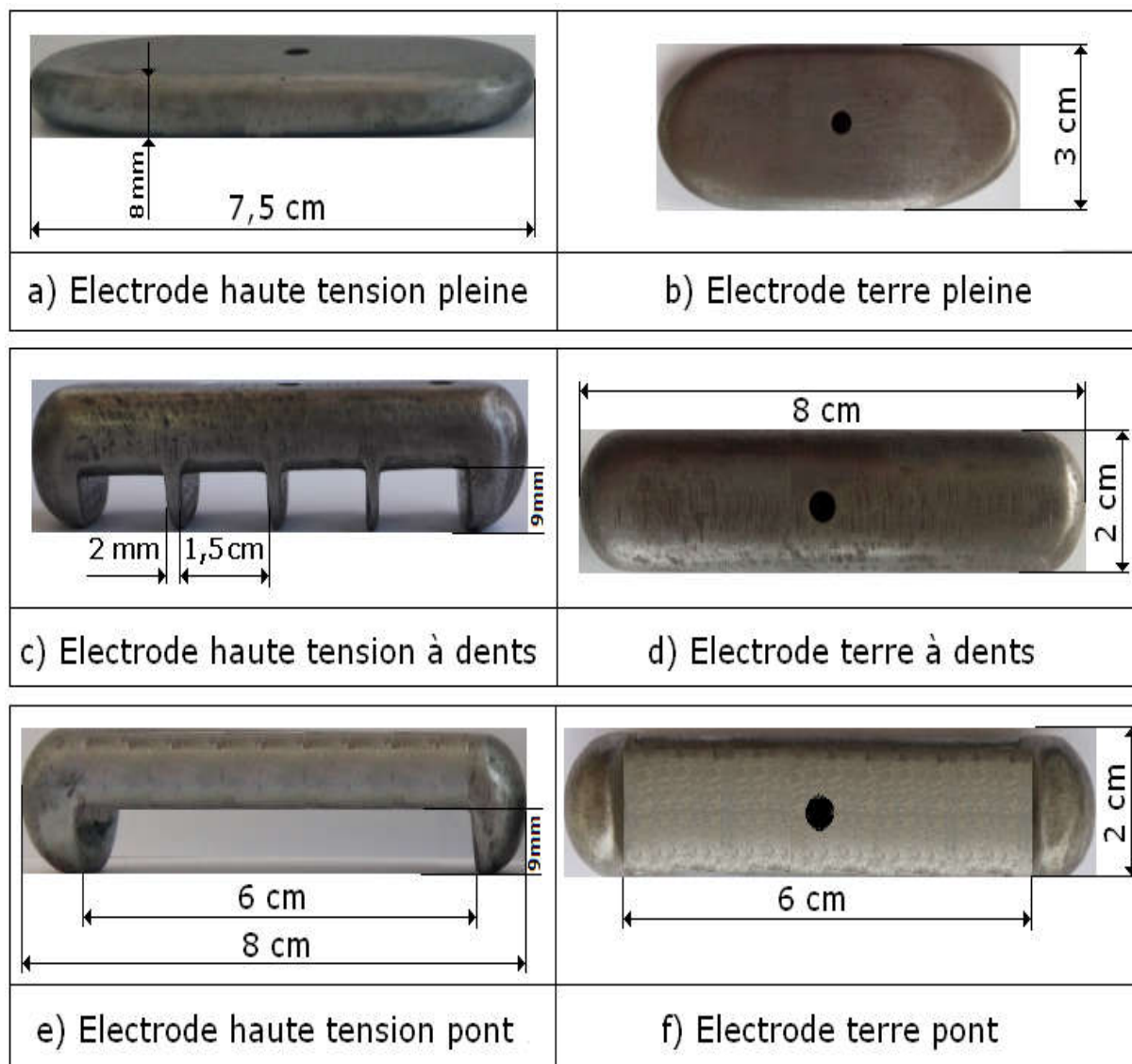


Fig. V. 4: Systèmes d'électrodes utilisées

V.2.4 Arrangement des gouttes d'eau

Deux types d'arrangement des gouttes d'eau ont été utilisés dans le cadre de cette présente étude : Arrangement des gouttes d'eau en lignes droites (Fig. V. 5a) et un arrangement en zigzag (Fig. V. 5b).

Le premier type d'arrangement consiste en un dépôt de plusieurs gouttes sur une ligne droite. Les lignes droites des gouttes d'eau sont parallèles entre elles. Par contre le deuxième type d'arrangement consiste en un dépôt de plusieurs gouttes d'eau de telle sorte que la goutte suivante est décalée soit à gauche soit à droite par rapport à la précédente. Les lignes zigzagées sont aussi parallèles entre elles.

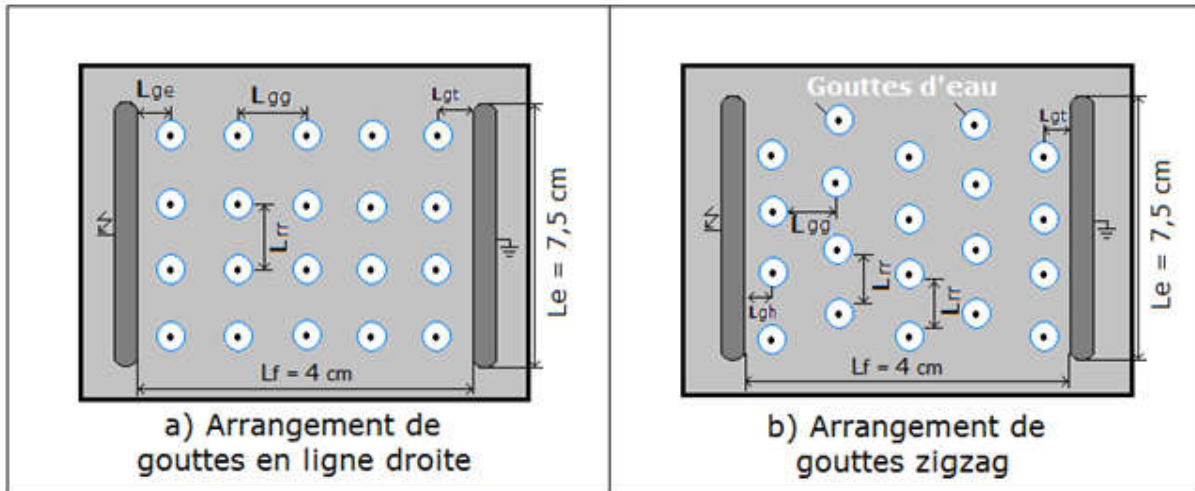


Fig. V. 5: Types d'arrangements de gouttes d'eau en zigzag et en ligne droite (L_f : Longueur de la ligne de fuite, L_{gg} : distance entre les centres de deux rangées successives de gouttes d'eau le long de la ligne de fuite L_f , L_{rr} : distance entre les centres de deux rangées adjacentes de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation, L_{gh} : distance entre l'électrode haute tension et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche de celles-ci le long de cette ligne de fuite, L_{gt} : distance entre l'électrode terre et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche de celles-ci le long de cette ligne de fuite)

V.2.5 Mesure de la tension d'expulsion et visualisation de l'évacuation des gouttes

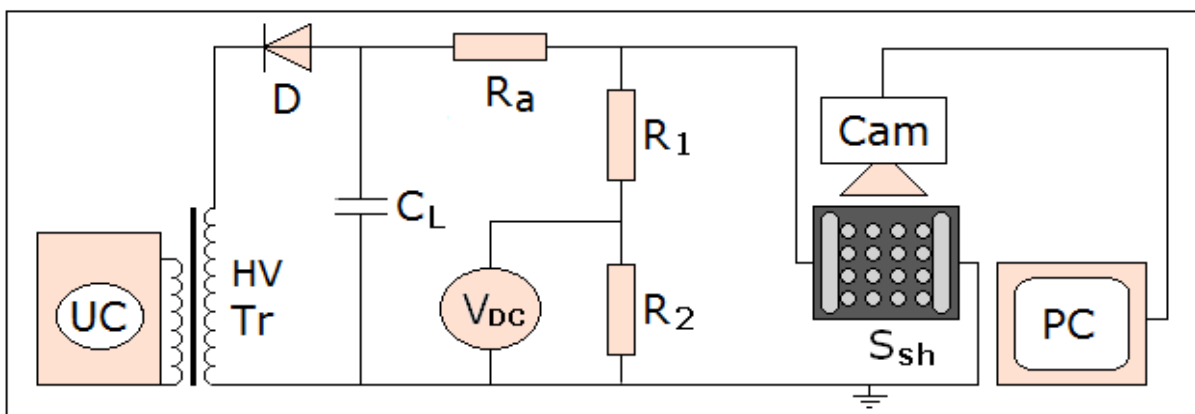


Fig. V. 6: Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes

La tension continue d'essai de l'isolation est fournie par la station de mesure illustrée par la figure V. 6. Celle-ci comprend principalement un transformateur élévateur délivrant à son secondaire une tension de 135 kV et un courant de 80 mA. Sa sortie est reliée au moyen de la diode D en connexion inverse à la résistance d'affaiblissement de courant R_a (106 k Ω), en dérivation avec le condensateur de lissage C_L (10 nF). Dans ces cas, les branchements de l'isolation superhydrophobe (S_{sh}) et du voltmètre de crête (V_{DC}) sont effectués respectivement

aux bornes du diviseur de tension résistif (R_1/R_2) et aux extrémités de la résistance de mesure R_2 . Le bouton de montée de la vitesse de la rampe de tension d'essai est commandé manuellement.

Nous avons effectué une série de 20 essais pour chaque paramètre d'influence, la valeur retenue est la moyenne arithmétique du nombre de mesures effectués [60,61]

V.3 Résultats et interprétation

V.3.1 Tension de contournement de l'isolation superhydrophobe sèche

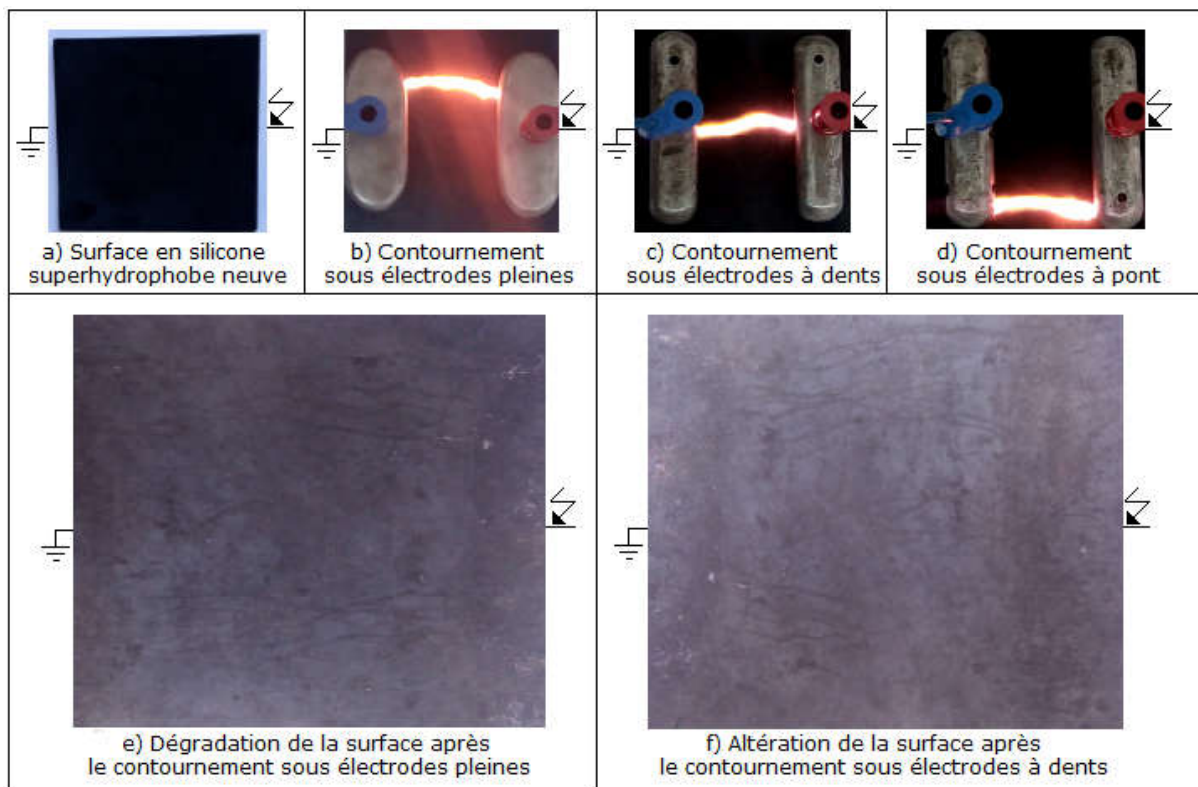


Fig. V. 7 : Impact des décharges de contournement de la surface superhydrophobe sur son état de dégradation en fonction de la géométrie des électrodes

Après avoir confectionné plusieurs échantillons de l'isolation superhydrophobe, quelques uns d'entre eux ont été mis sous tension de contournement à sec dont les valeurs moyennes obtenues en fonction de la géométrie des électrodes HT et terre sont résumées dans le tableau V.1. Il en ressort que leur tension de contournement sous électrodes à pont est plus élevée que sous électrodes à dents et sous électrodes pleines. La figure V. 7 décrit l'état de surface de l'isolation lorsque celle-ci est neuve (Fig. V. a), après contournements sous électrodes pleines (Fig. V. 7b) et sa dégradation (Fig. V. 7e) enfin, après contournement de la même plaque sous électrodes à dents (Fig. V. 7c) et son altération (Fig. V. 7f).

Nature des électrodes	Pleines	à dents	à pont
Valeur moyenne de la tension de contournement de l'isolation sèche (kV)	46,7	48	49,3

Tab. V. 1 Valeurs de la tension de contournement de la surface superhydrophobe isolante sèche en fonction de la nature des électrodes HT et terre

V.3.2 Nombre de gouttes et leur position par rapport aux électrodes

La figure V. 8 illustre l'allure de la tension d'expulsion d'une goutte d'eau en fonction de sa position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Celle-ci a été déposée manuellement à l'aide d'une pipette sur la surface de l'isolation superhydrophobe (côté électrode terre, milieu, et côté électrode haute tension) lorsque le matériau est hors tension. Il en découle que la tension d'expulsion de la goutte est la plus petite lorsque elle est proche de l'électrode haute tension et plus on s'en éloigne, plus elle nécessite une tension d'expulsion plus élevée. La figure V. 9 montre le mouvement de la goutte d'eau le long de la ligne de fuite du matériau superhydrophobe vers l'électrode haute tension.

La goutte est posée au milieu de la surface superhydrophobe et la valeur de la tension appliquée à l'isolation est augmentée jusqu'au démarrage de la goutte. Sous l'action de la force électrique, celle-ci se déplace du milieu (Fig. V. 9a, 9b et 9c) vers l'électrode haute tension (Fig. V. 9d).

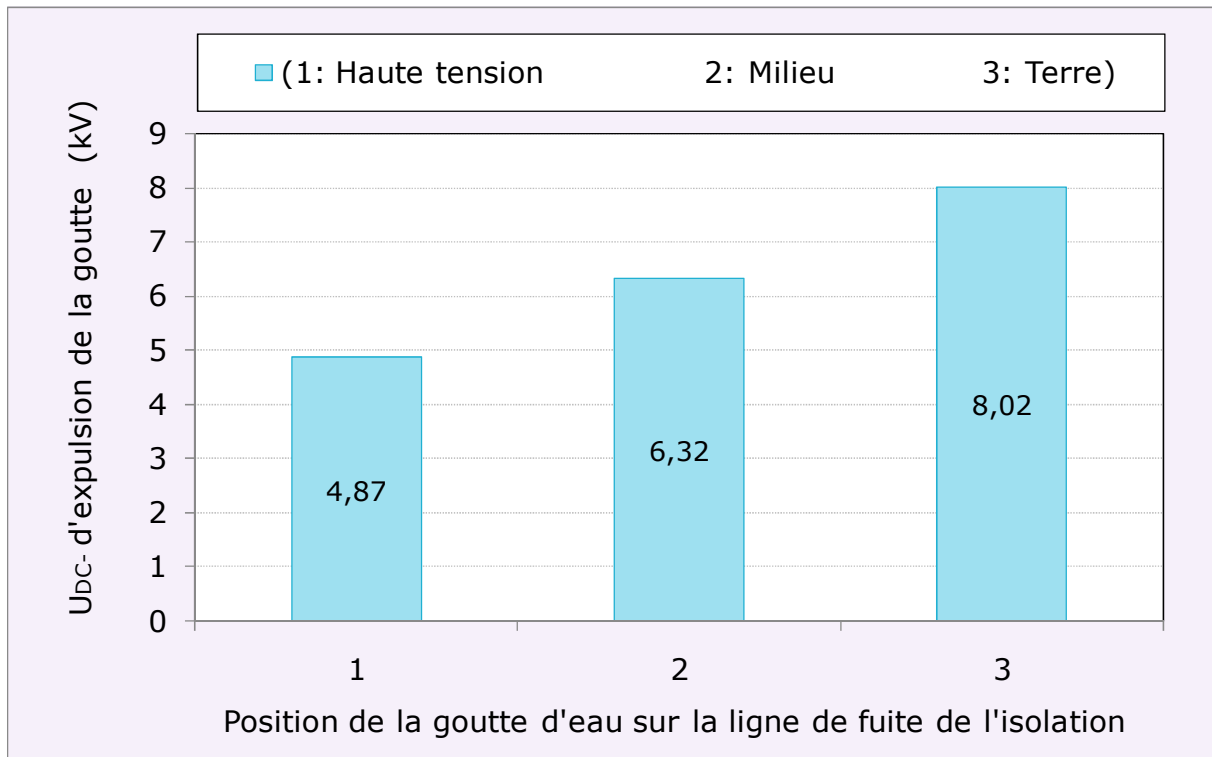


Fig. V. 8: Tension continue négative d'expulsion de la goutte d'eau en fonction de sa position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe



Fig. V. 9: Phases de mouvement d'une goutte d'eau le long de la ligne de fuite d'une isolation superhydrophobe

Dans le cas de deux gouttes d'eau, nous distinguons deux modes d'expulsion de celles-ci soit une évacuation individuelle, soit une expulsion simultanée. La figure V.10 donne l'allure de la tension d'expulsion individuelle de deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Il en ressort l'expulsion d'abord d'une première goutte ensuite une deuxième et que les tensions d'évacuation des deux gouttes sont plus faibles quand elles sont proches de l'électrode haute tension que lorsqu'elles se trouvent au voisinage de l'électrode terre.

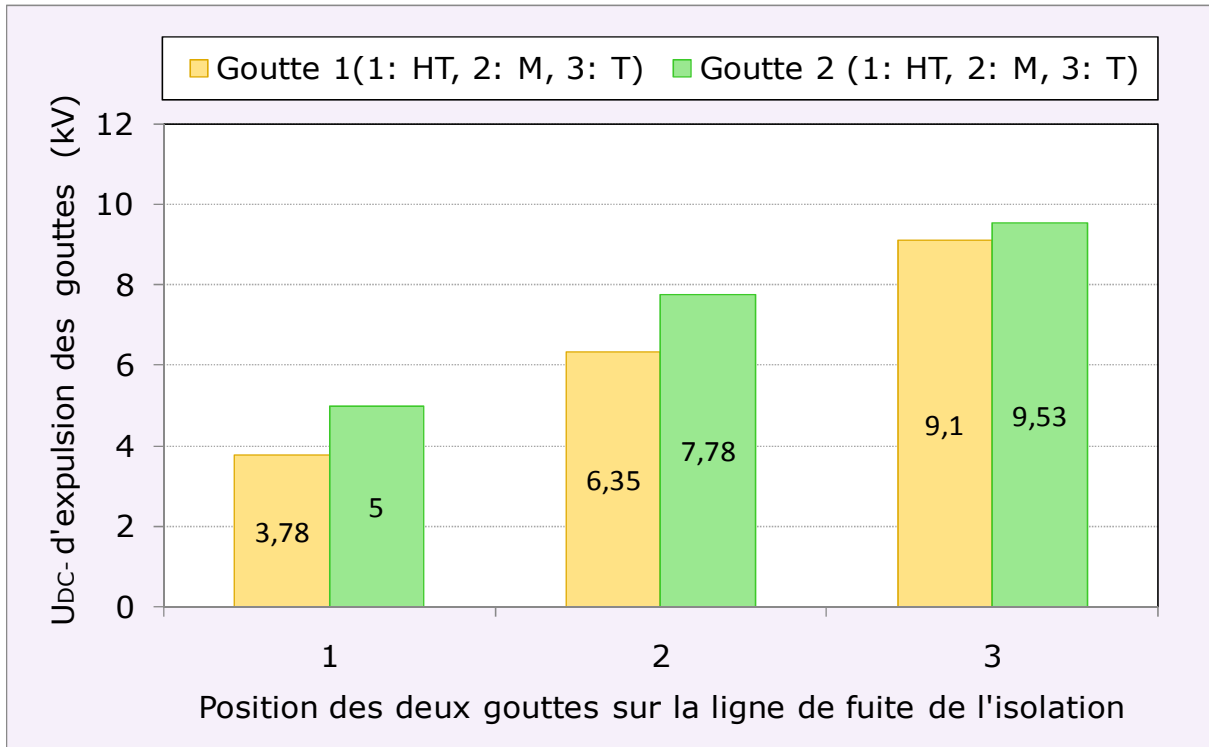


Fig. V. 10: Tension négative d'expulsion individuelle des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe

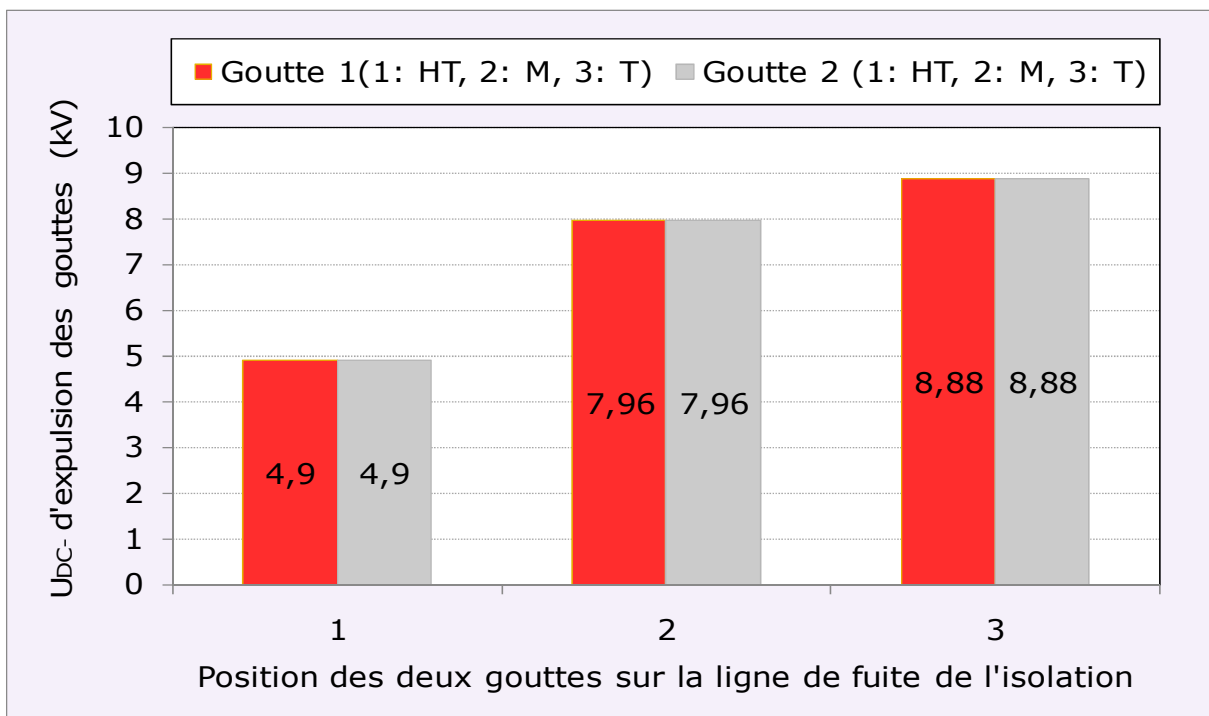


Fig. V. 11: Tension continue négative d'expulsion simultanée des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe

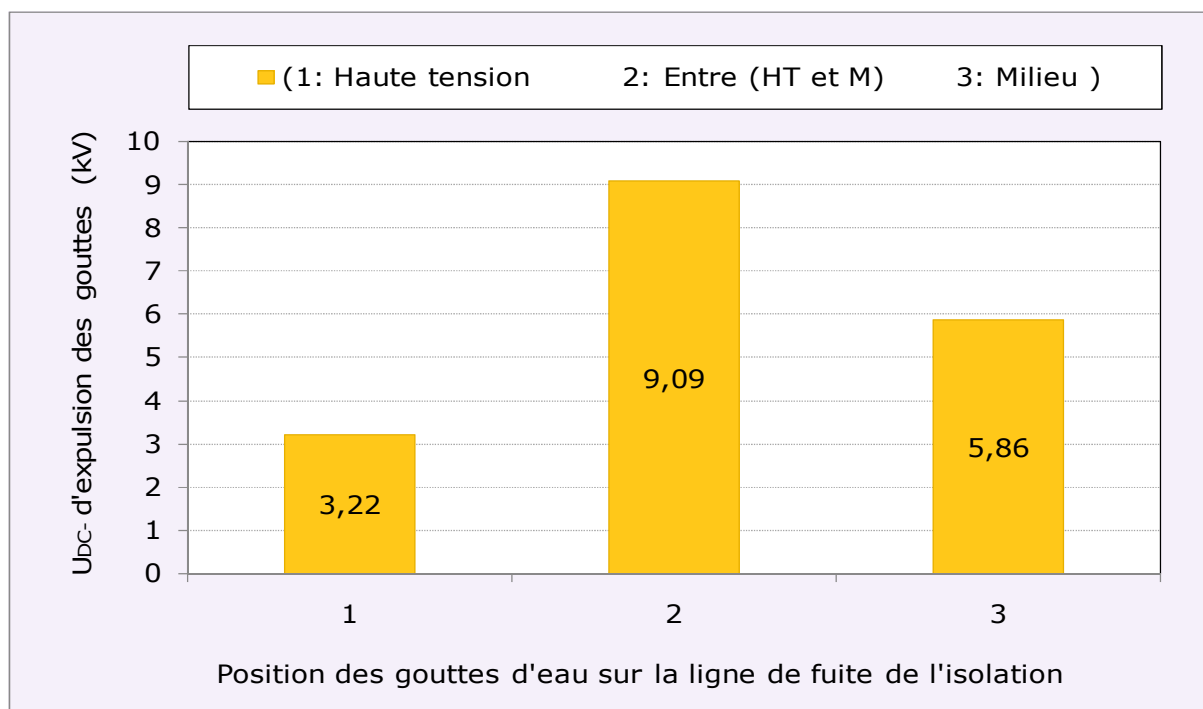


Fig. V. 12: Tension continue négative d'expulsion de trois gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe

La figure V.11 donne l'allure de la tension d'expulsion simultanée de deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Il en résulte une tension d'expulsion simultanée des deux gouttes d'eau plus petite quand elles sont proches de l'électrode haute tension que lorsqu'elles se trouvent au voisinage de l'électrode terre.

La figure V.12 donne l'évolution de la tension d'expulsion de trois gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Il en découle que l'évacuation intéresse d'abord la goutte se trouvant proche de l'électrode sous tension qui est attirée par celle-ci ensuite vient la goutte située au voisinage de l'électrode terre vers laquelle elle est dirigée et enfin celle se trouvant au milieu de l'isolation, qui a le choix d'aller soit vers l'électrode haute tension ou celle mise à la terre.

La figure V.13 illustre l'évolution de la tension d'expulsion de quatre gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Il en résulte que l'expulsion intéresse en premier lieu la goutte se trouvant proche de l'électrode sous tension ensuite vient la goutte située au voisinage de l'électrode terre et enfin les gouttes du milieu.

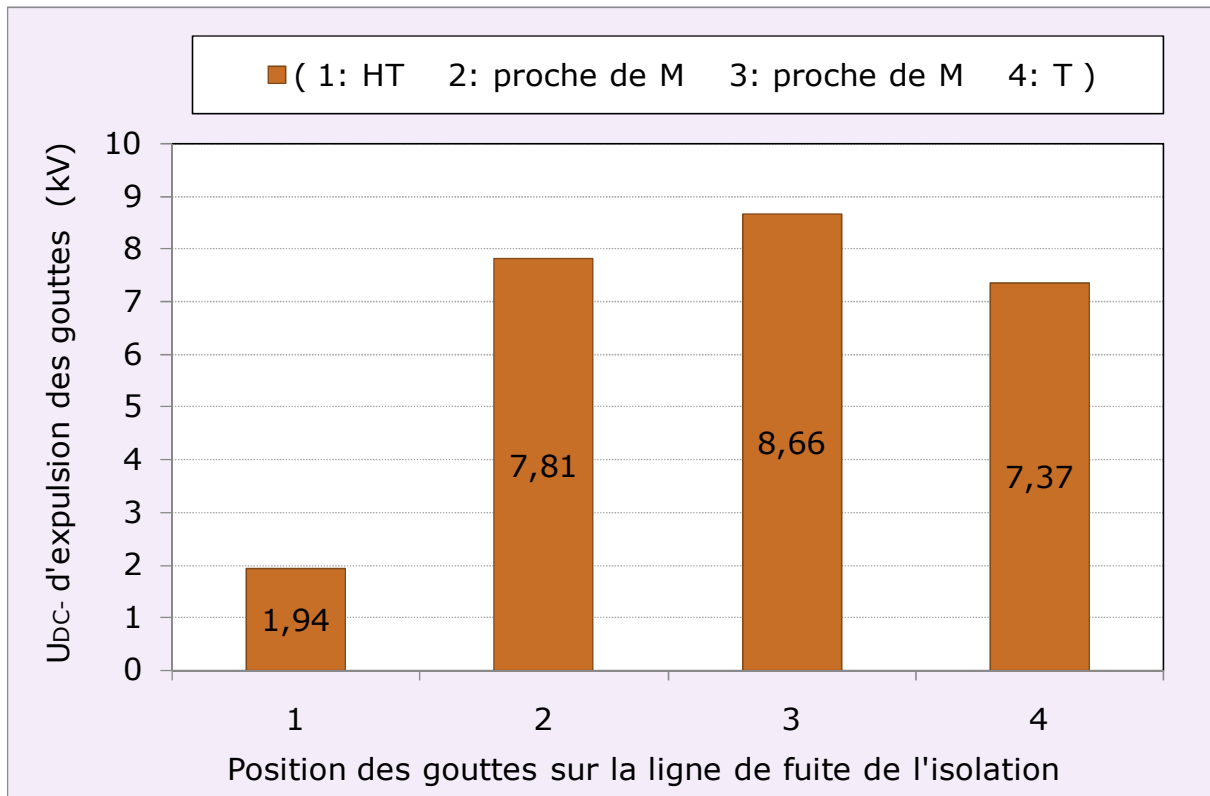


Fig. V. 13: Tension continue négative d'expulsion des quatre gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe

La figure V.14 donne l'allure de la tension d'évacuation des cinq gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Il en découle que la tension d'expulsion des gouttes croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'électrode mise sous haute tension vers celle reliée à la terre.

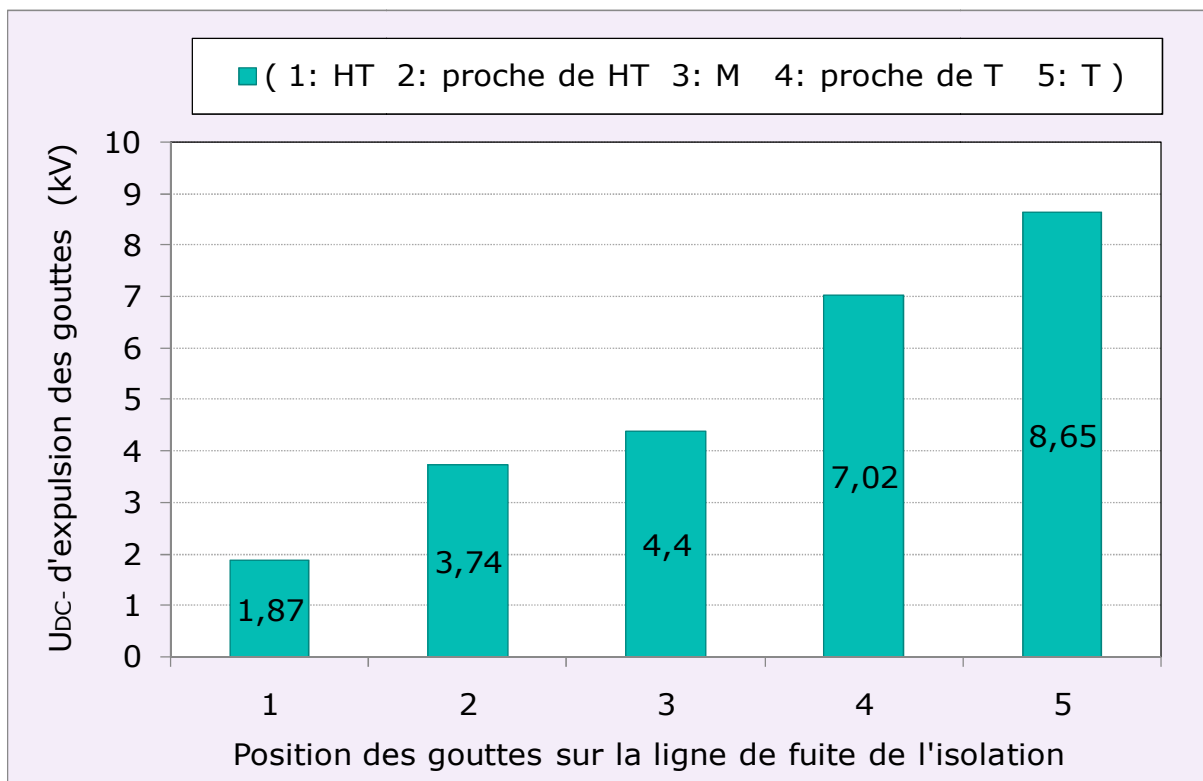
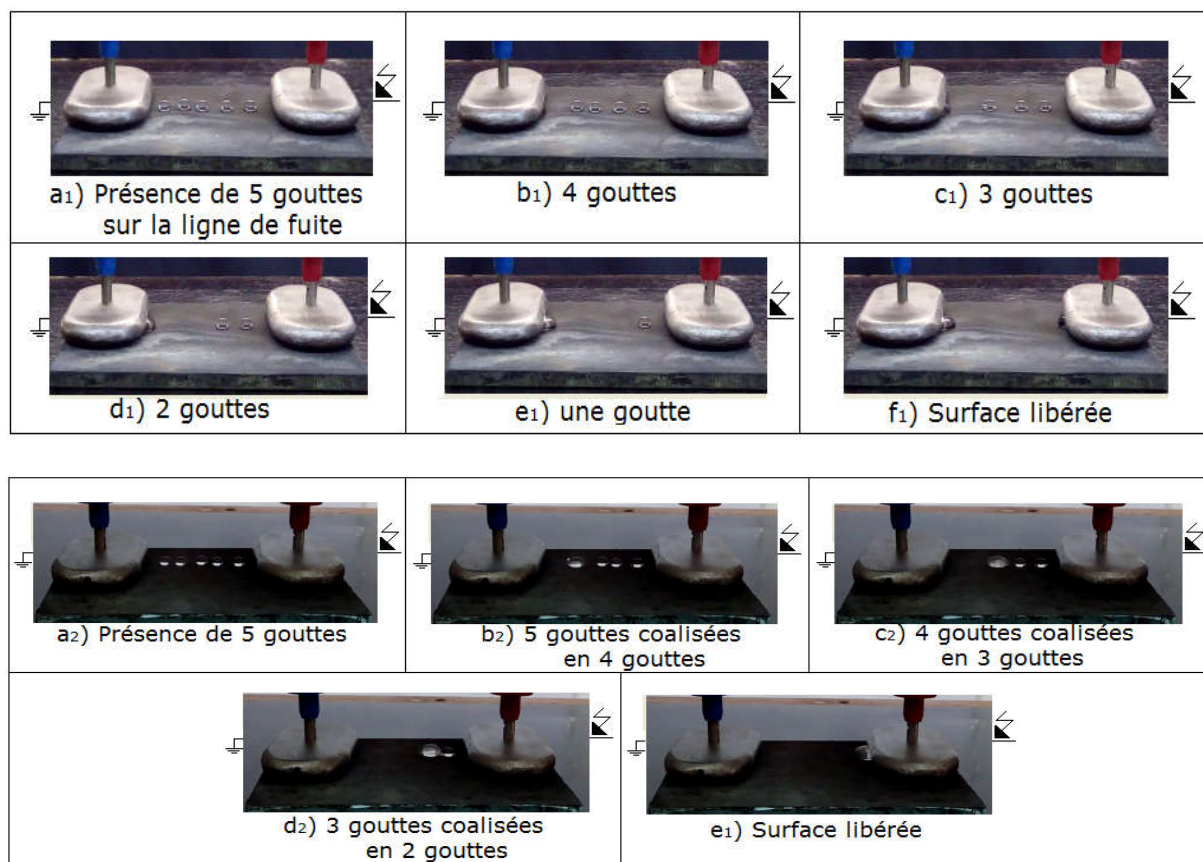


Fig. V. 14: Tension continue négative d'expulsion des cinq gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe



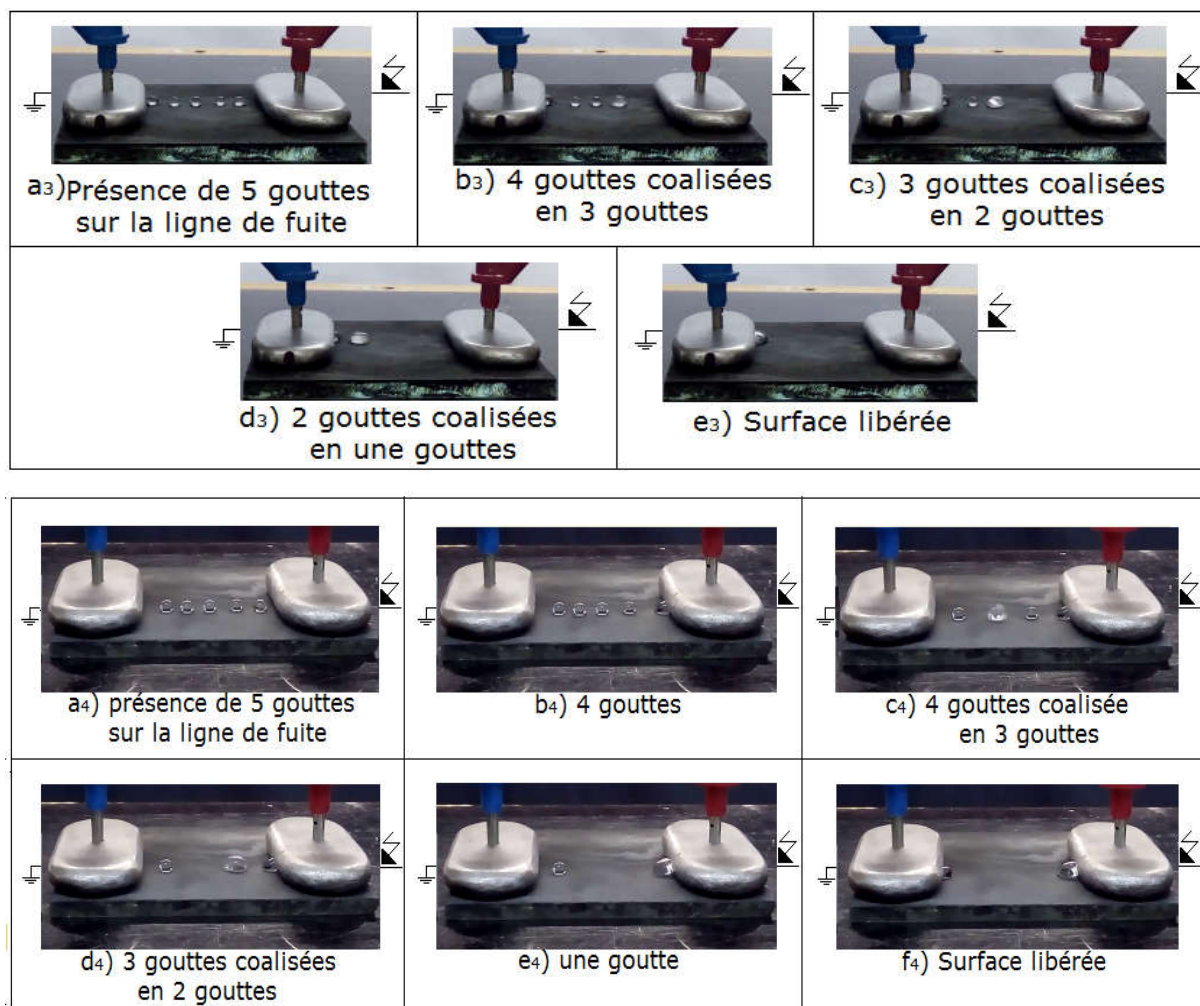


Fig. V. 15 : Phases du mouvement de cinq gouttes d'eau sur la surface interélectrode d'une isolation superhydrophobe

La figure V. 15 donne trois modes d'expulsion des gouttes d'eau, à savoir une expulsion sans coalescence des gouttes (Fig. V. 14a1,...14f1), ou bien une coalescence des gouttes d'eau avant leur expulsion (Fig. V. 14a2,...14f4)

V.3.3 Nombre de rangées de gouttes d'eau

La figure V. 16 a été obtenue suivant un arrangement de goutte d'eau en ligne droite conformément à la figure V. 5a. Selon cette figure les gouttes d'eau sont déposées en plusieurs rangées de cinq gouttes chacune. Il en résulte que la tension d'expulsion de la dernière goutte augmente en fonction du nombre de rangées, et à partir de la troisième rangée celle-ci devient constante quel que soit le nombre de rangées de gouttes d'eau ajoutées.

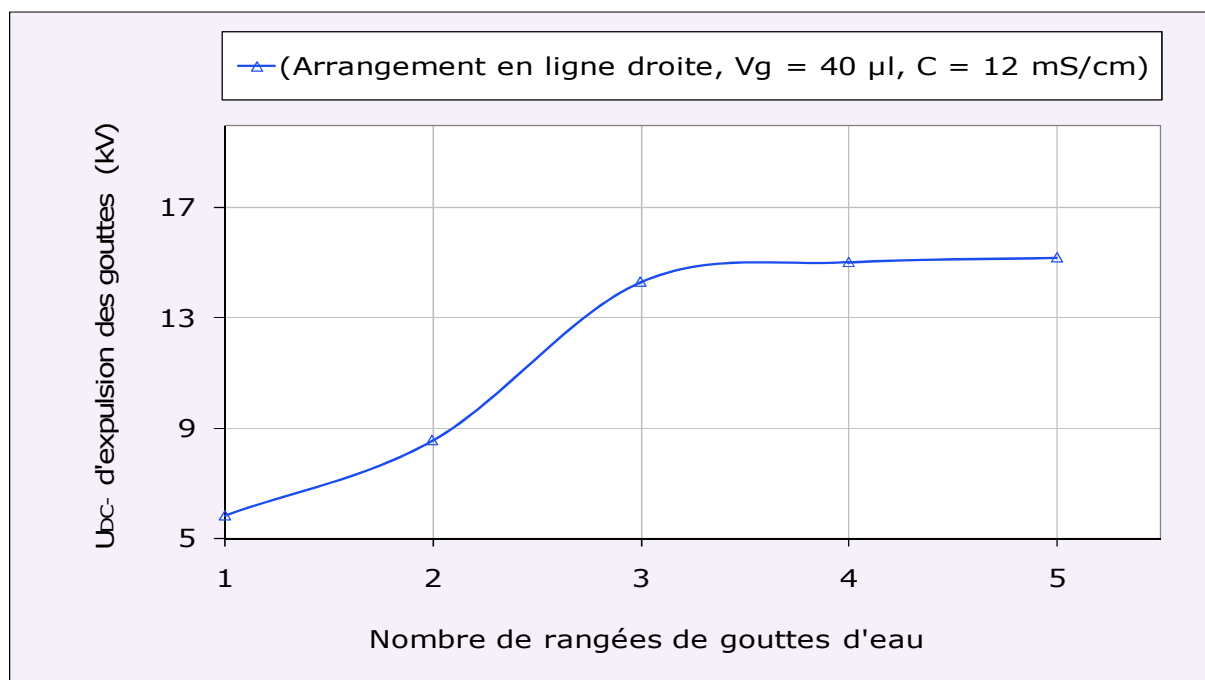


Fig. V. 16: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe selon un arrangement en lignes droites

V.3.4 Type d'arrangement des gouttes d'eau sur la surface

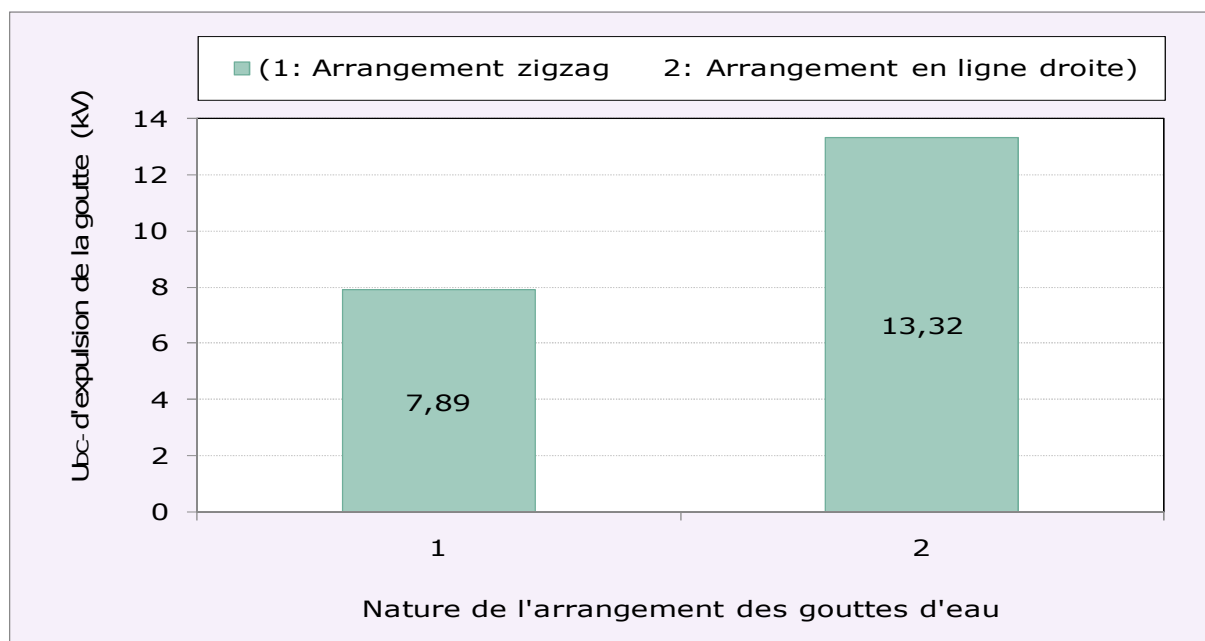


Fig. V. 17: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur arrangement

La figure V. 17 illustre l'historgramme de la tension d'expulsion de la dernière goutte en fonction du type d'arrangement de gouttes d'eau considéré. Il en découle que la tension d'évacuation des gouttes est plus grande sous un arrangement en ligne droite qu'en zigzag. Ceci peut être expliqué par le fait que les gouttes en lignes droites se voient gênées donc leur

mouvement par rapport à celles en zigzag qui ont un peu plus de voie libre lors de leur expulsion.

Les figures V. 18 et V. 20 représentent la tension d'expulsion de 25 gouttes arrangées en lignes droites et zigzag respectivement.

Il est à remarquer sur la figure V. 17 que la tension d'expulsion de la dernière goutte de la ligne droite est plus grande que celle arrangée en zigzag. Ceci reste valable aussi pour les autres gouttes des deux arrangements.

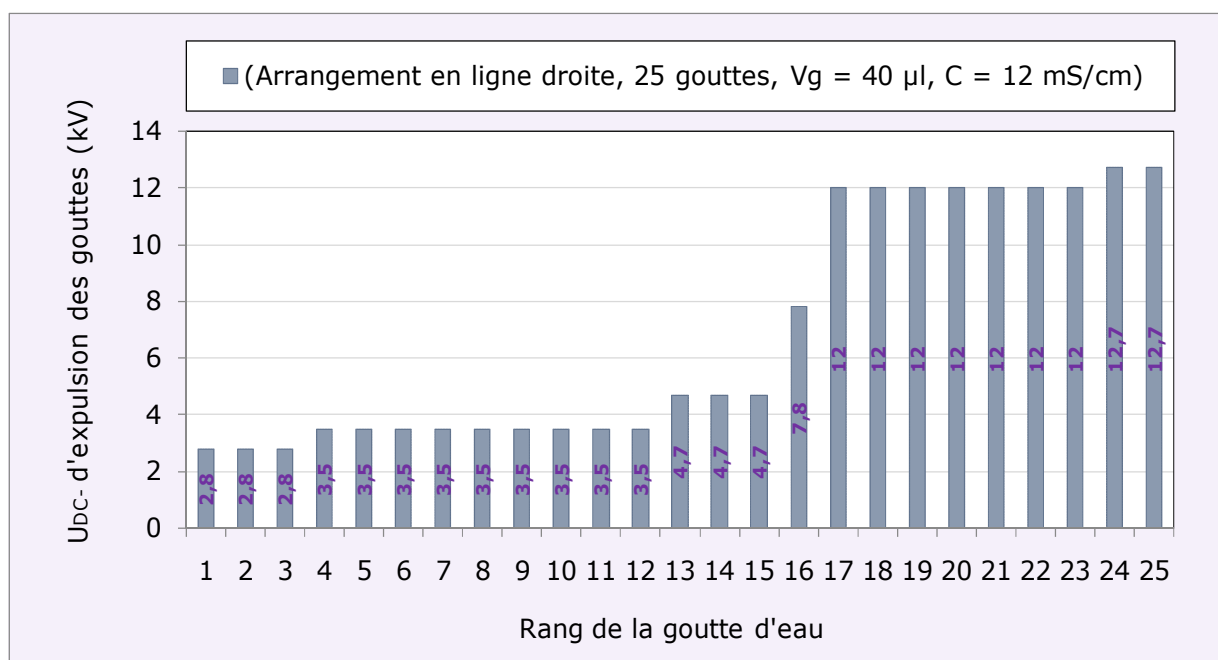


Fig. V. 18: Tension continue négative d'expulsion de 25 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe sous un arrangement en ligne droite

Les figures V. 18 et V. 20 montrent respectivement l'évacuation en groupe des gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites et la coalescence des gouttes avant leur expulsion vers les électrodes sous tension et à la terre.

Il est à souligner que la coalescence entraîne l'augmentation de la tension d'expulsion des gouttes coalisées.

Les figures V. 19 et V. 21 illustrent respectivement le rejet en groupe et la coalescence de certaines gouttes d'eau sous un arrangement en zigzag. Ce scénario est le même que le précédent sauf que les tensions d'expulsion dans ce cas sont plus faibles.

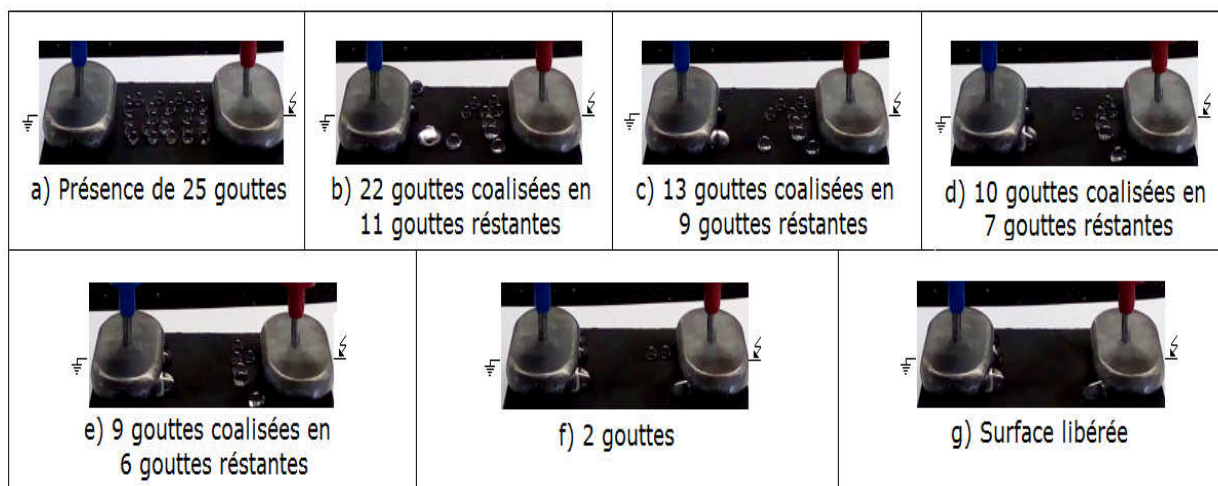


Fig. V. 19: Phases du mouvement de 25 gouttes d'eau sur la surface d'une isolation superhydrophobe sous un arrangement en ligne droite

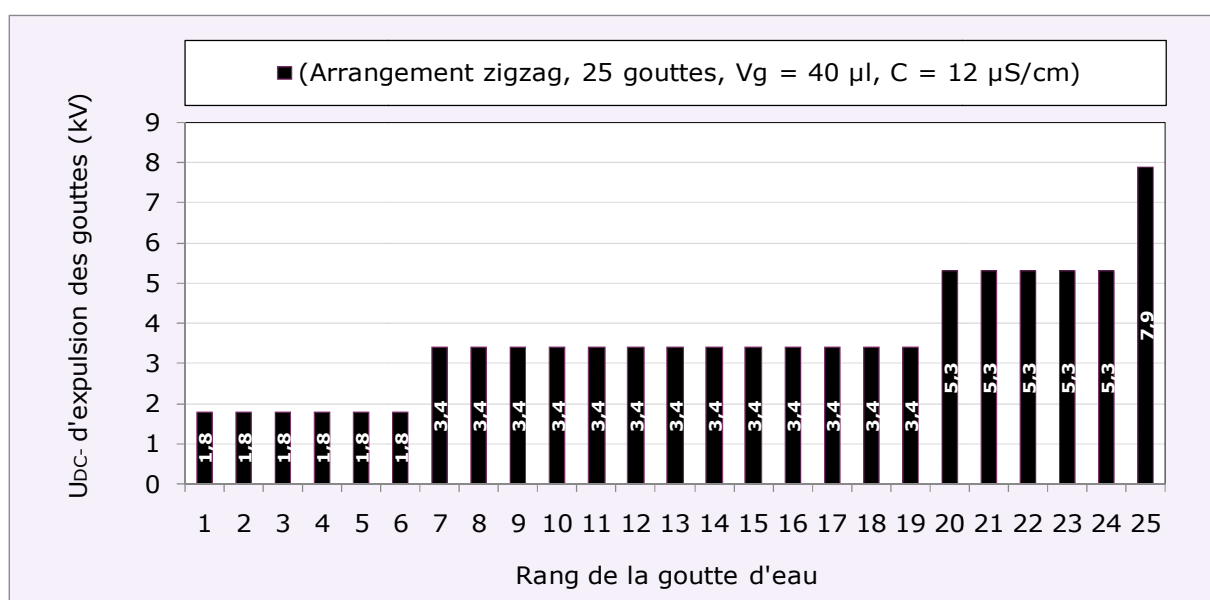


Fig. V. 20 : Tension continue négative d'expulsion des 25 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe sous un arrangement en zigzag

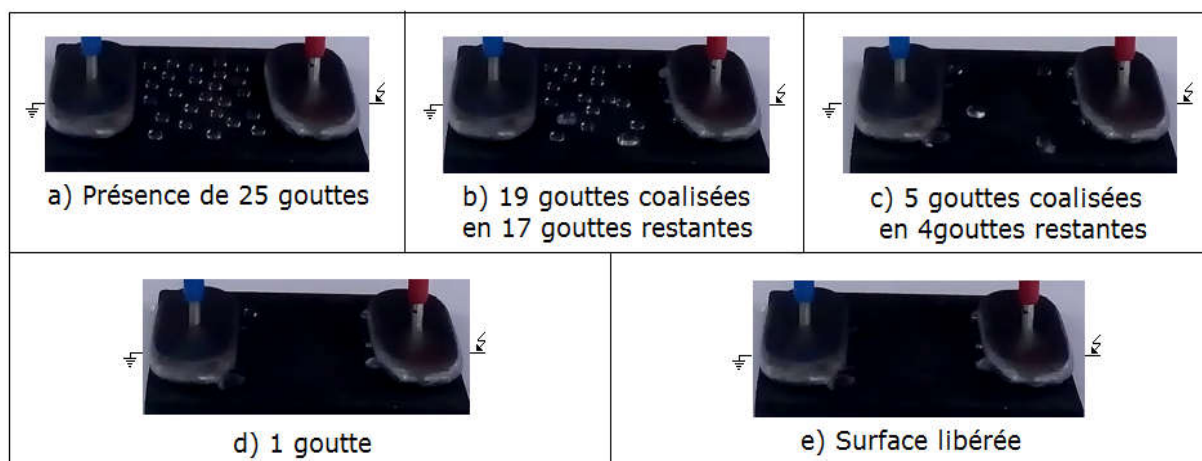


Fig. V. 21: Phases du mouvement de 25 gouttes d'eau de la surface d'une isolation superhydrophobe sous un arrangement en zigzag

V.3.5 Volume des gouttes d'eau

La figure V. 22 donne l'évolution de la tension d'expulsion des gouttes d'eau en fonction du volume. Il en découle que celle-ci diminue avec l'élévation du volume.

Les gouttes à petit volume se coincent entre les aspérités et nécessitent une grande tension d'expulsion (effet Wenzel) pour être évacuée de la surface de l'isolation. Par contre les gouttes à grand volume restent sur les aspérités (effet Cassis) et se font expulser finalement avec une tension plus faible que les petites gouttes.

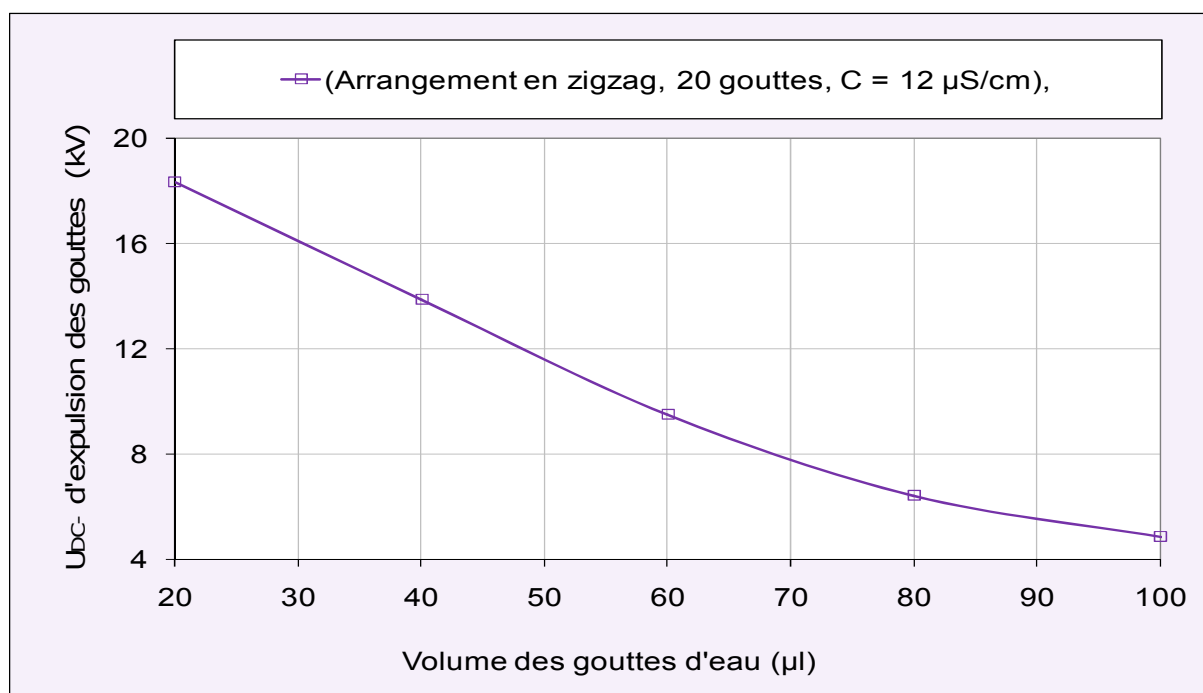


Fig. V. 22 : Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur volume

La figure V. 23 et V. 24 représentent respectivement deux histogrammes de la tension d'expulsion des gouttes en forme d'escaliers et de paliers.

L'expulsion par palier ou par groupe de gouttes d'eau (Fig. V. 24) est plus favorable pour la surface isolante car celle-ci est dégagée plus rapidement de ces gouttes et sa superhydrophobie se voit conservée par rapport à une expulsion individuelle des gouttes (Fig. V. 23) qui entraîne l'allongement des gouttes sur l'isolation sous tension et la probabilité élevée de diminution de la superhydrophobie de sa surface.

La figure V. 25 illustre le mode d'expulsion par groupe de gouttes d'eau de 80 µl de volume. Sous une tension de 3.6 kV 12 gouttes sont évacuées ensemble (Fig. V. 24a et 24b).

Avec l'élévation de la tension vers la valeur de 6.9 kV, les 8 gouttes d'eau restantes libèrent aussitôt la surface de l'isolation (Fig. V. 25b et 25c).

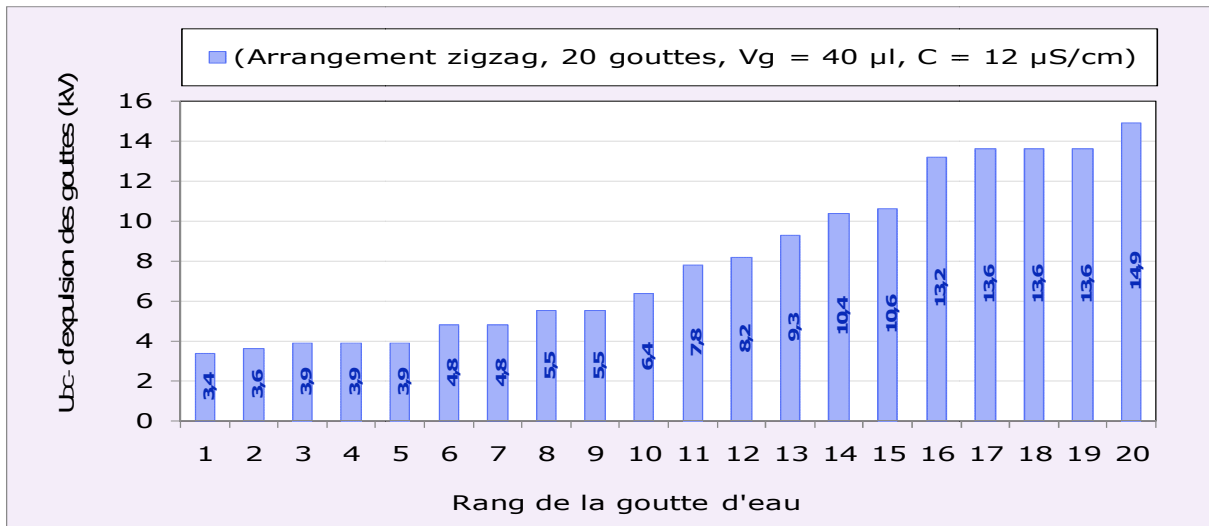


Fig. V. 23: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau de 40 µl recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

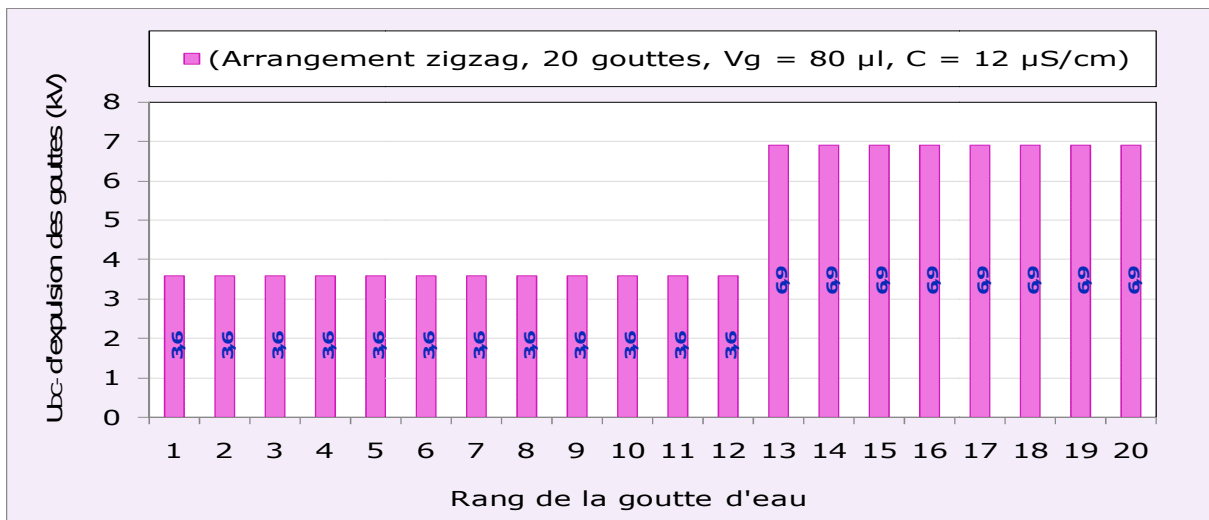


Fig. V. 24: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau de 80 µl recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

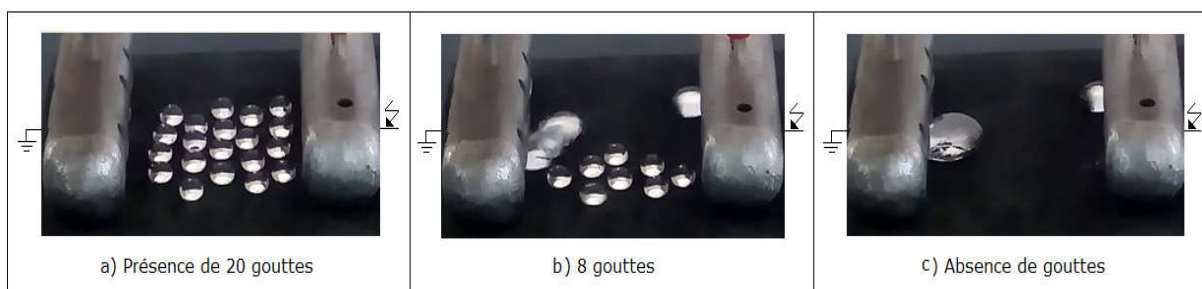


Fig. V. 25: Etapes d'expulsion par groupe des gouttes d'eau de 80 µl recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

V.3.6 Conductivité électrique des gouttes d'eau

La figure V. 26 illustre l'allure de la tension d'expulsion de la dernière goutte d'eau en fonction de sa conductivité électrique. Mis à part l'intervalle de conductivité électrique

compris entre 0 et 1 mS/cm où la tension d'expulsion augmente légèrement et ce qui correspond au temps de polarisation de la goutte d'eau isolante, cette grandeur n'exerce aucune influence sur la tension d'évacuation des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe de l'isolation considérée.

La tension d'expulsion des gouttes d'eau reste constante quelle que soit le degré de pollution de la solution préparée.

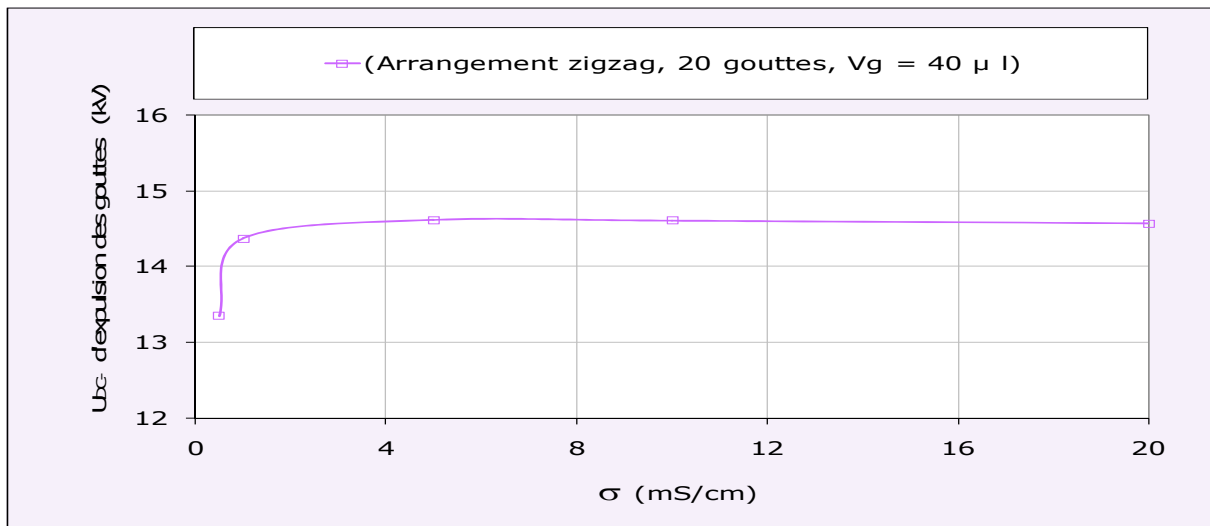


Fig. V. 26: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité

La figure V. 27 et V. 28 représentent deux formes d'histogrammes de la tension d'expulsion des gouttes, soit individuellement, par groupe ou mixte indépendamment de la valeur de la conductivité électrique des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation. Donc le mode d'évacuation des gouttes conductrices n'est pas influencé par le degré de pollution de la solution contaminante préparée.

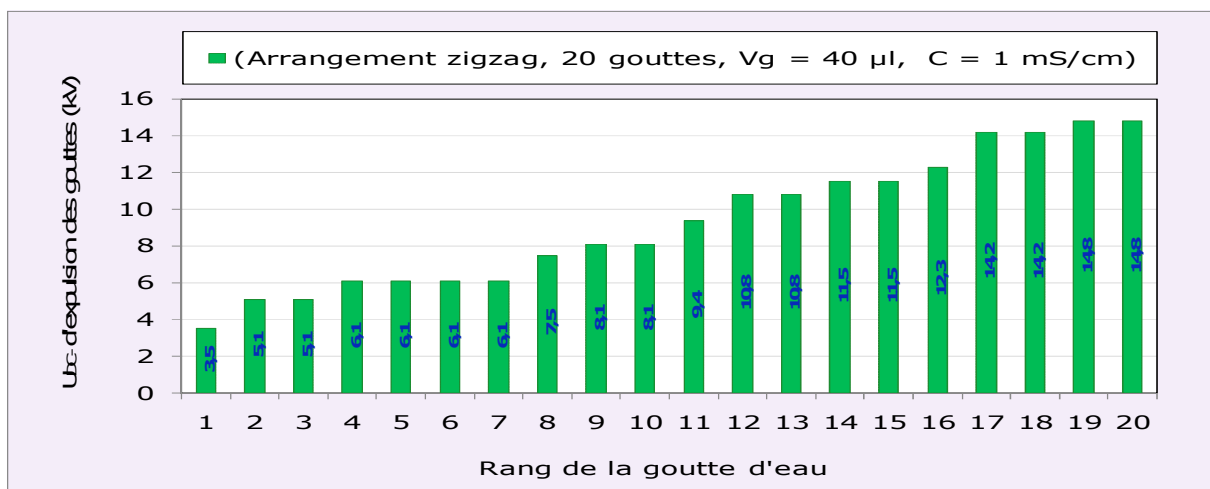


Fig. V. 27: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau d'une conductivité de 1 mS /cm recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

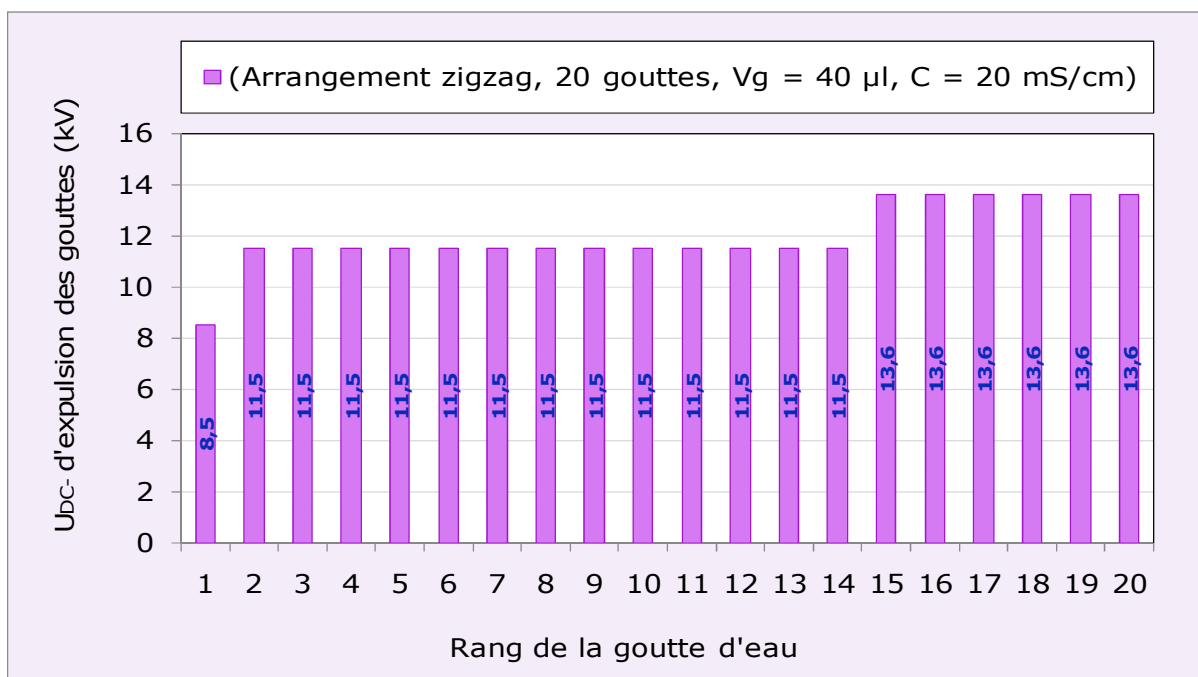


Fig. V. 28: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau une conductivité de 20 mS /cm recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

La figure 29 montre un mode mixte d'expulsion des gouttes d'eau de conductivité électrique égale à 20 mS/cm.

En premier lieu une goutte est évacuée (Fig. V. 29a et 29b) ensuite 13 gouttes quittent ensemble la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. V. 29c) puis les 6 gouttes restantes libèrent ensemble la surface de l'isolation (Fig. V. 29d).

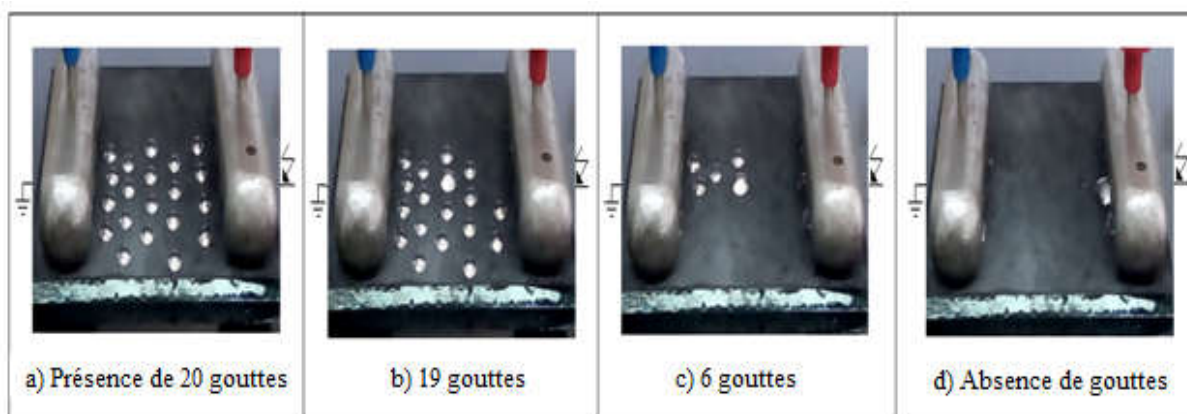


Fig. V. 29: Phases d'expulsion des gouttes d'eau d'une conductivité de 20 mS /cm recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

V.3.7 Masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau

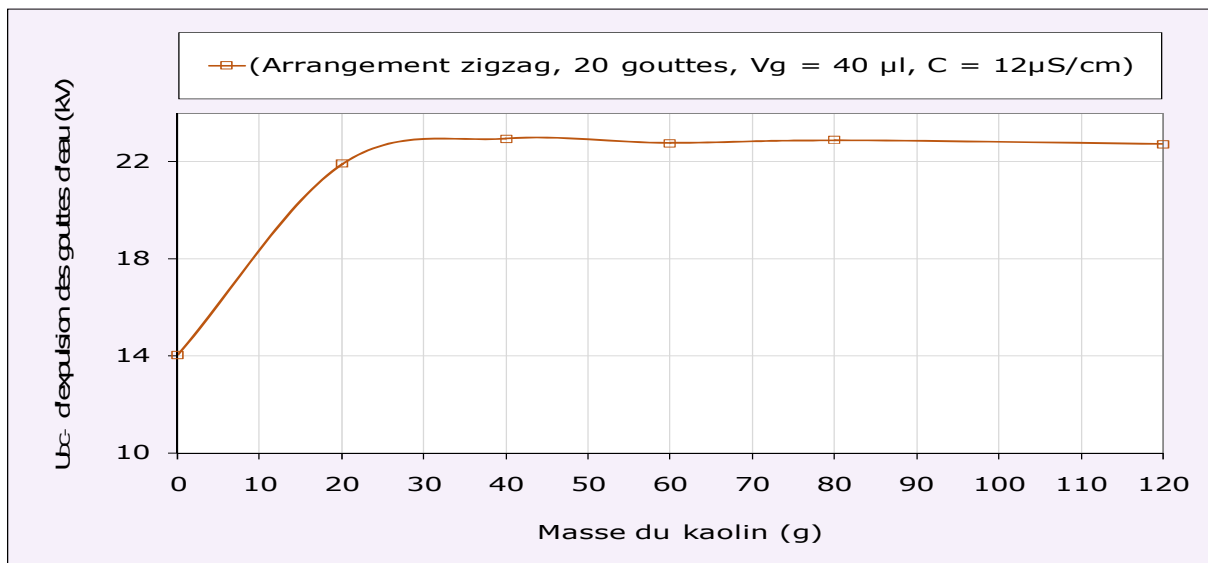


Fig. V. 30: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de la masse du kaolin ajoutée à la solution

Le kaolin réduit la superhydrophobicité de la surface isolante en l'humidifiant, donc les gouttes d'eau s'enfoncent dans l'espace délimité par les aspérités du fait de leur lourdeur par ajout d'une certaine masse de kaolin. Ceci entraîne d'élévation de la tension de leur évacuation de la surface par le champ électrique appliqué. Donc il existe une valeur limite de la masse de kaolin au-delà de laquelle la tension d'expulsion est maximale est constante (Fig. V. 30). Les figures V. 31, 32 et 33 donnent des histogrammes de tension d'expulsion des gouttes d'eau, individuelle et par groupes ainsi que le mode d'évacuation de ces gouttes par groupes. Ce dernier est toujours favorable pour la conservation de la superhydrophobicité de la plaque.

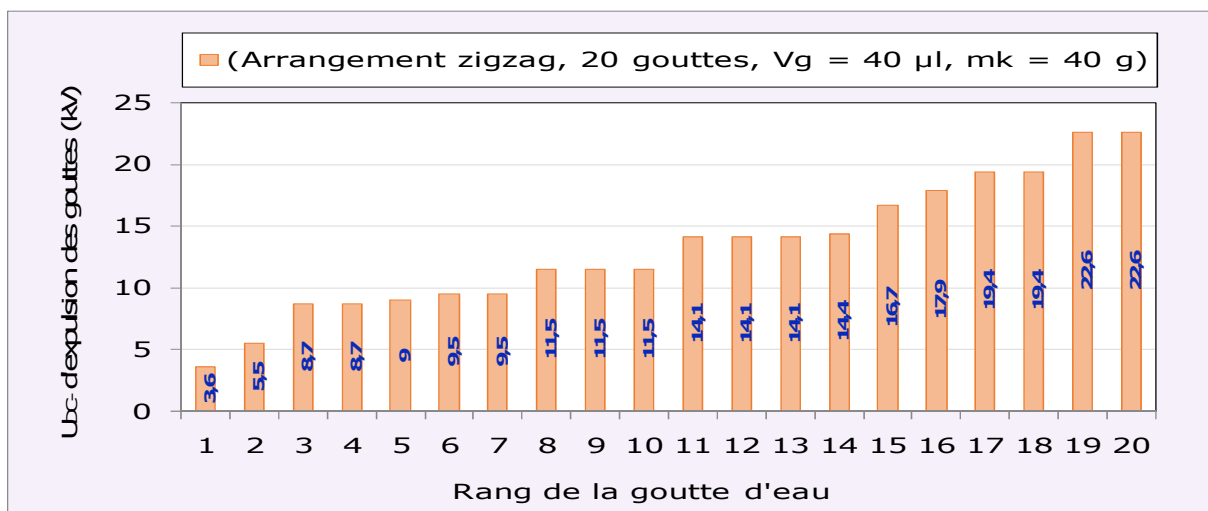


Fig. V. 31: Tension continue négative d'expulsion des gouttes de 40g de masse de kaolin recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

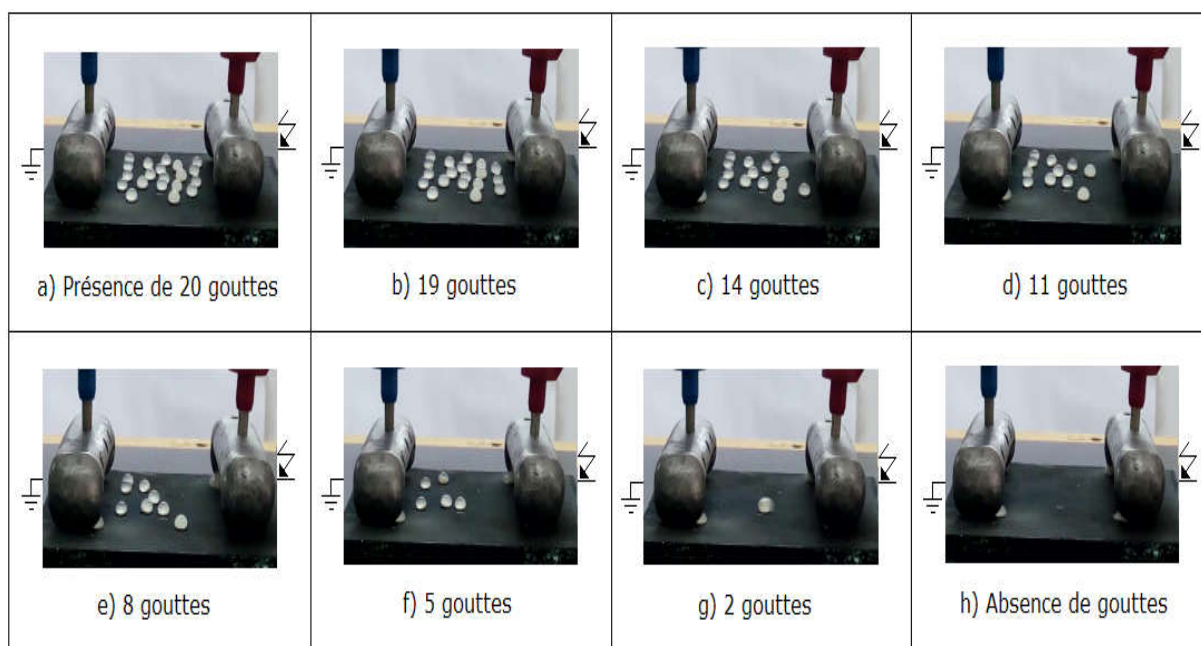


Fig. V. 32: Etape d'expulsion des gouttes d'eau de 40 g de masse de kaolin recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

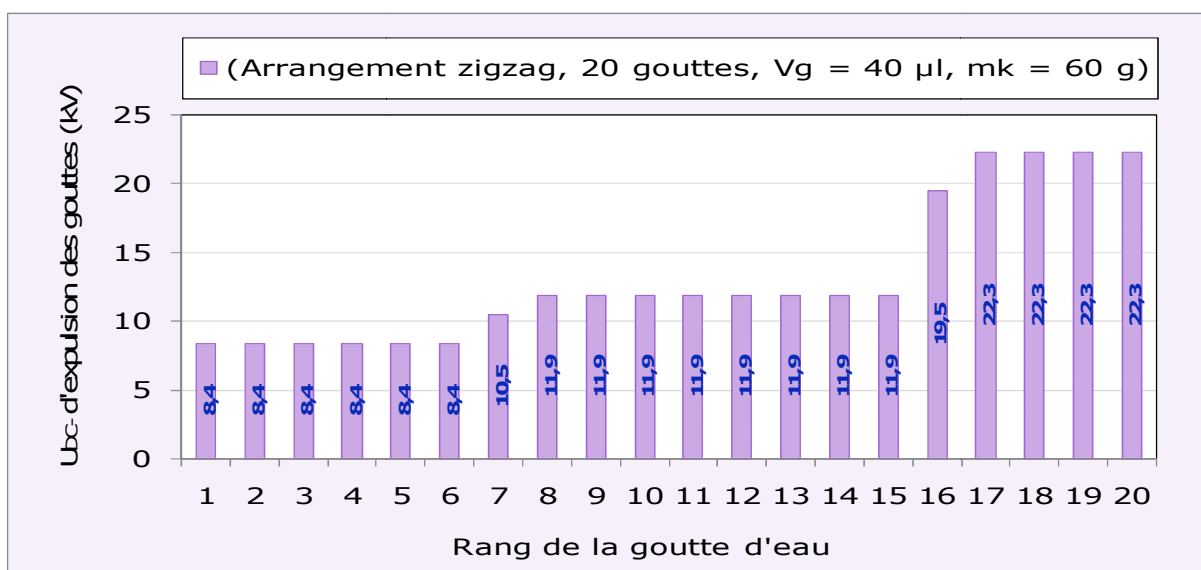


Fig. V. 33: Tension continue négative d'expulsion des gouttes de 60 g de masse de kaolin recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

V.3.8 Géométrie des électrodes haute tension et terre

Pour des raisons de conservation de la superhydrophobicité des surfaces isolantes essayées, il est nécessaire d'arrêter à tous prix l'apparition des décharges en cherchant une géométrie d'électrodes adéquate. Pour cette raison, trois profils d'électrodes ont été choisis pour en retenir le meilleur. Dans cette investigation un arrangement en zigzag de 20 gouttes d'eau de $40 \mu\text{l}$ de volume et de 12 mS/cm a été utilisé. Les résultats obtenus montrent que les décharges ont été plus fréquentes dans le cas des électrodes pleines par rapport à celles à dents

alors que dans le cas des électrodes à ponts les décharges électriques apparaissent très rarement.

Dans le cas des électrodes pleines, les décharges électriques se manifestent fréquemment à cause des gouttes qui quittent la surface en venant se collent aux électrodes haute tension et terre. Sous l'action de champs électrique, celles-ci s'effilent et raccourcissent la ligne de fuite sèche de l'isolation, ce qui entraîne le contournement de la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. V. 36).

Dans le cas des électrodes à dents, les gouttes d'eau viennent s'accrocher aux dents. Elles s'allongent et donnent naissance à des filets d'eau partiels. Ces dernières engendrent le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation superhydrophobe qui provoque le contournement du matériau (Fig. V. 38). Les électrodes à pont présentent un meilleur profil, du fait que les gouttes évacuées par la surface superhydrophobe, grâce au champ électrique y régnant, finissent par passer en dessous des électrodes sous forme de pont et sont éjectées carrément en dehors du système (Fig. V. 32).

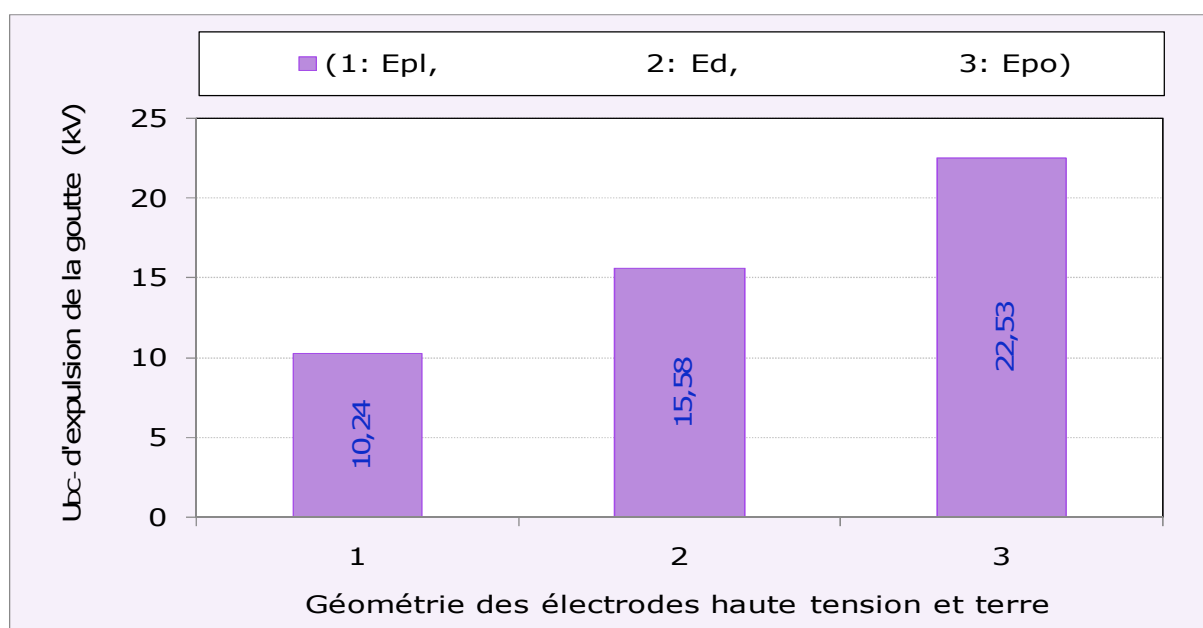


Fig. V. 34: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de géométrie des électrodes (Epl : Electrode pleine, Ed : Electrode à dent, Epo: Electrode à pont)

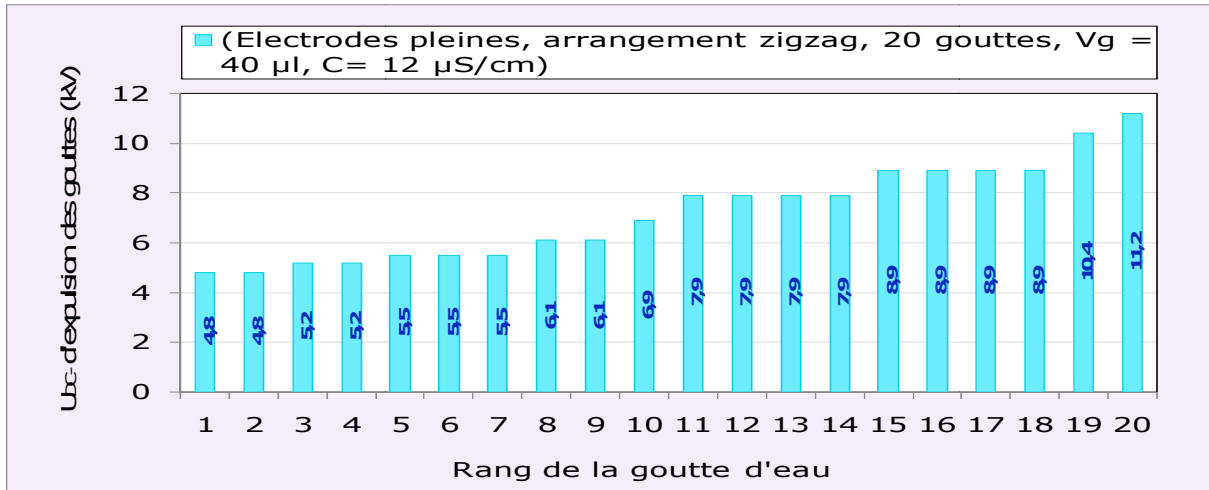


Fig. V. 35: Tension continue négative d'expulsion des gouttes recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en utilisant des électrodes pleines

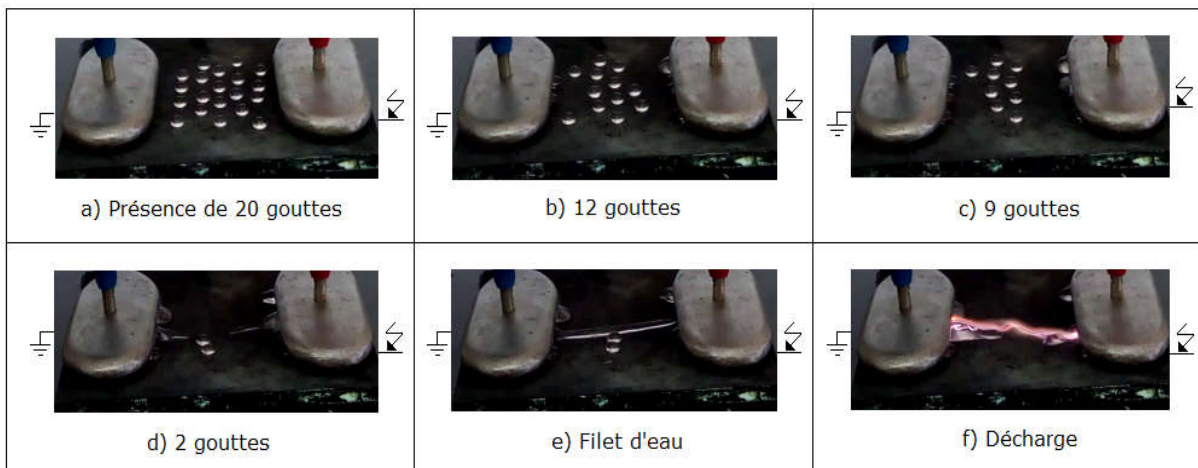


Fig. V. 36: Etape d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe, avec apparition d'un filet d'eau suivi d'une décharge

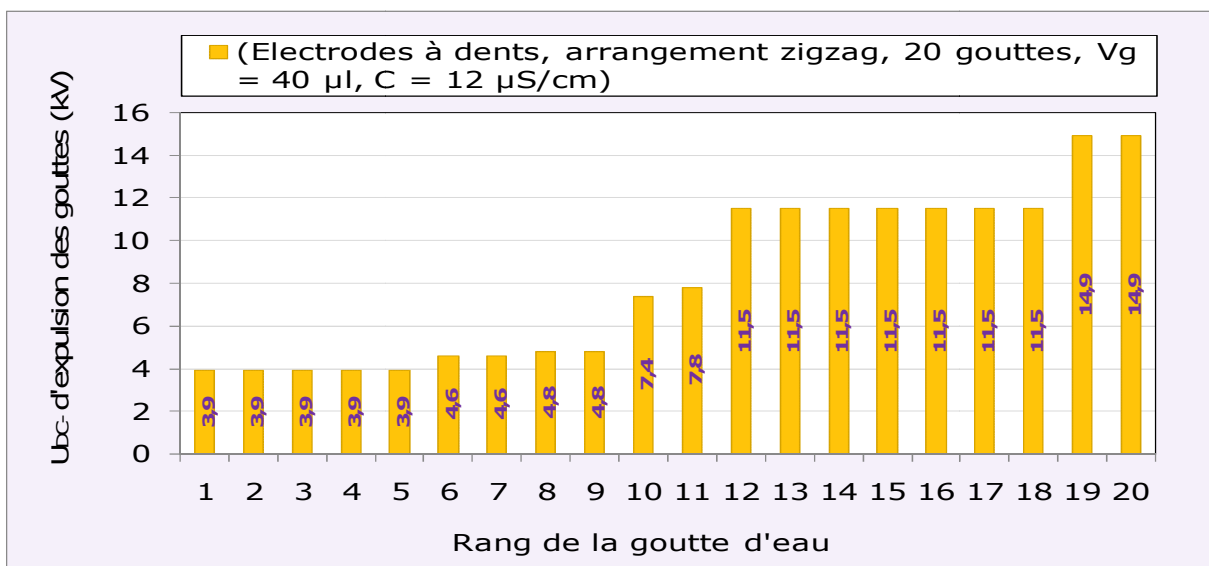


Fig. V. 37: Tension continue négative d'expulsion des gouttes recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en utilisant des électrodes à dents

Les figures V. 35 et V. 37 et V. 39 représentent la tension continue négative d'expulsion des gouttes recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en utilisant des électrodes pleines, à dents et a pont respectivement.

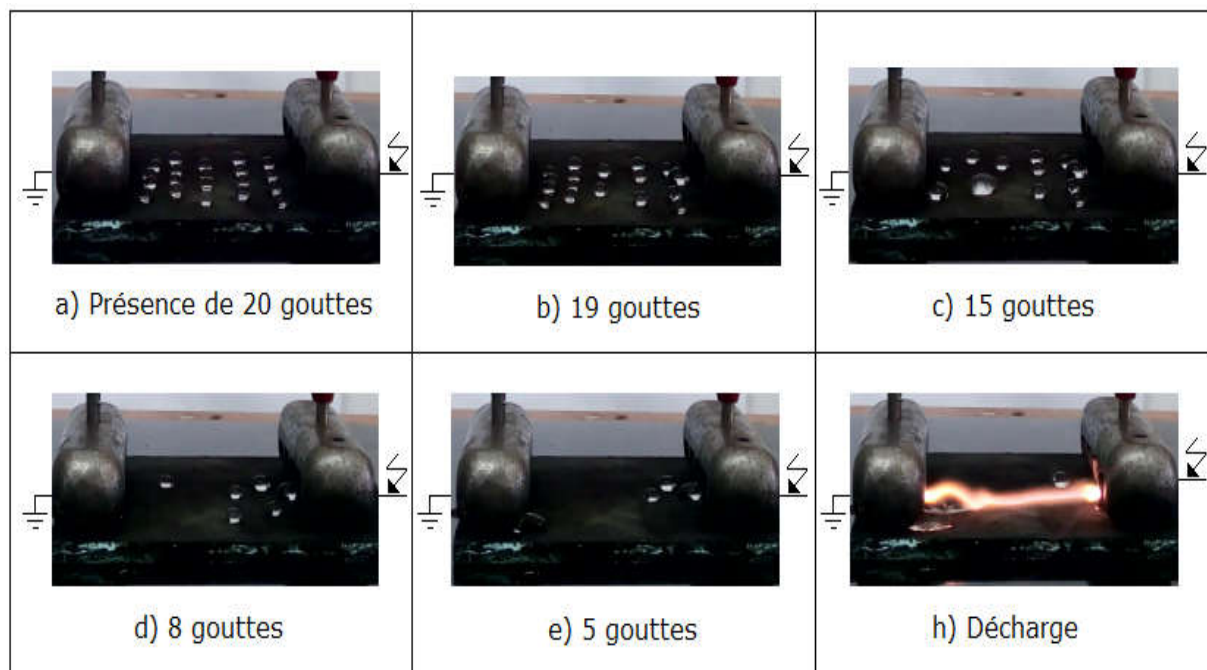


Fig. V. 38: Etape d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe, avec apparition d'une décharge

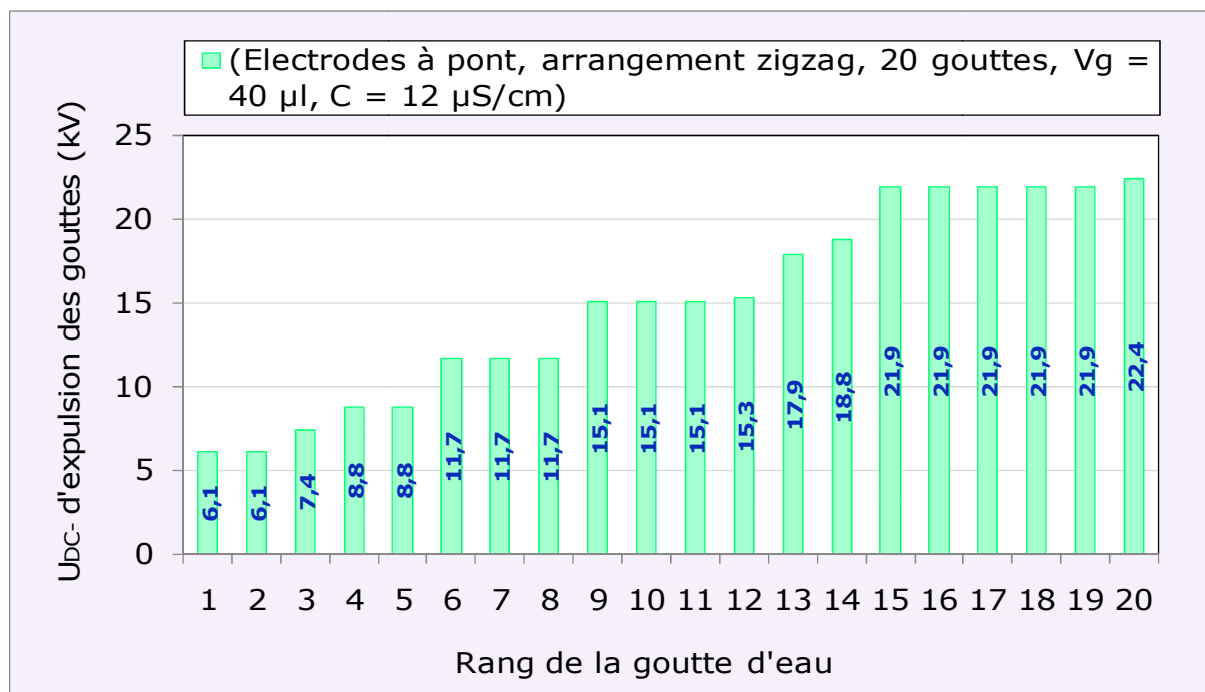


Fig. V. 39: Tension continue négative d'expulsion des gouttes recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en utilisant des électrodes à pont

V.4 Conclusion

Ce travail nous a permis tout d'abord de saisir le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative.

Les résultats essentiels émanant de cette analyse peuvent être résumés comme suit :

- Croissance de la tension d'expulsion d'une goutte d'eau lorsque sa position passe de l'électrode haute tension vers celle mise à la terre;
- Légère augmentation de la tension d'évacuation de la dernière goutte jusqu'à la troisième rangée et au-delà de laquelle elle devient constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées;
- La tension d'évacuation des gouttes est plus grande sous un arrangement en lignes droites qu'en zigzag;
- La conductivité n'influe pas sur la tension d'expulsion des gouttes
- L'élévation de la masse de kaolin ajoutée à la goutte d'eau entraîne la réduction de la superhydrophobie de l'isolation mais au delà d'une certaine limite, cet effet n'a plus de sens et la tension d'expulsion des gouttes est seulement de 46% de la tension de contournement de l'isolation.
- Sous tension continue négative, les électrodes à ponts présente un meilleur profil que celle pleines et a dents vu que les décharges électriques apparaissent très rarement.

L'étude de l'impact du dépôt de gouttes d'eau sur une surface superhydrophobe confectionnée à base de silicone sous tension continue négative en fonction de certains paramètres géométriques et électriques a mené aux résultats essentiels suivants:

-La tension de contournement devient plus importante en absence de gouttes d'eau sur l'isolation.

-Quels que soient le nombre de gouttes déposé sur la surface superhydrophobe considérée, le nombre de rangées, les types de leur arrangement, leur volume, leur conductivité électrique, la masse du kaolin ajoutée, ces perles d'eau quittent cette surface soit par groupe, individuellement ou groupo-individuelle, dans le cas le plus défavorable à une tension égale à 46 % de la tension de contournement de la même isolation sous atmosphère sèche.

Concernant le nombre de gouttes d'eau, celui-ci fait croître la tension d'évacuation. En ce qui concerne le nombre de rangées, il existe une limite au-delà de laquelle la tension d'expulsion des gouttes demeure constante indépendamment du nombre de gouttes ajoutées.

-La tension d'évacuation sous arrangement en lignes droites est plus élevée qu'en zigzag.

-Un petit volume d'eau nécessite une tension d'expulsion plus grande.

- La conductivité électrique des gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur la tension de leur évacuation.

-Il existe une valeur limite au-delà de laquelle elle demeure constante quelle que soit la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau.

- Un profil d'électrodes a été conçu et réalisé de telle sorte qu'aucune goutte expulsée par la surface superhydrophobe ne puisse s'attacher à celle-ci, lorsque l'isolation est mise sous tension proche de la tension de contournement de celle-ci. Cependant la tension d'expulsion dans ce cas de figure est plus grande que celle où les électrodes sont à dents ou pleines.

- [1] «Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces», Neinhuis, C. Barthlott, W., *Ann. Botan.* (1997), 79, 667-677.
- [2] T. Young, “An essay on the cohesion of fluids,” *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 95, pp. 65–87, 1805.
- [3] D. Quéré, “Lois du mouillage et de l’imprégnation,” *Tech. Ing.*, vol. Principe de formulation, no j2140, 2003.
- [4] G. Béranger and H. Mazille, “Approche scientifique des surfaces. Caractérisation et propriétés,” *Tech. Ing.* vol. Traitement de surface des matériaux : contexte et gestion environnementale, no. M1425, 2005.
- [5] R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water,” *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, no. 8, pp. 988–994, 1936.
- [6] «Wettability of porous surfaces», Cassie, A. B. D. Baxter, S. *Trans. Faraday Soc.* (1944), 40, 546-51.
- [7] Emmanuelle Guerret Elina Moncada-Potignon Professeur encadrant : M. Merilhou Lycée Clément Marot CAHORS, “Super-hydrophobie”, Olympiades de physique 2014-2015, pp .15-16.
- [8] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrophile>.
- [9] Sanjay S. Latthe, Chiaki Terashima, Kazuya Nakata and Akira Fujishima * Superhydrophobic Surfaces Developed by Mimicking Hierarchical Surface Morphology of Lotus Leaf, *Molecules* 2014, 19, 4256-4283; doi: 10.3390/molecules19044256, pp. 4256-4283.
- [10] http://www.mineralogie.fr/Structure_Matiere.html
- [11] IEEE Std 957«IEEE guide for cleaning isolators», 1995
- [12] <http://hydrophobie.moonfruit.fr/superhydrophobie-naturelle/4422516>
- [13] X. GAO and L. Jiang. Water-repellent legs of water striders. *Nature*, 432:36, 2004.
- [14] Xuefeng Gao, Xin Yan, Xi Yao, Liang Xu, Kai Zhang, Junhu Zhang, Bai Yang, and Lei Jiang. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. *Advanced Materials*, 19(17):2213–2217, 2007.
- [15] Jari Malm, Elina Sahramo, Maarit Karppinen, and Robin H. a. Ras. Photo-Controlled Wettability. Switching by Conformal Coating of Nanoscale Topographies with Ultrathin Oxide Films. *Chemistry of Materials*, 22(11):3349–3352, June 2010.
- [16] H.J. Gao, X. Wang, H.M Yao, S. Gorb, E. Arzt , *Mater*, 2005, 37 , 275-85.

- [17] K. Liu, et al. *Nanoscale* 4 (3) (2012) 768.
- [18] Y. Cai, et al. *Adv. Funct. Mater.* 24 (6) (2014) 809.
- [19] <http://physique.unice.fr/sem6/20142015/PagesWeb/PT/Monomere/page3.html>
- [20] Dossier olympiades de la physique 2006'' expériences autour de la goutte''
- [21] W. Barthlott and C. Neinhuis. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 202:1–8, 1997.
- [22] Zdenek Cerman, Boris F Striffler, and Wilhelm Barthlott. Dry in the water: the superhydrophobic water fern salvinia—a model for biomimetic surfaces. In *Functional surfaces in biology*, pages 97–111. Springer, 2009.
- [23] Wilhelm Barthlott, Thomas Schimmel, Sabine Wiersch, Kerstin Koch, Martin Brede, Matthias Barczewski, Stefan Walheim, Aaron Weis, Anke Kaltenmaier, Alfred Leder, et al. The salvinia paradox: superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water. *Advanced Materials*, 22(21):2325–2328, 2010.
- [24] M.A.Samaha, M.Gad-el-Hak, “Polymeric Slippery Coatings: Nature and Applications” *Polymers* 2014, 6, pp.1266-1311.
- [25] «Thermal effect on superhydrophobic performance of stearic acid modified ZnO nanotowers», Saleema, N. Farzaneh, M., *AppL Surf. Sci.* (2007), 254, 6.
- [26] «One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings», Sarkar, D.K. Saleema, N., *Surf.Coat. Technol.* (2010), 204, 2483-2486.
- [27] «Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces», Sarkar, D.K.; Farzaneh, M.; Paynter, R.W., *Mater. Lett* (2008), 62, 1226-1229.
- [28] «Superhydrophobic wind turbine blade surfaces obtained by a simple deposition of silica nanoparticles embedded in epoxy», Karmouch, R. Ross, G.G., *AppL Surf Sci.* (2010), 257, 665-669.
- [29] A. Kuechler, “Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen”, 3^{ème} édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [30] «Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests», Lau, K.K.S.; Bico, J.; Teo, K.B.K.; Chhowalla, M.; Amaratunga, G.A.J.; Milne, W.I.; McKinley, G.H. ; Gleason, K.K., *Nano Lett.* (2003), 3, 1701-1705.
- [31] «A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces», Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Mater. Lett.* (2010), 64, 2722-2724.

- [32] «Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces», Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H. ; Lee, Y.K., *TRANSDUCERS 2009 - 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (2009), 441-444.
- [33] «Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface», Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R. ; Kim, W.D., *Chinese Science Bulletin* (2009), 54, 3613-3616.
- [34] <https://www.industrie-techno.com/du-beton-intelligent-qui-dure-plus-d-un-siecle.29538>
- [35] <http://ultraeverdry-tap.com/>.
- [36] STO, | Façades | Revêtements de façade |, Rev.nr. 02/08.2013 Printed in Belgium.
- [37] J.D. Brassard, “revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d’application en aérodynamique”, mémoire (M. Sc. A.), université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2011.
- [38] F. Bouchelga, R. Boudissa, “Effect of the Development of Electrical Parallel Discharges on Performance of Polluted Insulators under DC Voltage”, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 22, N°. 4, 2015.
- [39] F. Bouchelga, R. Boudissa, T. Boughani, “Effet des décharges électriques parallèles sur la performance d’une isolation en verre non uniformément pollué sous tension continue”, Conférence SFE2016, Université de Poitiers, France, 2016.
- [40] R. Boudissa and F. Bouchelga, “Recherche d’une inclinaison appropriée à la performance électrique optimale d’une isolation en silicone recouverte de gouttes d’eau disposées en zigzag sous DC”, *IEEE*, 2017.
- [41] A. Mekhaldi, "Etude du développement d’un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Thèse de Magister, Génie électrique, ENP 1990.
- [42] W. Heise, G. F Luxa, G. Revrery et M. P. Verma, "Estimation de la méthode d’essais sous pollution artificielle par couche solide", CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [43] D. Namane, "Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d’isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Février 1998.
- [44] N. Lahoud, "Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique application à la fiabilité des matériaux». Thèse de doctorat de l’université Toulouse III – Paul Sabatier. Mars 2009.

- [45] E. Aubert, "Diagnostic optique du vieillissement électrique des résines époxydes sous faible champ électrique". Thèse de doctorat de l'université Toulouse III – Paul Sabatier, novembre 2008.
- [46] A. Cimador, S. Vitet, "La pollution des isolateurs", EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [47] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. D. Deut. Akad, 1990.
- [48] Massioune, Tharounsaid, "Caractérisation des décharges électriques évoluant dans l'intervalle d'air pointe-barrière diélectrique polluée-pointe sous tension continue négative", PFE Master THT, U. A. M. Bejaïa 2015.
- [49] M. Tegar, "Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques". Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, 2003.
- [50] C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. Swift C.E.G.B " Contournement des polymères humides et pollués l'ailette Booster", *CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France*, 1978.
- [51] H. Streubel, "The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators" 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10, Athens, Greece, 5-9 September 1983.
- [52] A. Boubakeur, "Essais d'isolateurs pollués dans les conditions naturelles", rapport interne, I. W. N, Politeknika, Varsovie 1978.
- [53] Bouziane Fatima Zohra « rétro-conception du bras horizontal de robot manipulateur de la cellule flexible (tlemcen) », université abou bekr belkaid-tlemcen option ingénierie des systèmes mécaniques productiques, (2013).
- [54] Histoire des robots, LGF, 1997. Tolbiac – Rez-de-jardin – magasin – [16 D4 MON-4989]
- [55] Robotic, Staubli, 5875-la-robotique-industrielle-eduscol-2015_0.
- [56] SAADI RAMZY, SALHI NASSEREDDINE, « Réalisation de carte à microcontrôleur pour le contrôle de bras manipulateur via un pc », Université Mohamed Khider Biskra Option micro informatique et instrumentation, (2010).
- [57] CHAAL Merouane, « Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaîne continue ouverte », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Option Maintenance Industrielle, (2013).
- [58] INTEGRA Biosciences-2 Wentworth Drive, Hudson, New Hampshire, 900-00002-00_V05, USA-April 5, 2013.

[59] IDDIR Hayet, « ETUDE ET REALISATION D'UN KIT ELECTRONIQUE DU TYPE SYSTEME EMBARQUE A BASE DE MICROCONTROLEUR APPLICATION AU CONTROLE D'UN BRAS DE ROBOT A 4 DEGRES DE LIBERTES », Université M'Hamed BOGUERRA, Boumerdes Option Commande des Procédés Industriels, (2013).

[60] IEC 62271-304, "Technical Specification of design classes of indoor enclosed switchgear and controlgear from 1 kV and up to and including 52 kV to be used in severe climatic condition", High Voltage Switchgear and Controlgear-PART 304.

[61] IEC (60060-1), "High Voltage test techniques", part 1: General definitions and test requirements, 1991.

L'objectif recherché à travers notre présent travail consiste en la confection de surfaces isolantes superhydrophobes et d'un dispositif semi-automatique de dépôt de gouttes d'eau sur de telles isolations afin d'étudier leur comportement électrique sous tension continue négative. A cet effet, l'influence de certains paramètres géométriques (volume, nombre de rangées, type d'arrangement, masse du kaolin ajoutée) et électriques (conductivité électrique) de gouttes d'eau sur la tension de leur expulsion de ladite surface a été quantifiée.

Un profil d'électrodes (pleines, à dents et à pont) a été conçu et réalisé de telle sorte qu'aucune goutte expulsée par la surface superhydrophobe ne puisse s'attacher à celle-ci, lorsque l'isolation est mise sous tension proche de la tension de contournement de celle-ci. Cependant la tension d'expulsion dans ce cas de figure est plus grande que celle où les électrodes sont à dents ou pleines.

Les résultats émanant de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- Une goutte d'eau de faible volume nécessite une tension d'expulsion plus grande,
- En ce qui concerne le nombre de rangées, il existe une limite au-delà de laquelle la tension d'évacuation des gouttes demeure constante indépendamment du nombre de gouttes ajoutées,
- La tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe est plus élevée sous arrangement en lignes droites qu'en zigzag,
- Il existe une valeur limite au-delà de laquelle la tension d'évacuation des gouttes d'eau demeure constante quelle que soit la masse du kaolin ajoutée à celles-ci,
- La conductivité électrique des gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur la tension de leur évacuation.

Mots clés : Superhydrophobe, isolation, tension d'expulsion, tension de contournement.