

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique
Université A/Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

Présenté par :

M^{elle} : IOUKNANE Souhila

M^{elle} : MEZIANE Celya

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique
Option: Réseaux Electriques

Thème

Effet des paramètres électrogeométriques des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension continue négative

Soutenu publiquement le 24 juin 2019 devant le jury composé de

Mr Y.ZEBOUDJ	Professeur	U.A.M.Bejaia	Président
Mr B.YAHYAOUI	MCB	U.A.M.Bejaia	Examineur
Mr R. BOUDISSA	Professeur	U.A.M.Bejaia	Rapporteur
Mr K. HAMOUR	MAA	U.A.M.Bejaia	Co-Rapporteur

Année Universitaire : 2018/2019



Remerciement

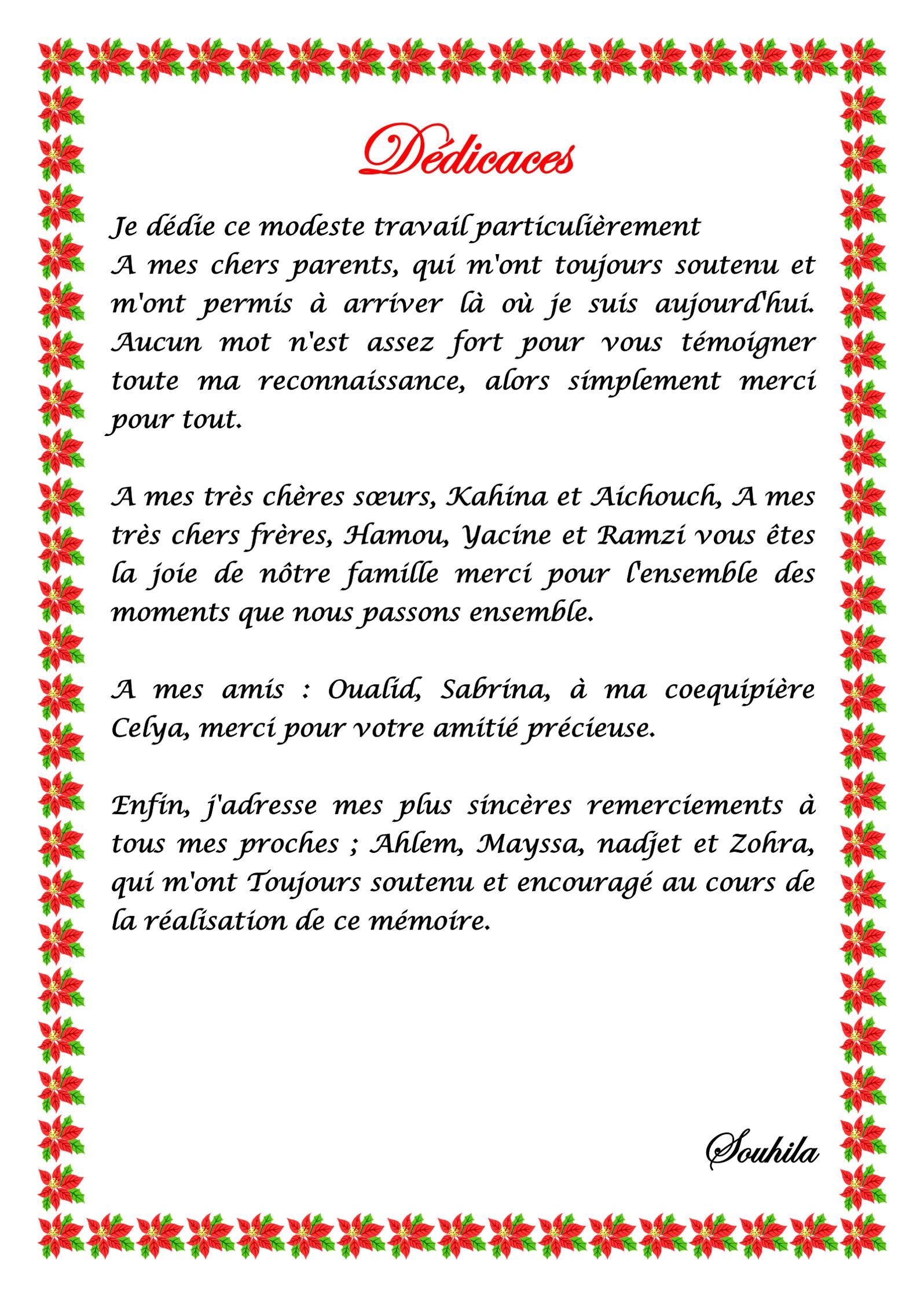
Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à Messieurs R.Boudissa et K.Hamour pour leur suivi quotidien, leur disponibilité, leurs critiques, conseils précieux et encouragements qui ont contribué à mener à bien notre travail.

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

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

Merci à tous.



Dédicaces

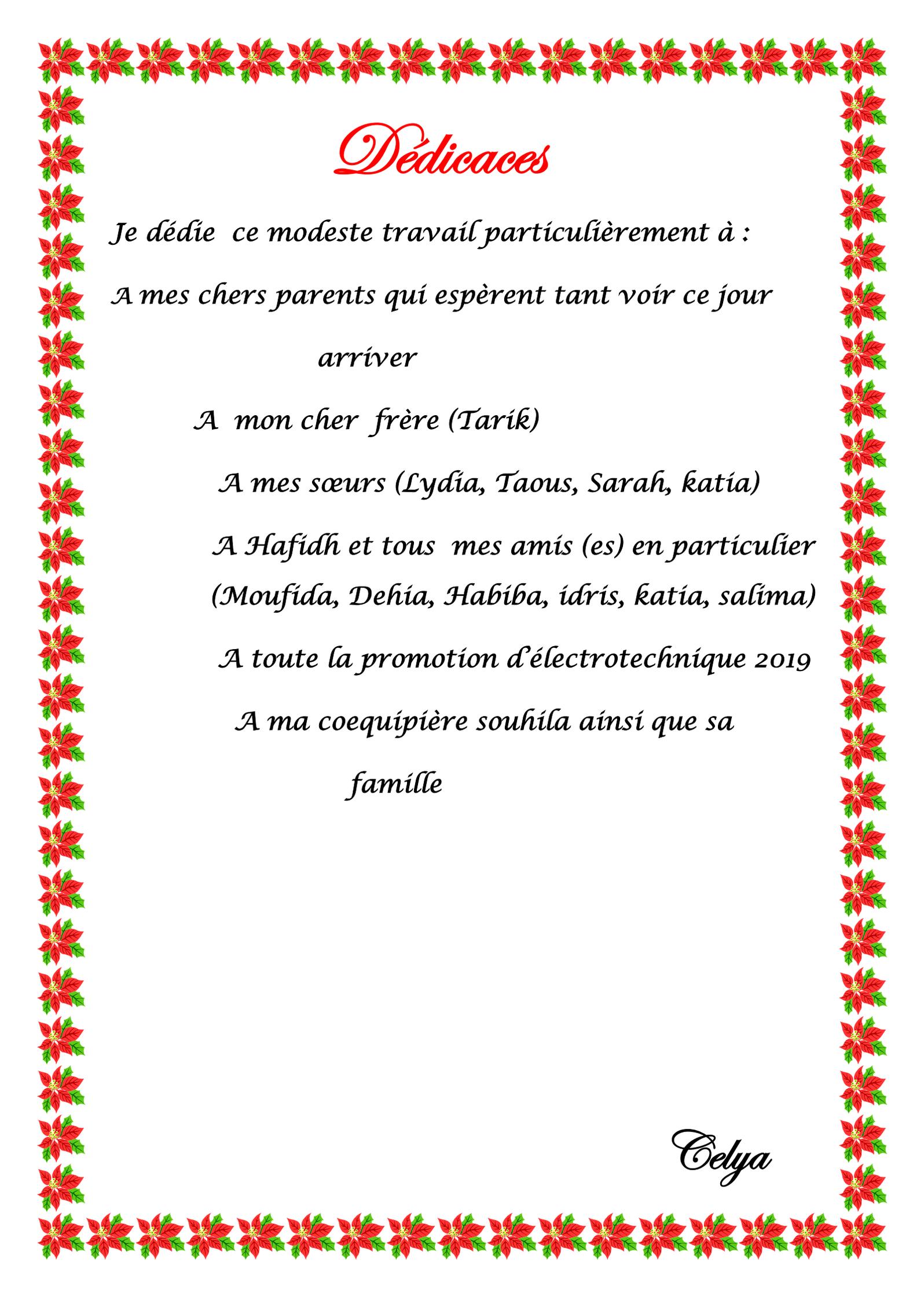
*Je dédie ce modeste travail particulièrement
A mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu et
m'ont permis à arriver là où je suis aujourd'hui.
Aucun mot n'est assez fort pour vous témoigner
toute ma reconnaissance, alors simplement merci
pour tout.*

*A mes très chères sœurs, Kahina et Aïchouch, A mes
très chers frères, Hamou, Yacine et Ramzi vous êtes
la joie de notre famille merci pour l'ensemble des
moments que nous passons ensemble.*

*A mes amis : Oualid, Sabrina, à ma coéquipière
Celya, merci pour votre amitié précieuse.*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à
tous mes proches ; Ahlem, Mayssa, nadjet et Zohra,
qui m'ont Toujours soutenu et encouragé au cours de
la réalisation de ce mémoire.*

Souhila



Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail particulièrement à :
A mes chers parents qui espèrent tant voir ce jour
arriver*

A mon cher frère (Tarik)

A mes sœurs (Lydia, Taous, Sarah, Katia)

*A Hafidh et tous mes amis (es) en particulier
(Moufida, Dehia, Habiba, Idris, Katia, Salima)*

A toute la promotion d'électrotechnique 2019

*A ma coéquipière Souhila ainsi que sa
famille*

Belya

I. 1 Introduction	1
I. 2 Définitions	1
I. 2. 1 Mouillabilité.....	1
I. 2. 2 Angle de contact	1
I.2.2.1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact.....	1
I. 2. 2. 1. 1 Effet Wenzel	3
I. 2. 2. 1. 2 Effet Cassis	4
I. 2. 3 Surface superhydrophile	4
I. 2. 4 Surface hydrophile	5
I. 2. 5 Non mouillabilité	5
I. 2. 5. 1 Surface hydrophobe	5
I. 2. 5. 2 Surface Superhydrophobe	5
I. 3 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles.....	5
I. 3. 1 Surfaces superhydrophobes naturelles	6
I. 3. 1. 1 Insectes.....	6
I. 3. 1. 2 Animaux	7
I. 3. 1. 3Végétaux.....	8
I. 3. 2 Matériaux superhydrophobes artificiels.....	9
I. 3. 2. 1 Nano tours d'oxyde de zinc sur silicium	9
I. 3. 2. 2 Film d'argent sur du cuivre	10
I. 3. 2. 3 Gravure chimique de l'aluminium.....	10
I. 3. 2. 4 Nanoparticules de silice dans une matrice d'époxy	10
I. 4 Propriétés électriques.....	11
I. 4. 1 Permittivité.....	11
I. 4. 2 Rigidité diélectrique.....	11
I. 4. 3 Résistance d'isolement.....	12
I. 4. 4 Facteur de pertes	13
I. 5 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes.....	13
I. 5. 1 Dépôt par vapeur chimique	13
I. 5. 2 Dépôt électrochimique	13
I. 5. 3 Photolithographie	13
I. 5. 4 Techniques utilisant le plasma	14
I. 6 Applications.....	14

I. 6. 1 Béton intelligent.....	14
I. 6. 2 Ultra - Ever Dry	14
I.7 Travaux antérieures récents sur la Performance électrique des isolations superhydrophobe.....	14
I.8. Conclusion	21
II. 1 Introduction	22
II. 2 Définitions.....	22
II. 2. 1 Pollution.....	22
II. 2. 2 Couche de pollution.....	22
II. 2. 3 Degré de pollution	22
II. 2. 4 Salinité (Sa)	22
II. 3 Sources de pollution	23
II. 3. 1 Pollution naturelle.....	23
II. 3. 1. 1 Pollution marine	23
II. 3. 1. 2 Pollution désertique.....	23
II. 3. 1. 3 Autre type de pollution naturelle	23
II. 3. 2 Pollution industrielle.....	23
II. 3. 3 Pollution mixte	23
II. 4 Sévérité de pollution d'un site.....	24
II. 4. 1 Densité du dépôt non soluble (DDNS).....	24
II. 4. 2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)	25
II. 4. 3 Conductance superficielle.....	25
II. 4. 4 Mesure de la pollution de l'air.....	26
II. 4. 5 Mesures optiques	26
II. 4. 6 Contrainte de contournement.....	26
II. 5 Influence des facteurs climatiques sur la tenue électrique des isolateurs.....	26
II. 5. 1 Humidité	26
II. 5. 2 Pluie	26
II. 5. 3 Température.....	27
II. 5. 4 Vent	27
II. 6 Classification des niveaux de pollution.....	27
II. 6. 1 Pollution légère ($\sigma_v = 5 \mu\text{S/cm}$).....	27
II. 6. 2 Pollution moyenne ($\sigma_v = 10 \text{ à } 15 \mu\text{S/cm}$).....	27

II. 6. 3 Pollution forte ($\sigma_v = 15$ à $30 \mu\text{S/cm}$)	27
II. 6. 4 Pollution très forte ($\sigma_v = 30$ à $50 \mu\text{S/cm}$)	28
II. 7 Formation et répartition de la couche de pollution	28
II. 7. 1 Non-uniformité longitudinale par groupes	28
II. 7. 2 Non-uniformité transversale	29
II. 7. 3 Non-uniformité longitudinale périodique	29
II. 8 Conséquences de la pollution sur les isolateurs	29
II. 8. 1 Arc non localisé	29
II. 8. 2 Arc fixe	29
II. 8. 3 Contournement des isolateurs pollués	29
II. 9 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe	30
II. 9. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale	30
II. 10 Simulation de la pollution au laboratoire	32
II. 10. 1 Essais sous pollution artificielle	32
II. 10. 1. 1 Méthode de la couche solide	32
II. 10. 1. 2 Méthode du brouillard salin	32
II. 10. 1. 3 Méthode de pollution liquide	32
II. 11 Techniques de lutte contre la pollution	33
II. 11. 1 Allongement de la ligne de fuite	33
II. 11. 2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)	33
II. 11. 3 Graissage périodique des isolateurs	33
II. 11. 4 Revêtements à base de silicones	33
II. 11. 5 Utilisations des isolateurs composites	33
II. 11. 6 Nettoyage des isolateurs	34
II. 12 Conclusion	34
III. 1 Introduction	35
III. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure	35
III. 2. 1 Modèle expérimental	35
III. 2. 2 Fabrication d'une isolation à surface superhydrophobe isolante	36
III. 2. 3 Volume des gouttes d'eau et leur angle de contact	37
III. 2. 4 Nombre de rangées de gouttes d'eau et leur arrangement sur l'isolation	39
III. 2. 5 Volume des gouttes d'eau et leur position	41

III. 2. 6	Conductivité des gouttes d'eau et concentration en kaolin de la solution.....	41
III. 2. 7	Mesure de tension d'évacuation de gouttes d'eau.....	42
III. 3	Résultats et leur interprétation	43
III. 3. 1	Mode d'éjection des gouttes d'eau en dehors de l'isolation	43
III. 3. 2	Nombre de rangées de gouttes d'eau et leur localisation sur l'isolation.....	49
III. 3. 3	Volume des gouttes d'eau d'une rangée et son emplacement sur l'isolation...	52
III. 3. 4	Conductivité électrique des gouttes d'eau et leur position sur l'isolation.....	54
III. 3. 5	Concentration en kaolin de la solution polluante	58
III. 4	Conclusion	63

Liste des figures et tableaux

A) Liste des figures

Chapitre I: Surfaces isolantes superhydrophobes et travaux antérieurs sur leur performance électrique sous tension continue négative

Fig. I. 1: Représentation schématique d'une goutte d'eau sur un solide avec l'angle de contact associé.....	1
Fig. I. 2: Comportement d'une goutte sur une surface	2
Fig. I. 3: Représentation de l'angle de contact et des tensions de surface.....	3
Fig. I. 4: Représentation d'une goutte d'eau sur une surface solide inclinée d'un angle (A) avant son glissement.....	3
Fig. I. 5: Modèle de surfaces superhydrophobes. (a) Modèle de Wenzel, (b) Modèle de Cassie	4
Fig. I. 6: Goutte d'eau sur une surface hydrophile à superhydrophobe.....	5
Fig. I. 7: Gerris sur l'eau.....	6
Fig. I. 8: Images MEB d'un œil de moustique à différents grossissements	6
Fig. I. 9: Libellule (a: ailes de libellule, b: images SEM d'une aile de libellule).....	7
Fig. I. 10: Gecko (A : Photo du gecko, B: pattes du gecko, C, D: Nanostructure de sa peau).....	7
Fig. I. 11: A, B : Peau d'un requin. C, D : Vue macroscopique d'écailles d'un requin	7
Fig. I. 12: Canard sur l'eau et goutte d'eau sur sa plume	8
Fig. I. 13: Feuille de Lotus	8
Fig. I. 14: Plantes notre Dame et Népenthe	9
Fig. I. 15: Films de ZnO sur silicium et d'argent sur du cuivre	10
Fig. I. 16: Aluminium avec et sans gravure chimique et de la silice dans une matrice d'époxy	11
Fig. I. 17: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension	11
Fig. I. 18: Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)	12
Fig. I. 19: Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique	12
Fig. I. 20: Circuit électrique équivalent série et parallèle.....	13
Fig. I. 21: Béton intelligent et bottes sans et avec traitement ultra-ever dry	14
Fig. I. 22: Principales étapes de préparation d'une surface en verre superhydrophobe	15
Fig. I. 23: Systèmes d'électrodes utilisées.....	15
Fig. I. 24: Mesure du volume d'une goutte d'eau avec Micropipette (5 à 100µl) et son angle de contact.....	16
Fig. I. 25: Types d'arrangements de gouttes d'eau en zigzag et en lignes droites	17

Fig. I. 26: Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes	17
Fig. I. 27: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe selon un arrangement en lignes droites	18
Fig. I. 28: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur volume.....	19
Fig. I. 29: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité.....	19
Fig. I. 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	20
Fig. I. 31: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur arrangement.....	20
Fig. I. 32: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de géométrie des électrodes	21

Chapitre II : Pollution des isolations superhydrophobes

Fig. II. 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS.....	25
Fig. II. 2: Expulsion partielle des gouttes d'eau de la surface de l'isolation à électrodes pleines et contournement de celle-ci ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $m_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$).....	30
Fig. II. 3: Evacuation partielle des gouttes d'eau de la surface de l'isolation sous électrodes à dents et contournement de celle-ci ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $C_k = 40 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$)	31
Fig. II. 4: Ejection complète des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation sous électrodes à pont ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $C_k = 40 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$)	31

Chapitre III: Expérimentation sur la performance des surfaces superhydrophobes sous tension continue négative

Fig. III. 1: Caractéristiques du modèle expérimental.....	36
Fig. III. 2: Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe	37
Fig. III. 3: Dessiccateur, balance électronique et conductimètre à sonde mobile.....	37
Fig. III. 4: Mesure de volume d'une goutte d'eau avec micropipette (5 à 100 μl) et son angle de contact.....	38

Fig. III. 5: Tension d'évacuation d'une rangée de 5 gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation (3 gouttes vers HT, 2 gouttes vers la terre)	39
Fig. III. 6: Emplacement du nombre de rangées en zigzag sur la surface de l'isolation.....	40
Fig. III. 7: Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à volume variable	41
Fig. III. 8: Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à conductivité variable	41
Fig. III. 9: Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à concentration en kaolin variable	42
Fig. III. 10: Arrangement de 5 rangées x 5 gouttes en lignes droites sur la surface de l'isolation ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $\sigma_v = 50 \mu\text{l}$ et $C_k = 0 \text{ g/l}$).....	42
Fig. III. 11: Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes	43
Fig. III. 12: Etapes essentielles d'éjection grupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites sans couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$).....	44
Fig. III. 13: $U_{DC} = f(N_d)$ pour un arrangement en lignes droites de 5 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$).....	45
Fig. III. 14: Etapes essentielles d'éjection grupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites avec couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$).....	46
Fig. III. 15: $U_{DC} = f(N_d)$ pour un arrangement en lignes droites de 5 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe avec couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$)	47
Fig. III. 16: Phases essentielles d'expulsion de 25 gouttes d'eau sous arrangement en lignes zigzag sans couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$)	47
Fig. III. 17: $U_{DC} = f(N_d)$ pour un arrangement en zigzag de 25 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$)	48
Fig. III. 18: Tension d'expulsion des gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites en fonction de leur position et de degré de couverture (A_d : arrangement en lignes droites)	48
Fig. III. 19: Tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction de leur position et du leur mode d'arrangement (A_z : arrangement en zigzag).....	49

Fig. III. 20: Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation (3 gouttes vers la terre, 2 gouttes vers HT)	50
Fig. III. 21: Tension d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation (HT: haute tension, T: terre, IHT: intermédiaire de haute tension, IT: intermédiaire de terre).....	50
Fig. III. 22: Tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction du nombre de rangées sous arrangement en zigzag.....	51
Fig. III. 23: Tension d'expulsion de la dernière goutte d'eau d'une rangée droite en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation.....	52
Fig. III. 24: Tension d'expulsion de la dernière goutte d'eau sous arrangement zigzag sans couvert en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation.....	52
Fig. III. 25: Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur volume et position sur l'isolation	53
Fig. III. 26: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté terre ($V_d = 10 \mu\text{l}$)	53
Fig. III. 27: Phases d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté HT ($V_d = 10 \mu\text{l}$)	54
Fig. III. 28: Etapes d'évacuation de 5 gouttes au milieu de l'isolation sans couvert ($V_d = 10 \mu\text{l}$).....	54
Fig. III. 29: Principales étapes d'évacuation d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite avec couvert ($V_d = 10 \mu\text{l}$)	54
Fig. III. 30: Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de ligne de fuite de l'isolation sans couvert ($V_d = 80 \mu\text{l}$).....	54
Fig. III. 31: $U_e = f(\sigma_v)$ pour une rangée de 5 gouttes d'eau côté HT.....	55
Fig. III. 32: $U_e = f(\sigma_v)$ pour une rangée de 5 gouttes d'eau côté terre.....	55
Fig. III. 33: Tension d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau sans couvert au milieu de la ligne de fuite en fonction de leur conductivité et degré de couverture	56
Fig. III. 34: Tension d'éviction d'une rangée de 5 gouttes d'eau avec couvert au milieu de la ligne de fuite en fonction de leur conductivité et degré de couverture	56
Fig. III. 35: Tension d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite en fonction de leur conductivité et position	57
Fig. III. 36: Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté terre sans couvert ($\sigma_v = 0,5 \text{ mS/cm}$)	57
Fig. III. 37: Phases essentielles d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté HT sans couvert ($\sigma_v = 0,5 \text{ mS/cm}$).....	58

Fig. III. 38: Etapes d'éjection de gouttes au milieu de matériau sans couvert ($\sigma_v = 0,5$ mS/cm)	58
Fig. III. 39: Phases d'éviction de gouttes au milieu de matériau avec couvert ($\sigma_v = 0,5$ mS/cm)	58
Fig. III. 40: Phases d'expulsion de 5 gouttes du côté terre sans couvert ($\sigma_v = 20$ mS/cm)	58
Fig. III. 41: Tension d'expulsion des gouttes d'eau du côté HT en fonction de leur concentration en kaolin	59
Fig. III. 42: Tension d'éviction des gouttes d'eau côté terre en fonction de leur concentration en kaolin	59
Fig. III. 43: Tension d'éjection des gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite sans couvert en fonction de leur concentration en kaolin	60
Fig. III. 44: Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée avec couvert au milieu de la ligne de fuite en fonction de leur concentration en kaolin	60
Fig. III. 45: Tension d'évacuation des gouttes d'eau sous d'une rangée droite en fonction de leur masse concentration en kaolin et position.....	61
Fig. III. 46: Phases d'éviction de 5 gouttes d'eau côté terre sans couvert ($C_k = 120$ g/l)	62
Fig. III. 47: Etapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau coté HT sans couvert ($C_k = 120$ g/l).....	62
Fig. III. 48: Principales étapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite sans couvert ($C_k = 120$ g/l).....	62
Fig. III. 49: Phases essentielles d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite avec couvert ($C_k = 120$ g/l)	62
Fig. III. 50: Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau sous arrangement en ligne droite côté HT sans couvert ($C_k = 0$ g/l).....	63

B) Liste des tableaux

Tab. I. 1: Valeurs de la tension de contournement de la surface superhydrophobe isolante sèche en fonction de la nature des électrodes HT et terre	18
Tab. II. 1: Classification des sites pollués selon la DDS	28
Tab. III.1: Tension de contournement à sec de l'isolation superhydrophobe.....	44

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 ($^{\circ}$)

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 ($^{\circ}$)

θ_r : Angle de reculée ($^{\circ}$)

θ_a : Angle d'avancée ($^{\circ}$)

θ^* : Angle de contact avec la rugosité ($^{\circ}$)

θ : Angle de contact sans la rugosité ($^{\circ}$)

φ_s : La fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose

- A: angle de glissement ($^{\circ}$)
- A: Surface lavée de la barrière (mm) [grandeur tirée des travaux antérieurs]
- A_d: Arrangement en lignes droites
- A_z: Arrangement en zigzag
- C: Conductivité électrique de la goutte d'eau (mS/cm)
- Cam : Caméscope
- C_k: Concentration en kaolin (g/l)
- C_L: Capacité longitudinale (F)
- D: Diode
- DDNS: Densité de dépôt non soluble (mg/cm²)
- DDSE: Densité du dépôt de sel équivalent (mg/cm²)
- E_d: Rigidité Diélectrique Transversale (RDT) (V/m)
- E_e: Champ électrique extérieur (V/m)
- e_e: Epaisseur des électrodes (mm)
- E_i: Rigidité Diélectrique longitudinale (RDL) (V/m)
- E_p: Champ électrique propre (V/m)
- G: Conductance superficielle des isolateurs (V/m)
- H_r: Humidité relative (%)
- HT: Haute Tension
- I: Courant total (A)
- I_c: Courant de contournement (A)
- I_d: Courant de perforation (A)
- IHT: Intermédiaire à l'électrode haute tension
- I_s: Courant de surface (A)
- IT: Intermédiaire à l'électrode terre
- I_v: Courant de volume (A)
- L_c: Longueur de la ligne de fuite de l'isolation (cm)
- L_{dd}: Distance entre les centres de deux gouttes d'eau adjacentes (cm)
- L_{dg}: Distance entre une goutte d'eau et l'électrode terre (cm)
- L_{dv}: Distance entre une goutte d'eau et l'électrode sous tension (cm)
- L_e: Longueur des électrodes (mm)
- L_{ge}: Distance entre une goutte d'eau et l'électrode haute tension (cm) [grandeur tirée des travaux antérieurs]

L_{gg} : Distance entre deux gouttes d'eau adjacentes (cm) [grandeur tirée des travaux antérieurs]

L_{gt} : Distance entre une goutte d'eau et l'électrode terre (cm) [grandeur tirée des travaux antérieurs]

l_{rr} : Distance entre les centres de deux rangées adjacentes (cm)

m_f : Masse du papier contenant la pollution après séchage (mg)

m_i : Masse initiale du papier filtre (mg)

N_d : Rang de la goutte d'eau

N_r : Nombre de rangées de gouttes d'eau

P_a : Pression atmosphérique (hPa)

PC: Personal Computer

Q_{ac} : Charges électriques aux armatures (C)

r : Rugosité

R_1/R_2 : Diviseur de tension résistif (Ω)

R_a : Résistance d'affaiblissement de courant (Ω)

R_i : Résistance d'isolement (Ω)

R_s : Résistance superficielle (Ω)

R_v : Résistance transversale (Ω)

S_a : Salinité (g)

S_{sh} : Surface superhydrophobe

T: Position de la goutte d'eau au voisinage de l'électrode terre de la surface superhydrophobe

Θ : Température ($^{\circ}\text{C}$)

Tr: Transformateur

U_a : Tension appliqué (kV)

UC: Unité de commande du transformateur (kV)

U_{DC-} : Tension Continue négative (kV)

U_e : Tension d'expulsion de gouttes d'eau

U_{eDC-} : Tension d'expulsion continue négative

V_d : Volume d'une goutte d'eau (μl)

V_{DC} : Voltmètre de crête (kV)

V_d : Volume de goutte d'eau (μl)

Introduction générale

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie électrique. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisant considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut parfois survenir.

Les chercheurs se sont donc inspiré de la nature et ont fabriqué des surfaces superhydrophobes qui ne se mouillent pas. 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 étude , 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'évacuation des gouttes d'eau en dehors de cette surface d'isolation en fonction des paramètres suivants: nombre de gouttes d'eau, de rangées, types d'arrangement, degré de couverture (sans couvert, avec couvert), géométrie des électrodes, volume, conductivité et concentration en kaolin de la solution.

C'est pour cette raison que nous proposons de subdiviser ce présent travail en trois chapitres. Le premier sera dédié à la caractérisation des surfaces superhydrophobes, la présentation des divers types de matériaux superhydrophobes naturels et artificiels leurs propriétés électriques et spéciales, leurs types et leurs applications, Enfin quelques travaux antérieurs sur la performance électrique des isolations superhydrophobes sous tension continue négative y seront décrits.

Le second chapitre fera l'objet de la caractérisation de la pollution, ses conséquences néfastes sur les équipements électriques et les techniques de lutte contre elle.

Le dernier chapitre, constituant la partie expérimentale la plus importante de notre travail, sera consacré à l'étude de l'évolution de la tension d'expulsion de gouttes d'eau en dehors de l'isolation déposées manuellement sur une surface superhydrophobe conçue et réalisée par nous même en fonction des paramètres électrogéométriques de ces perles d'eau.

Et enfin nous terminerons notre étude par une conclusion générale.

**Chapitre I : Surfaces isolantes
superhydrophobes et travaux antérieurs sur
leur performance électrique sous tension
continue négative**

I.1 Introduction

Le but visé à travers ce premier chapitre est tout d'abord de définir et caractériser la superhydrophobicité, ensuite prendre connaissance des divers types de matériaux superhydrophobes naturels et artificiels et leurs propriétés électriques et spéciales ainsi que leurs domaines d'application. Enfin faire la synthèse de quelques travaux de recherche les plus récents afin de nous situer dans la tâche à accomplir dans le cadre de notre projet de fin d'étude.

I.2 Définitions

I.2.1 Mouillabilité

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[1].

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 entre 0 et 180°, en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

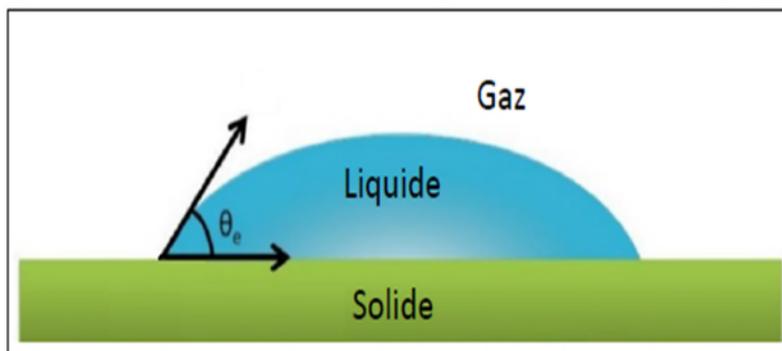


Fig. I. 1: Représentation schématique d'une goutte d'eau sur un solide avec l'angle de contact associé [2]

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. 2a).

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. 2b).

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. 2c).

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. 2d)[1].

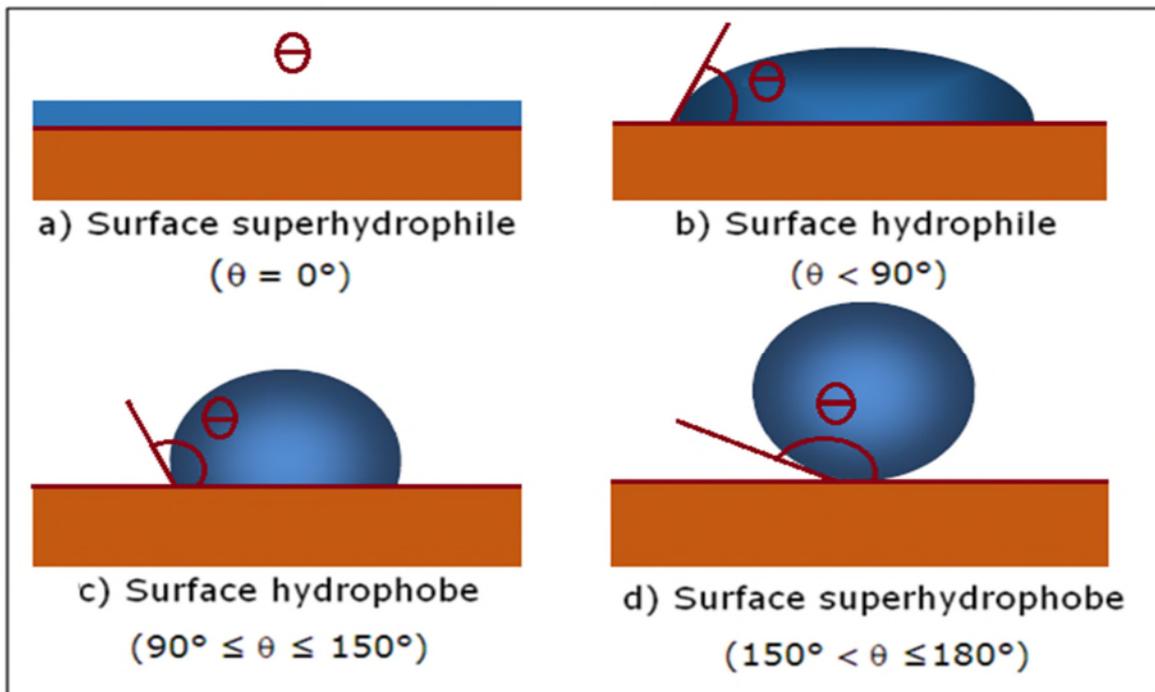


Fig. I.2:Comportement d'une goutte sur une surface [3]

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.

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 comme suit[4]:

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

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

Avec :

: 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 ;

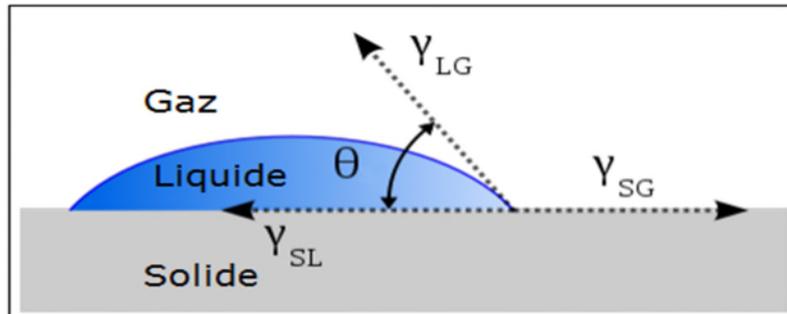


Fig. I. 3: Représentation de l'angle de contact et des tensions de surface[3]

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.4. 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].

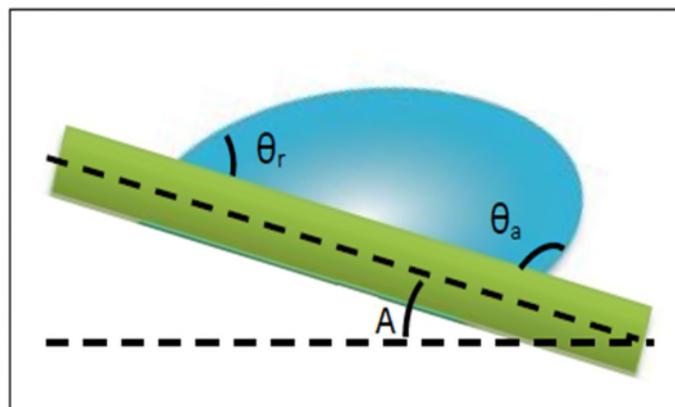


Fig.I. 4:Représentation d'une goutte d'eau sur une surface solide inclinée d'un angle (A) avant son glissement [2]

I.2.2.1.1 Effet Wenzel

En 1936, Wenzel affirme que lorsqu'on pose une goutte d'eau sur une surface présentant une faible densité d'aspérités, elle 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 [5]:

$$\cos \theta^* = r \cos \theta \quad (I. 2)$$

r: La rugosité ($r > 1$) ;

θ : Angle de contact sans la rugosité;

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

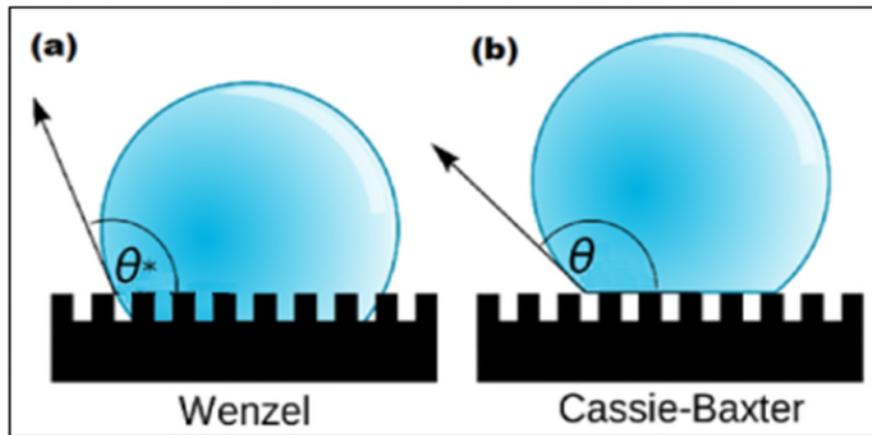


Fig. I. 5:Modèle de surfaces superhydrophobes (a)Modèle de Wenzel, (b)Modèle de Cassie[6]

I.2.2.1.2 Effet Cassis

Huit ans plus tard, contrairement à Wenzel, Cassie 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 [7].

Equation de Cassis est la suivante:

$$\cos \theta^* = \varphi_s \cos \theta - (1 - \varphi_s) \quad (\text{I. 3})$$

Avec :

θ : Angle de contact sans la rugosité;

θ^* : Angle de contact avec la rugosité;

φ_s : 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[8].

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. 6a) [9].

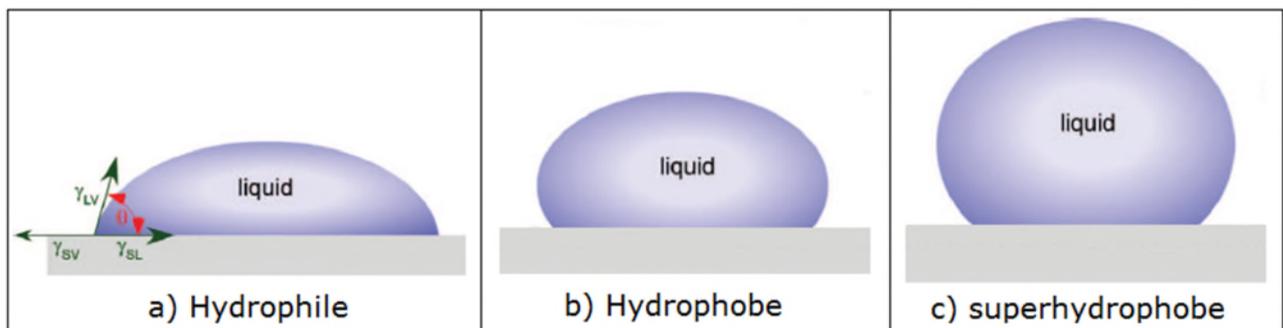


Fig. I. 6:Goutte d'eau sur une surface hydrophile à superhydrophobe[10]

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 [11].

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. 6b) [12].

I.2.5.2 Surface superhydrophobe

Les matériaux superhydrophobes sont une catégorie de 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. 2d et I. 6c) [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° [13].

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

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. 7)[14].

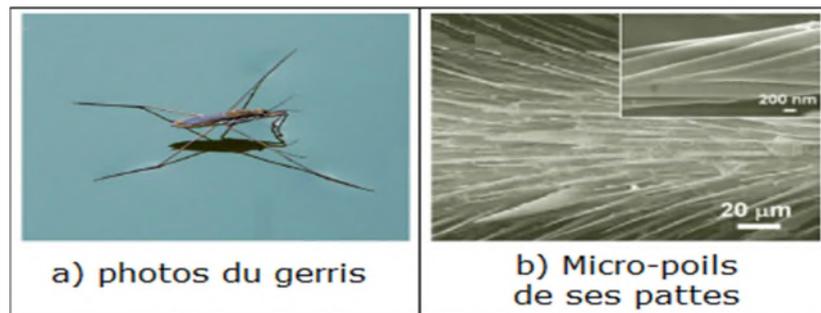


Fig. I. 7:Gerris sur l'eau [15]

b) Moustique

Le moustique possède des yeux superhydrophobes. Des observations au microscope à balayage électronique (MEB:Fig. I. 8a) ont révélé qu'ils étaient dotés de plots, assemblés en réseaux hexagonaux (Fig. I.8b), et eux-mêmes sont recouverts de petits piliers d'une centaine de nanomètres (Fig. I. 8c et I. 8d) [16].

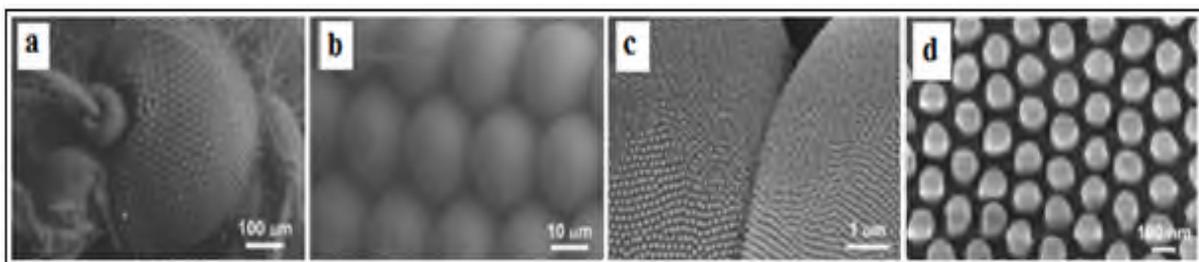


Fig.I.8: Images MEB d'un œil de moustique à différents grossissements (a: vue macroscopique, b: image des micro-plots qui constituent l'œil, c: zoom sur deux micro-plots, eux-mêmes couverts de plus petits plots d'un diamètre de 100 nm.

c) Ailes de libellule

Les ailes de libellule ont des propriétés d'antireflets, grâce à leur structure nanométrique. De plus, les textures sont recouvertes d'une cire qui rend ces ailes superhydrophobes [17].

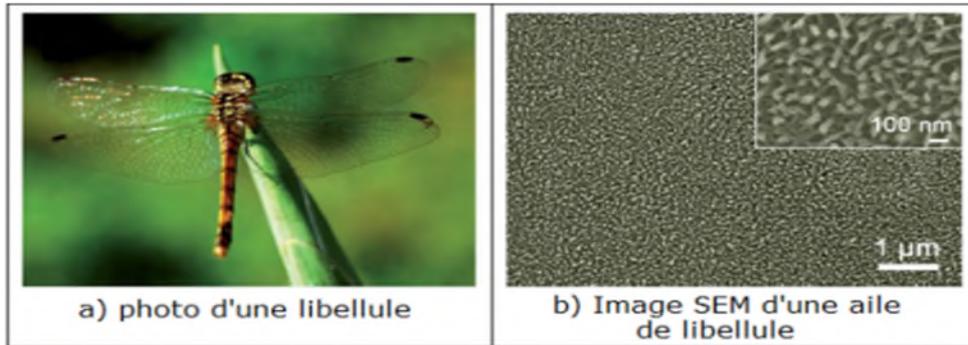


Fig. I. 9:Libellule (a: Ailes de libellule, b: Images SEM d'une aile de libellule) [15]

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 [18] microscopiques bien alignés, appelés soies, sur leurs pieds (Fig. I. 10). Ces poils rejettent l'eau et donc le gecko s'auto-nettoie [19].

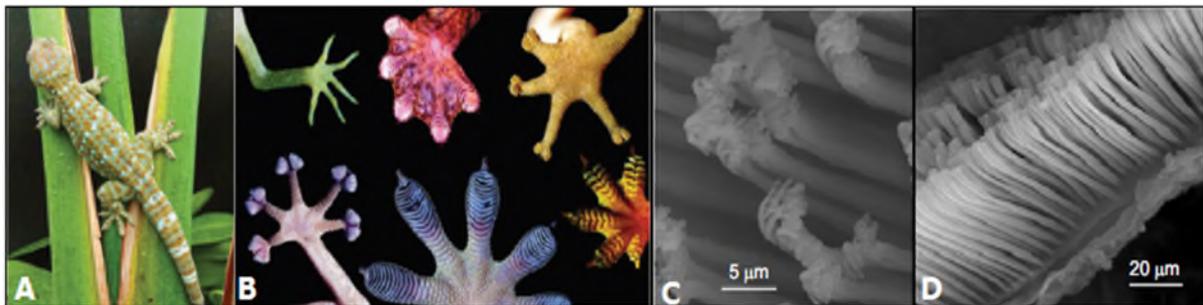


Fig. I.10: Gecko (A : Photo du gecko, B: Pattes du gecko, C, D: Nanostructure de sa peau) [15]

b) Poissons

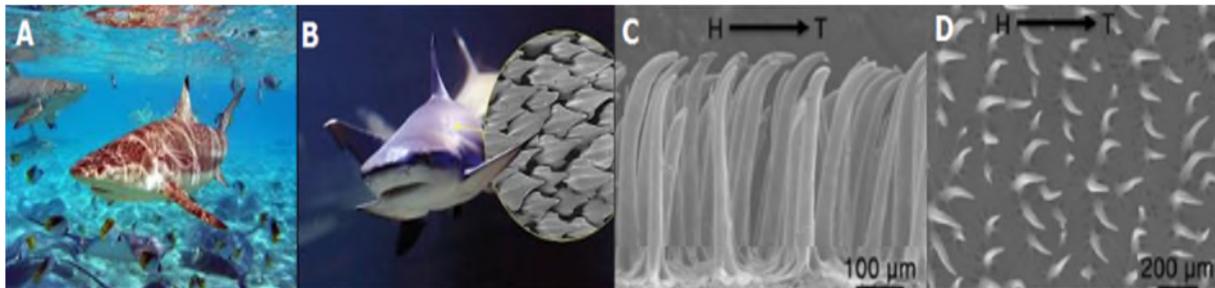


Fig. I. 11:A, B: Peau d'un requin [21], C, D: Vue macroscopique d'écailles d'un requin [22]

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. 11)[20].

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. 12) [23].



Fig. I.12: Canard sur l'eau et goutte d'eau sur sa plume [24]

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

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.13a). 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 [25].

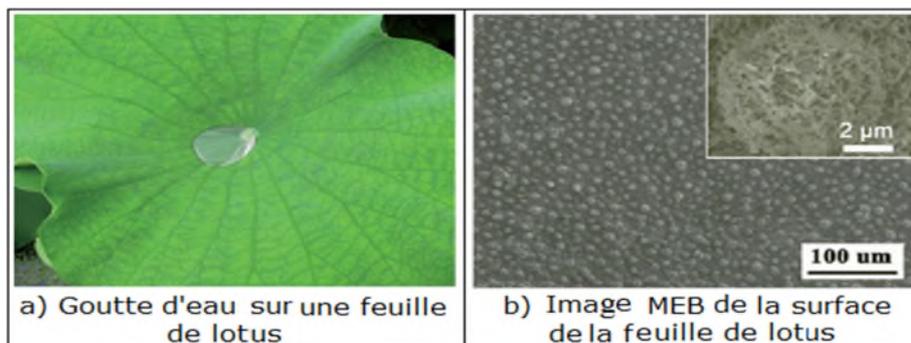


Fig. I. 13:Feuille de Lotus [15]

b) *Salvinia molesta*

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. 13b) [26].

c) Notre Dame

Est une plante aussi appelée (Lady's Mantel), recouverte de poils flexibles et hydrophiles qui ont pourtant la propriété d'être superhydrophobes (Fig. I. 14 a) [27].

d) Népente

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. 14b). Sa périphérie ornée de multiples couleurs sert de surface d'attraction pour les insectes [28].

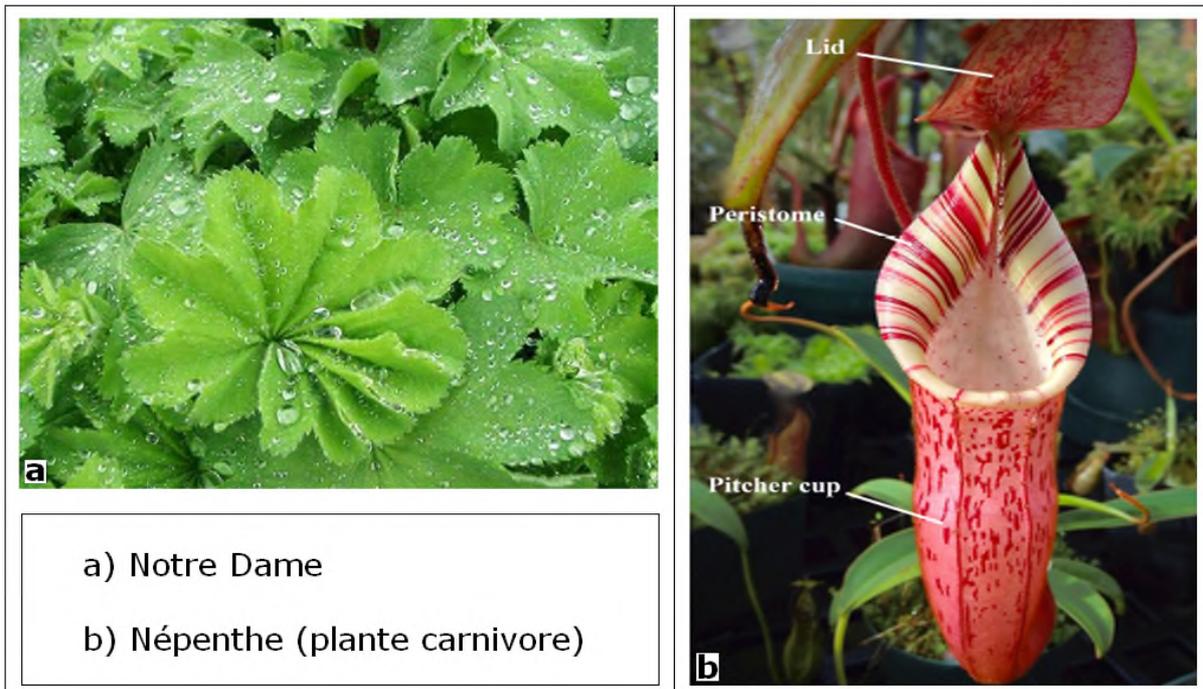


Fig. I. 14:Plantes notre dame et népente[28]

I.3.2 Matériaux superhydrophobes artificiels

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

Saleema et coll. ont obtenu des nano tours d'oxyde de zinc sur du silicium (Fig. I. 15a) par dépôt en bain chimique qui se compose de Zn (nombre de couches $C > 3$) 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[29].

I.3.2.2 Film d'argent sur du cuivre

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. 15b). L'angle de contact sur cette surface est de 162° et a des applications potentielles en réduction de la traînée dans l'eau [30].

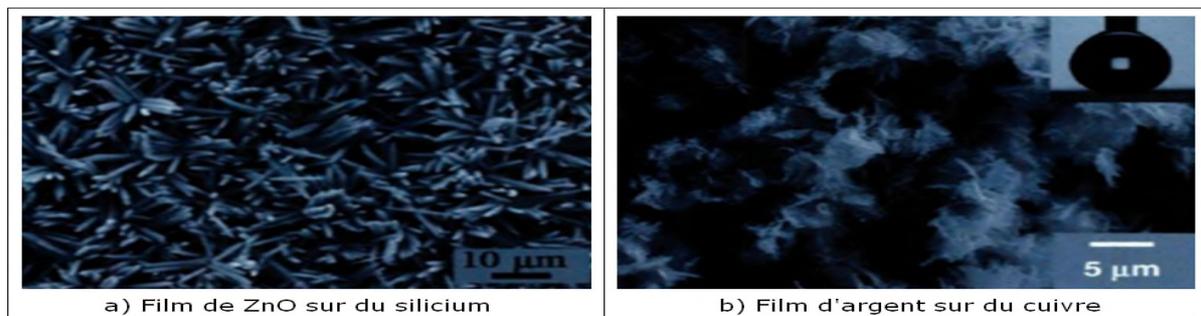


Fig. I. 15:Films de ZnO sur silicium et d'argent sur du cuivre

I.3.2.3 Gravure chimique de l'aluminium

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 figure I. 16a et I. 16b 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[31].

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

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. 16c) 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[32].

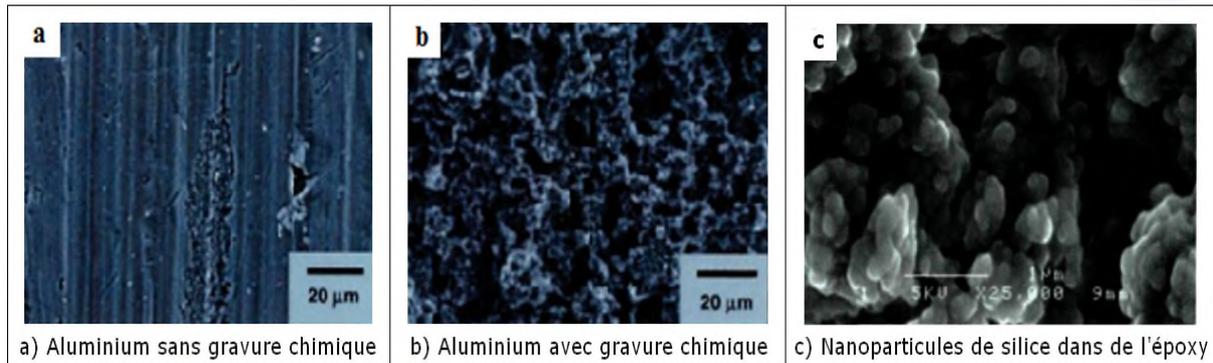


Fig. I. 16: Aluminium avec et sans gravure chimique et de la silice dans une matrice d'époxy

I.4 Propriétés électriques

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. 17). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

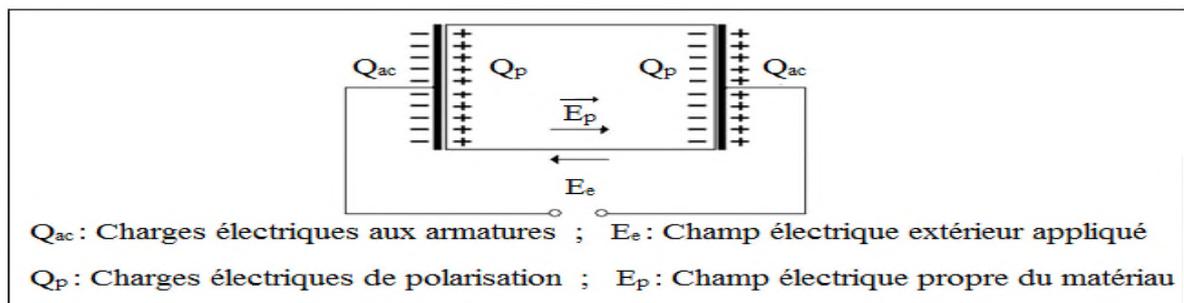


Fig. I.17: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

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 rend 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[33].

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

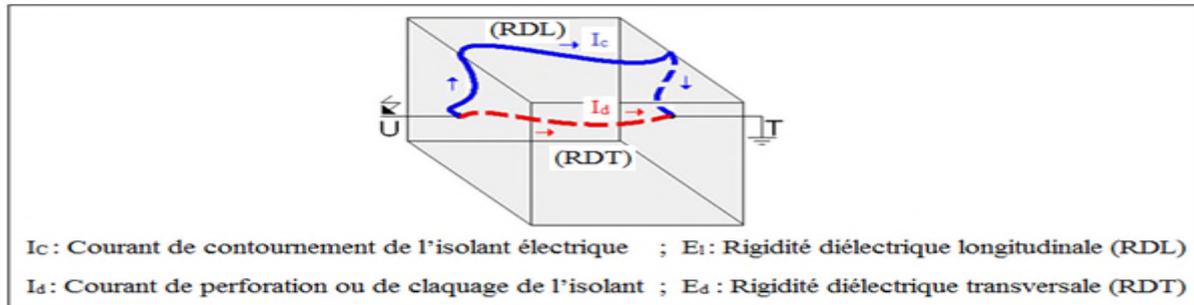


Fig. I.18: Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)

- 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. 18).

I.4.3 Résistance d'isolement

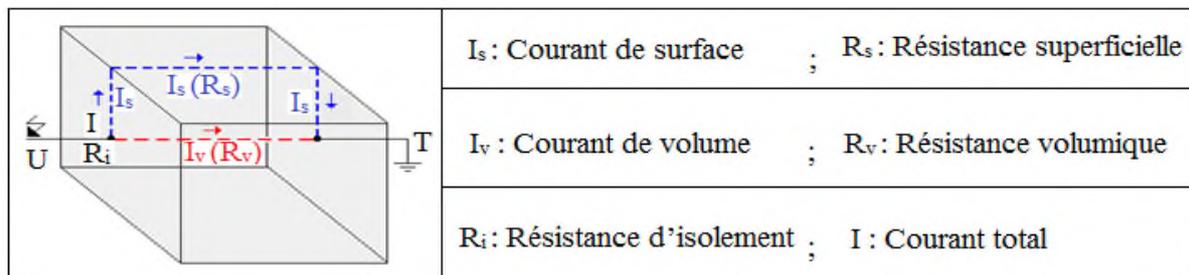


Fig. I.19: Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique

On distingue trois types de résistivités (Fig. I. 19):

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 (Ri)

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.

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. 20)

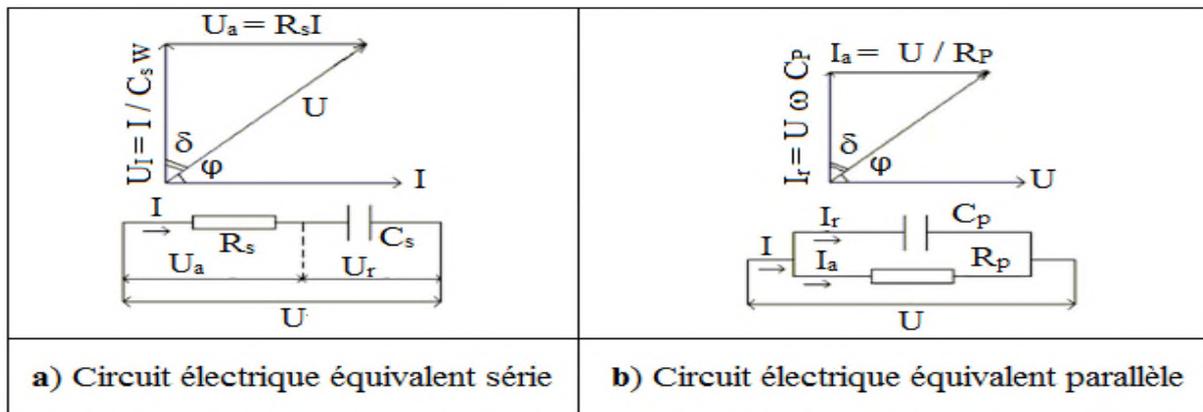


Fig. I.20: Circuit électrique équivalent série et parallèle

I.5 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes

I.5.1 Dépôt par vapeur chimique

Le procédé de cette technique consiste à exposer un substrat à une vapeur chimique produisant un certain dépôt désiré qui se décompose ou réagit à la surface. C'est une méthode assez coûteuse, du fait qu'elle nécessite une chambre qui contrôle la pression et la température[34].

I.5.2 Dépôt électrochimique

Cette méthode consiste à déposer deux substrats dans un liquide, l'un est considéré anode tandis que l'autre joue le rôle d'une cathode. Certains composés sont déposés sur les surfaces, leur nature ainsi que leur forme dépendent du substrat (anode ou cathode)[35].

I.5.3 Photolithographie

Ce procédé permet d'obtenir des topographies continues. Il consiste à enduire une surface d'un film mince de photo résine ou de polymère, puis la radier avec un faisceau lumineux de haute précision. Cette méthode est utilisée en électronique[36].

I. 5.4 Techniques utilisant le plasma

Le plasma peut être utilisé comme étant une technique de déposition (les ions déposent ceux pris dans un bain de vapeurs chimiques sur la surface) ou d'arrachement de matière, ce dernier est généralement utilisé en nano-fabrication des surfaces [37].

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

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 [38].

I.6.2 Ultra - Ever Dry

Ultra - Ever Dry, est un revêtement superhydrophobe 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 [39].



Fig. I. 21:Béton intelligent et bottes sans et avec traitement ultra-ever dry

I.7 Travaux antérieurs récents sur la performance électrique des isolations superhydrophobes

B.Smati et S.Soudani[40] ont effectué des travaux expérimentaux se rapportant à l'impact du dépôt de gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative. Afin de réaliser une telle étude, ils ont fabriqué et élaboré plusieurs

échantillons d'une isolation en verre à base de silicone superhydrophobe, illustrée par la figure (Fig. I.22).

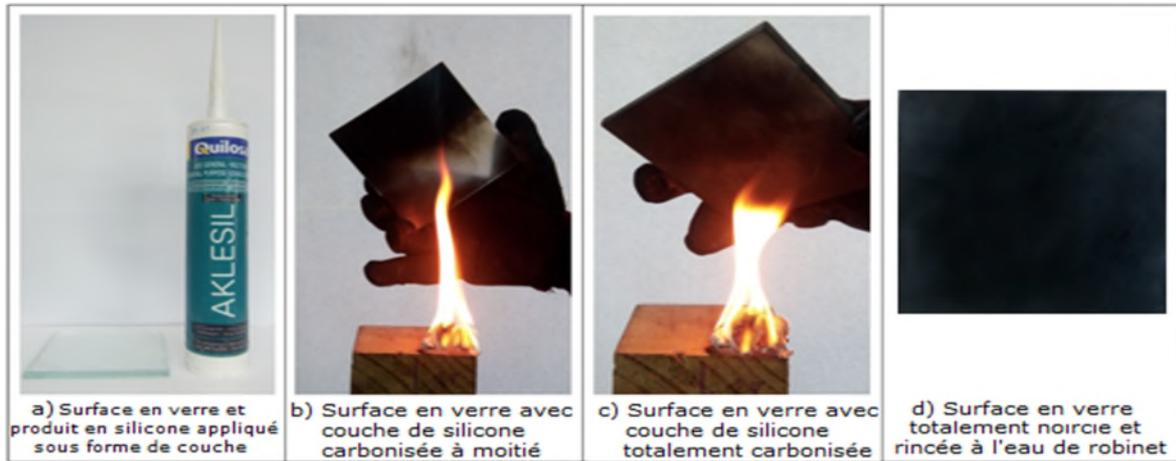


Fig. I. 22:Principales étapes de préparation d'une surface en verre superhydrophobe

Ces auteurs ont étudié les paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau déposées manuellement sur la surface isolante superhydrophobe sous tension continue négative et leur expulsion de celle-ci avec différentes géométries d'électrodes pour éliminer les décharges électriques qui sont la cause principal de la perte de superhydrophobicité de l'isolation (Fig. I. 23).

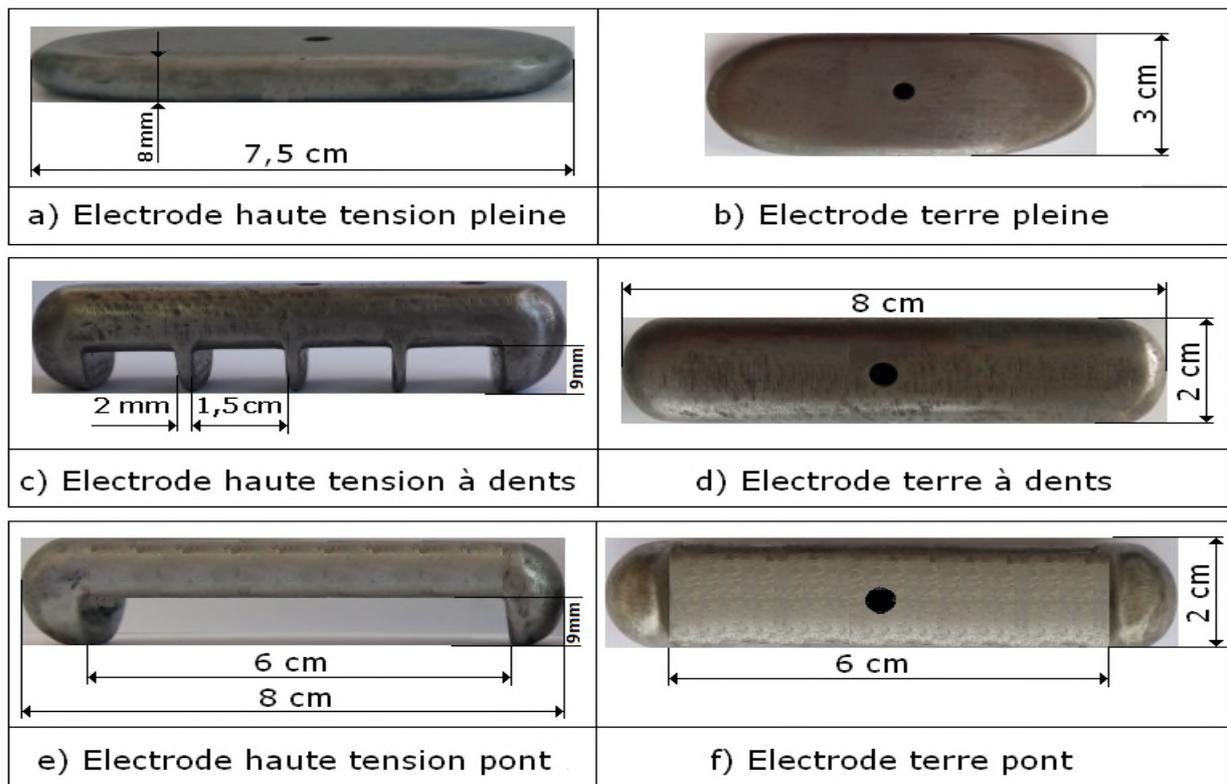


Fig. I. 23: Systèmes d'électrodes utilisées.

Afin de varier le volume des gouttes d'eau, ils ont utilisé une micropipette graduée de 5 à 100 μ l. 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. I.24a). Celle-ci est déposée sous forme de goutte d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. I.24b). 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. I.24c et 24d).

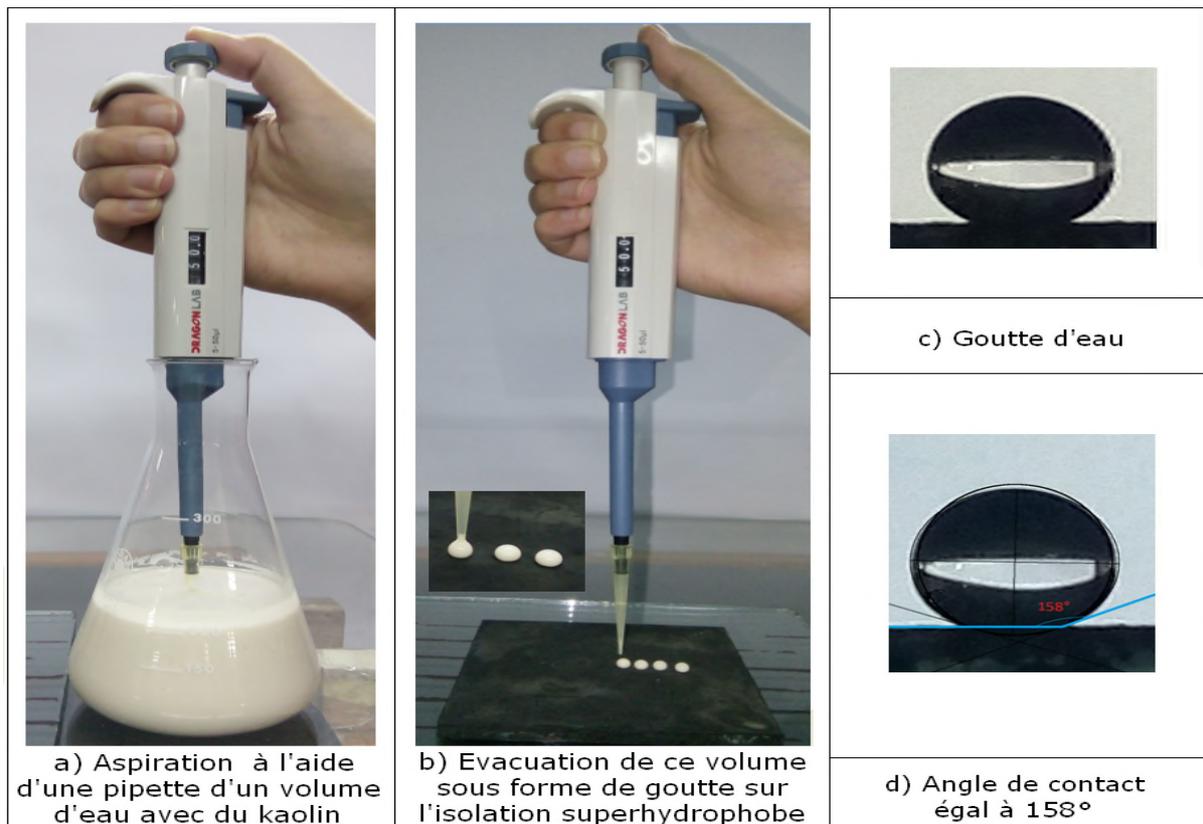


Fig. I. 24: Mesure du volume d'une goutte d'eau avec Micropipette (5 à 100 μ l) et son angle de contact.

Ces auteurs, ont posées gouttes sur la surface superhydrophobe selon deux types d'arrangement en lignes droites et en zigzag, illustrée par la figure I. 25. 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, illustrée par la figure I. 25.

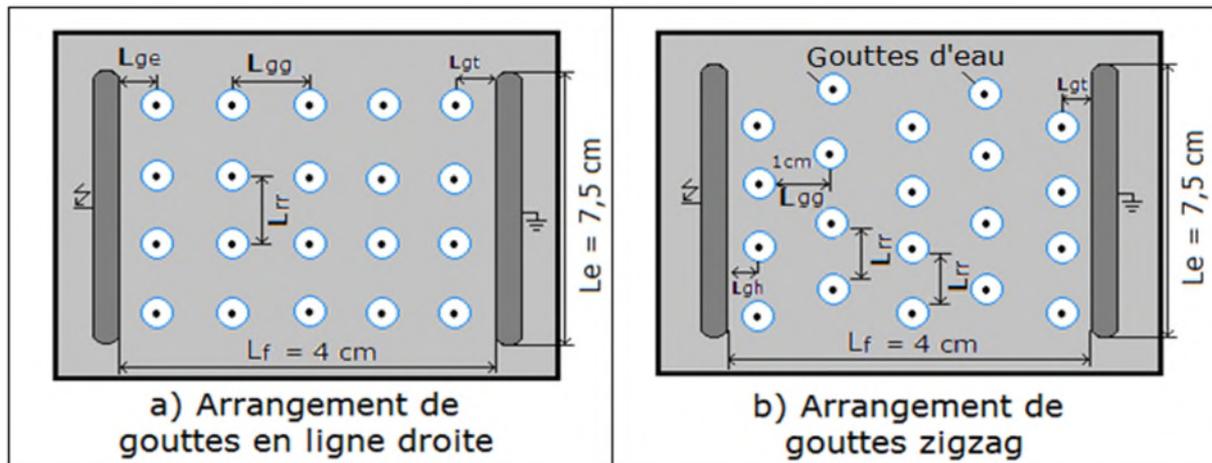


Fig. I. 25: Types d'arrangements de gouttes d'eau en zigzag et en lignes droites (L_f : Longueur de la ligne de fuite, L_{gg} : distance entre les centres de deux rangées successives de gouttes d'eau le long de la ligne de fuite L_f , L_{rr} : distance entre les centres de deux rangées adjacentes de 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).

La tension continue d'essai de l'isolation est fournie par la station de mesure illustrée par la figure I.26.

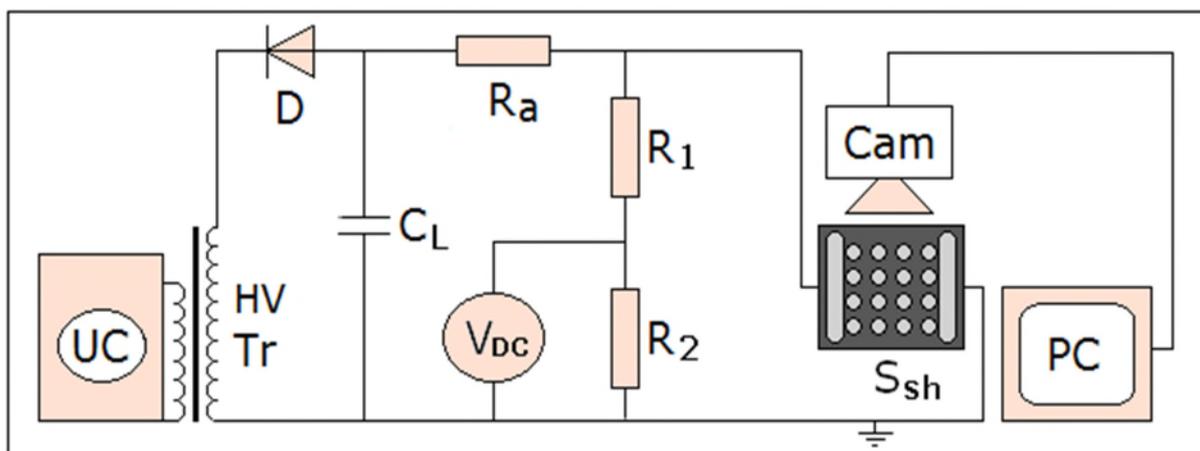


Fig. I. 26: Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes

Les auteurs ont mis quelques échantillons de l'isolation superhydrophobe sous tension de contournement à sec dont les valeurs moyennes obtenus en fonction de la géométrie des électrodes HT et terre sont résumées dans le tableau I.1. Les auteurs ont conclu quela tension de contournement sous électrodes à pont est plus élevée que sous électrodes à dents et sous électrodes pleines.

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

Les auteurs ont remarqué une 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 (Fig. I. 27).

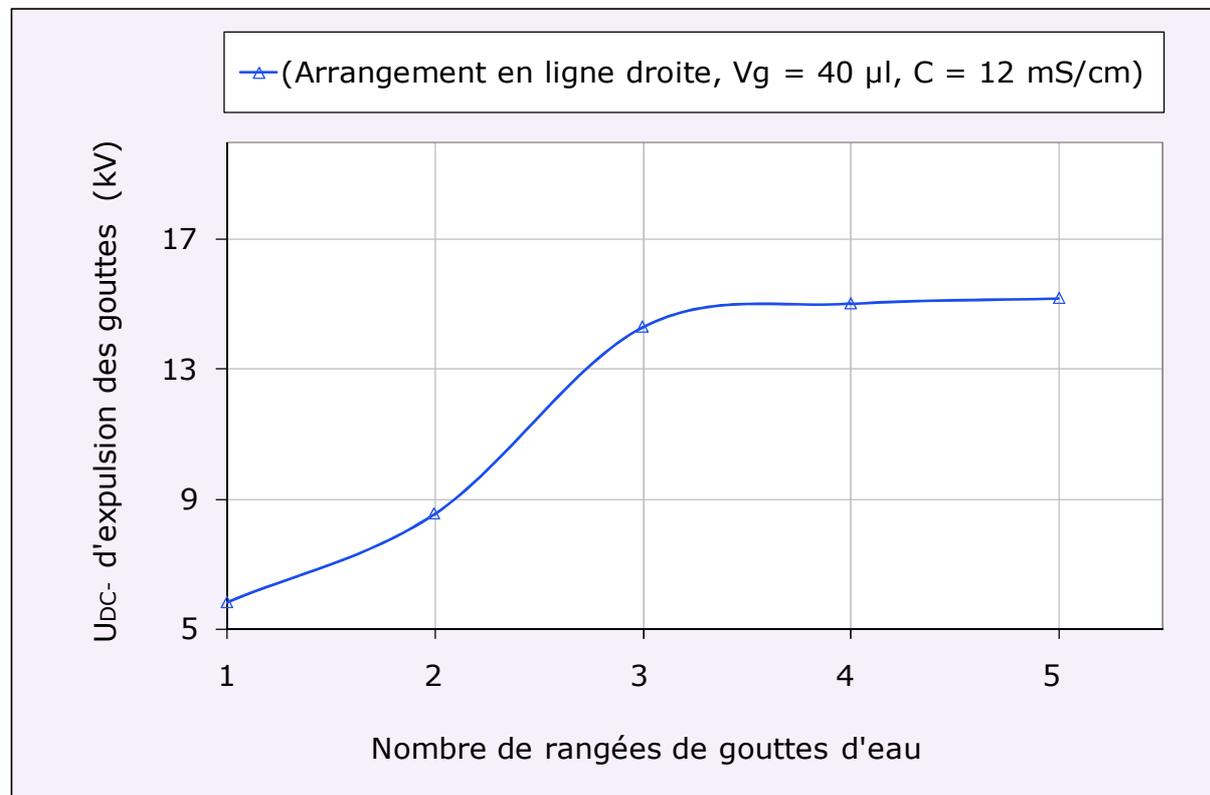


Fig. I. 27: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe selon un arrangement en lignes droites

Concernant le volume des gouttes d'eau (Fig. I. 28). les auteurs ont prouvé que la tension d'éjection des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur taille à cause de l'effet de cassie qui stipule que plus le volume des gouttes est élevé plus celles-ci reposent plus sur les sommets des aspérités de la surface de l'isolation, ce qui facilite leur évacuation sous une tension plus faible.

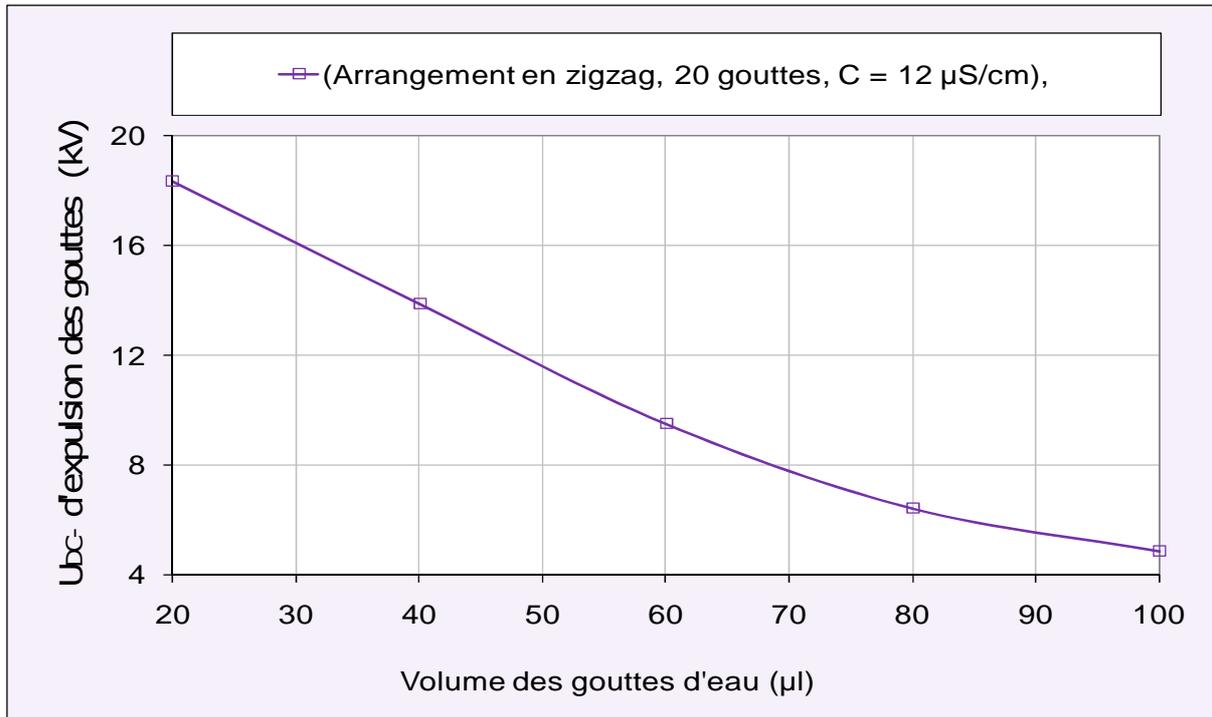


Fig. I. 28: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur volume

Quant à la conductivité électrique des gouttes d'eau, les auteurs ont montré que celle-ci exerce un effet négligeable sur la tension de leur expulsion (Fig. I.29).

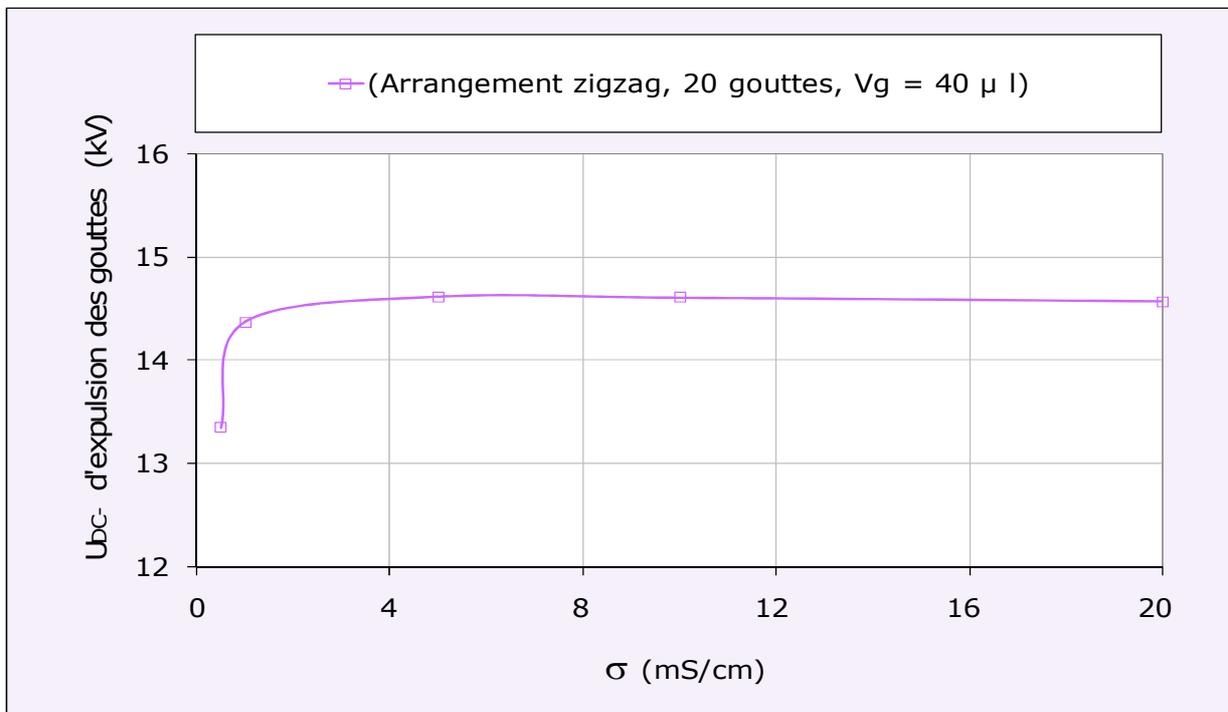


Fig. I. 29: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité

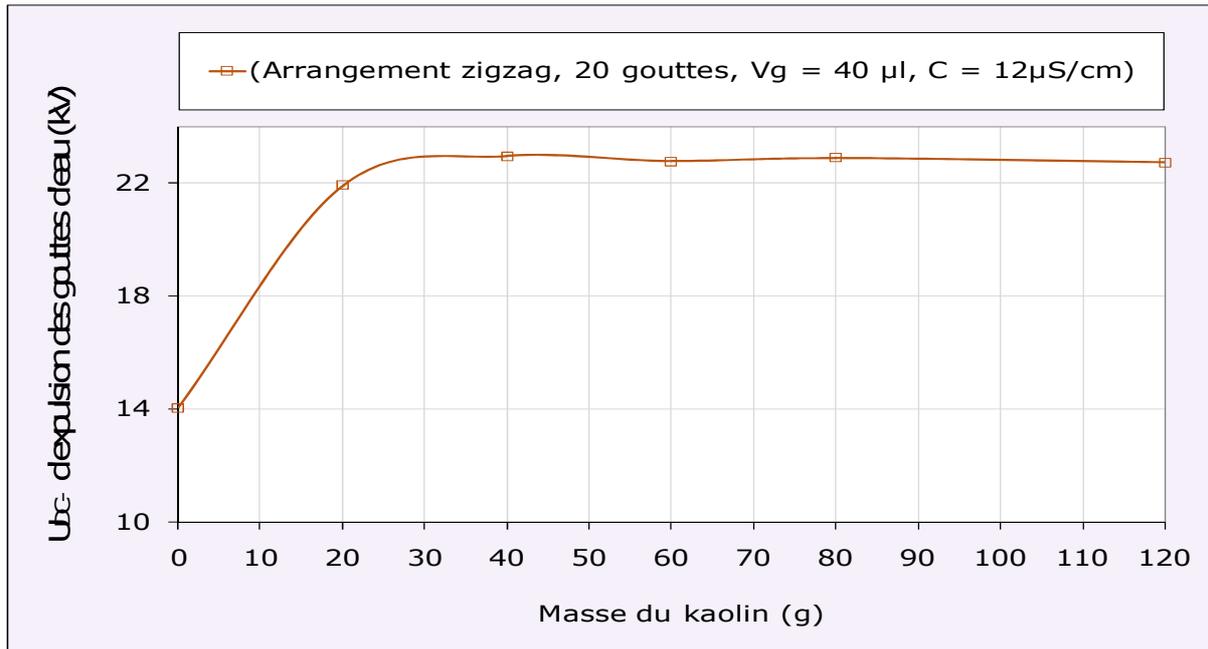


Fig. I. 30: Tension continue négative d’expulsion des gouttes d’eau déposées sur la surface de l’isolation superhydrophobe en fonction de la masse du kaolin ajoutée à la solution

Les auteurs ont comparé les résultats du mode d’arrangement des gouttes d’eau, ils ont trouvé que la tension d’évacuation des gouttes est plus grande sous un arrangement en lignes droites qu’en zigzag (Fig. I. 31).

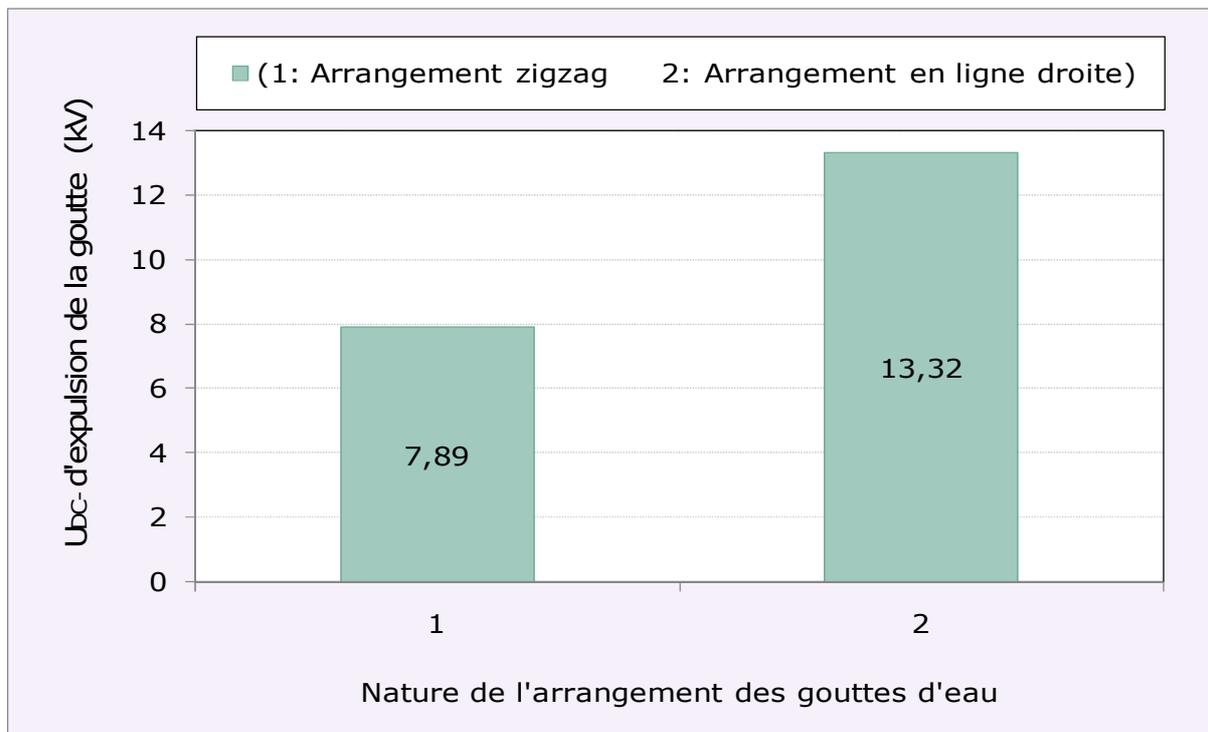


Fig. I. 31: Tension continue négative d’expulsion des gouttes d’eau recouvrant la surface de l’isolation superhydrophobe en fonction de leur arrangement

Les auteurs ont montré que sous tension continue négative, les électrodes à pont présente un meilleur profil que celle pleines et à dents vu que les décharges électriques apparaissent très rarement (Fig. I. 32).

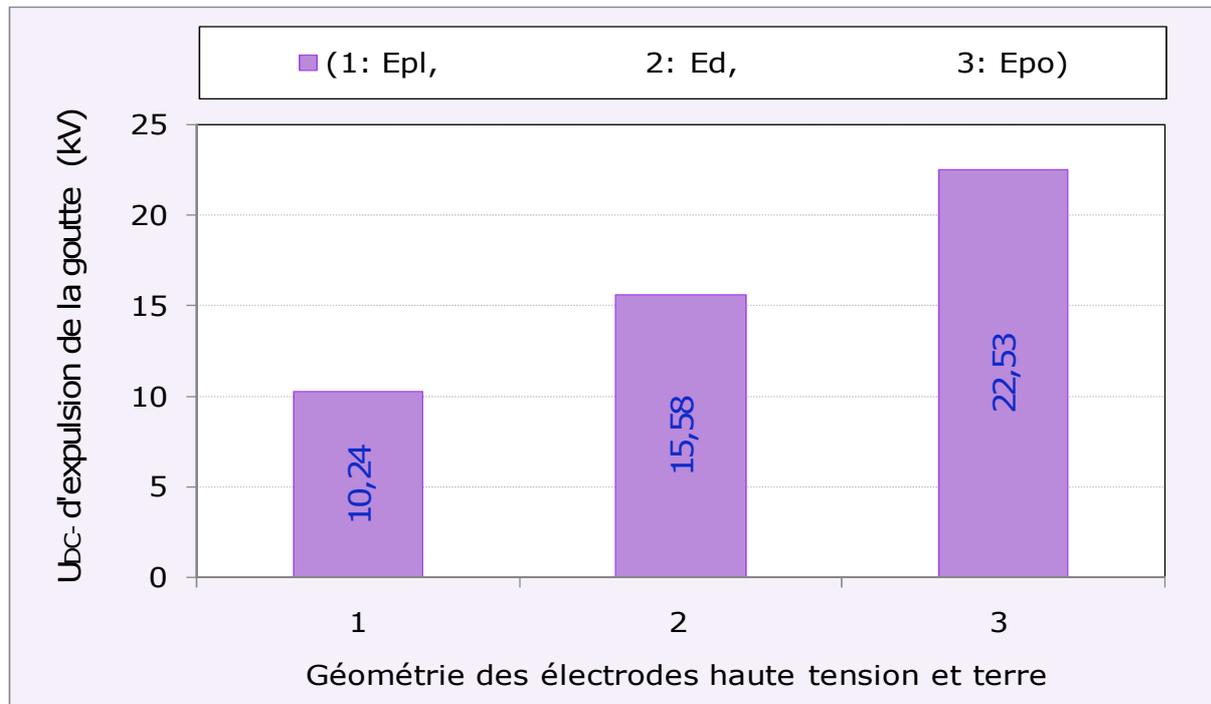


Fig. I. 32: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de géométrie des électrodes (Epl : Electrode pleine, Ed : Electrode à dent, Epo: Electrode à pont)

I.8 Conclusion

Ce chapitre nous permet de donner une idée générale sur la superhydrophobicité des surfaces et sa l'hydrophobicité et l'hydrophilite et les divers types d'objets, plants, d'animaux et d'insectes qui ont la même propriété que la superhydrophobicité et les Propriétés électriques d'un matériau. Ainsi on a mentionné quelques résultats essentiels obtenus par des auteurs sur les performances des surfaces superhydrophobes sous tension continue négative.

Chapitre II : Pollution des isolations superhydrophobes

II. 1 Introduction

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème pour l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface de l'isolateur. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes et par suite la diminution de la tension tenue des isolateurs. L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants sur la surface de ces isolateurs, entraîne des assèchements locaux de la couche de pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur. Dans certaines conditions, ces arcs partiels peuvent se développer jusqu'à provoquer le contournement total des isolateurs, en connectant l'extrémité sous haute tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation.

II.2 Définitions

II. 2. 1 Pollution

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît, en totalité ou en partie, comme un sous-produit de l'action humaine, au travers des effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux de l'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes.

Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et en produits biologiques. Elles peuvent aussi affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités récréatives du milieu [41, 42].

II.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 [43].

II. 2. 3 Degré de pollution

C'est la valeur qui caractérise la pollution telle que la salinité, la conductivité de la couche et la densité de dépôt de sel [44].

II.2.4 Salinité (Sa)

La salinité est la quantité totale des résidus solides (en grammes) contenu dans 1 kg d'eau, Elle correspond à la masse du sel divisée par le volume de la solution. Généralement, elle est exprimée en kg/m^3 .

II.3 Sources de pollution[45]

Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées peut être classées en trois catégories: pollution naturelle (marine, désertique), pollution industrielle et pollution mixte.

II. 3. 1 Pollution naturelle**II. 3. 1. 1 Pollution marine**

Dans les installations à la bordure 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 ou par brouillard ou simplement par condensation, cette couche devient de plus en plus conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers de la couche superficielle, et des arcs peuvent se développer jusqu'à engendrer le contournement total de l'isolation[46].

II. 3. 1. 2 Pollution désertique

Dans les régions désertiques la pollution est engendrée par des vents de sable qui se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts seront humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable, engendrant ainsi une diminution de la résistance superficielle des isolateurs [47].

II. 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.

II. 3. 2 Pollution industrielle

La pollution dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, cimenteries, présentent un problème sur les isolateurs qui 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. Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport [48].

II.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 [49].

II. 4 Sévérité de pollution d'un site

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la sévérité de la pollution là où l'isolation doit être installée. Différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées. Dans ce cas, les principales méthodes suivantes ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site.

II. 4. 1 Densité du dépôt non soluble (DDNS)

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de dépôts polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en mg/cm^2 . La mesure de la DDNS s'accompagne souvent d'une analyse physicochimique de la pollution, elle s'effectue comme suit [50]:

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. II. 1). La DDNS peut être calculée à l'aide de la relation II. 1 suivante :

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

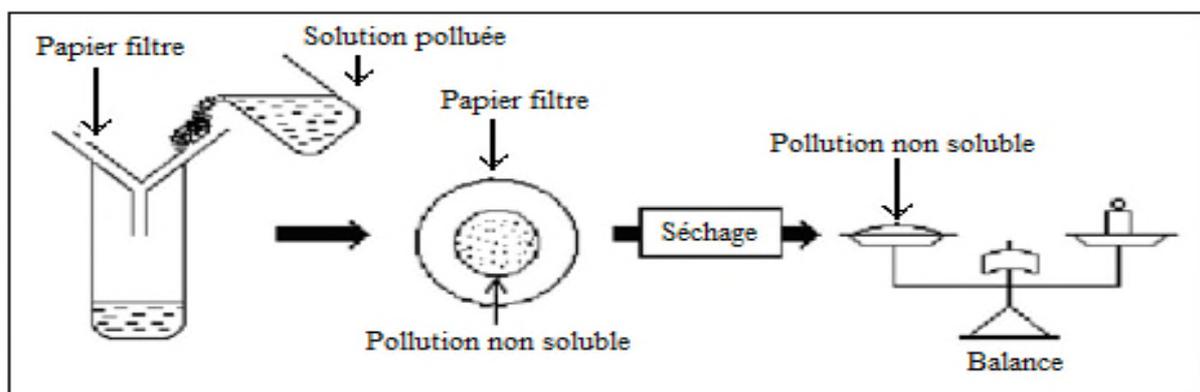


Fig. II. 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS

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 l'isolation en cm^2 ;

II. 4. 2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

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 [50].

Tout d'abord des échantillons de pollution sont prélevés à la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs. En suite, Le dépôt est récupéré par lavage en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut calculer la DDSE, comme suit :

$$DDSE = \frac{Sa.V}{S} \text{(II. 2)}$$

$$Sa = 5,7(\sigma_{20})1,03 \text{(II. 3)}$$

$$\sigma_{20} = \sigma_0 [1 - b(\theta - 20)] \text{(II.4)}$$

$$b = -3,2 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 1,032 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 8,272 \cdot 10^{-4} \theta + 3,544 \cdot 10^{-2} \text{(II.5)}$$

Où:

Sa: Salinité de la suspension en (kg/m^3) ;

V: Volume de la solution en (m^3) ;

S: Surface de l'isolateur en (m^2) ;

θ : Température de la suspension en $^{\circ}\text{C}$;

σ_0 : Conductivité volumique à 0°C en (S/m) ;

σ_{20} : Conductivité volumique à 20°C en (S/m) ;

II. 4. 3 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 (V) à celle-ci, conformément à la formule II. 6

$$G = \frac{I}{V} \text{(II.6)}$$

$$\sigma_s = f.G \text{(II.7)}$$

$$f = \int_0^L \frac{dx}{\pi d(x)} \text{(II.8)}$$

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur[1]. 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 de l'isolateur. 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, [41, 51-55].

II. 4. 4 Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesure adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne les phénomènes de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air dans un site et la sévérité de la pollution de celui-ci [47].

II. 4. 5 Mesures optiques

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis, de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [47].

II. 4. 6 Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolateur. Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons [47].

- Installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs, et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des proportions d'amorçage enregistrées.
- Une autre méthode consiste à disposer des fusibles sur chaque chaîne, afin que la chaîne accroisse sa longueur effective jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

II. 5 Influence des facteurs climatiques sur la tenue électrique des isolateurs

Parmi les facteurs météorologiques qui créent des dépôts polluants et par conséquent influent sur la tenue électrique des isolations on distingue[56]:

II. 5. 1 Humidité

L'humidification influe négativement sur la tenue électrique des isolations puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés sur leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue.

II. 5. 2 Pluie

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

II. 5. 3 Température

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

II. 5. 4 Vent

Le vent joue un double rôle. Il assure d'une part le transport et la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces isolantes, d'autre part il peut se comporter comme agent d'auto nettoyage lorsque sa vitesse est élevée.

II. 6 Classification des niveaux de pollution

Les sites pollués peuvent être répartis selon leurs sévérités mesurées en quatre classes qui sont les suivantes [57]:

II. 6. 1 Pollution légère ($\sigma_v = 5 \text{ à } 10 \mu\text{S}$)

- Zone sans industrie et avec une faible densité de maisons équipées d'installation de chauffage.
- Zone avec une faible densité d'industries ou de maisons et soumise à des vents ou des pluies
- Toutes les régions agricoles.

II. 6. 2 Pollution moyenne ($\sigma_v = 10$ à $15 \mu\text{S}$)

- Les zones avec industries ne produisant pas de fumée polluante, et celles ayant une densité moyenne de maisons équipées de chauffage.
- Les zones avec forte densité de maisons ou d'industries, mais soumises à des vents fréquents et propres ou à des pluies.
- Les zones exposées au vent de la mer.

II. 6. 3 Pollution forte ($\sigma_v = 15$ à $30 \mu\text{S}$)

- Zone à forte densité d'industries, de grandes villes avec forte densité d'appareils de chauffage polluants.
- Zones proches de la mer, ou celles exposées à des vents relativement forts venant de la mer.

II. 6. 4 Pollution très forte ($\sigma_v = 30$ à $50 \mu\text{S}$)

- Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais.
- Zones très proches de la côte et exposées à des vents forts polluants venant de la mer.

Selon DDSE, les sites sont repartis comme suit [58]:

Niveau de pollution	Densité de dépôt de sel, DDSE (mg/cm^2)
Léger	0,05 à 0,10
Moyen	0,10 à 0,20
Fort	0,20 à 0,60
Très fort	0,60 à 1,10

Tab. II. 1: Classification des sites pollués selon la DDSE

Selon le risque les sites sont répartis en trois catégories [59]:

- ✓ Classe 1: les sites nécessitent des investigations approfondies
- ✓ Classe 2: les sites à surveiller
- ✓ Classe 3: les sites banalisables qui ne nécessitent aucune action de surveillance

II. 7 Formation et répartition de la couche de pollution

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépendent du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et du niveau de tension qui leur est appliqué [47].

II. 7. 1 Non-uniformité longitudinale par groupe

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, dont la valeur est constante dans chaque groupe. Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants :

- Temporairement pendant le lavage sous tension.
- Dans les chaînes d'isolateurs en forme de « T ».
- Par effet du champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension.

II. 7. 2 Non-uniformité transversale

Ce type est caractérisé par des secteurs ou bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante. Ces bandes sont réparties transversalement autour de la surface de chaque isolateur de la chaîne. Ce type de pollution est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

II. 7. 3 Non-uniformité longitudinale périodique

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire, ses principales spécifications sont:

- La face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure.
- La concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale.
- La pollution est plus accentuée entre les nervures.

II. 8 Conséquences de la pollution sur les isolateurs

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard,...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite [47].

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur:

II. 8. 1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçait à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par l'installation.

II. 8. 2 Arc fixe

L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.

II. 8. 3 Contournement des isolateurs pollués

L'accumulation du dépôt est continue et n'est modifiée que par la pluie et le vent. En position verticale, le nettoyage est plus efficace sur le dessus de l'isolateur que sur le dessous, d'où un dépôt plus important sur la surface inférieure des ailettes.

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes. Chacune de ces étapes a une importance sur le résultat final, donc sur la tenue ou le contournement de la chaîne isolante sous tension de service du réseau.

II. 9 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe

II. 9. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale

Le phénomène de contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes pleines est illustré par la figure II. 2 [40].

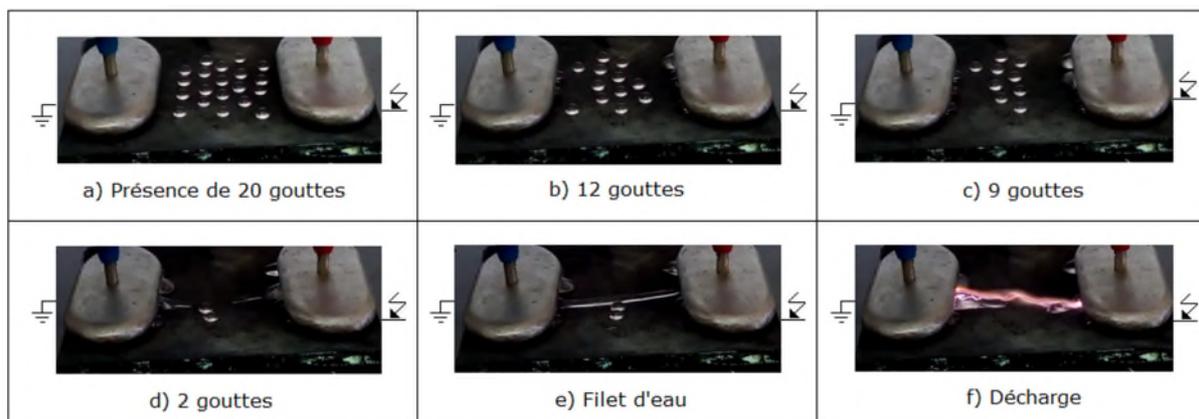


Fig.II. 2: Expulsion partielle des gouttes d'eau de la surface de l'isolation à électrodes pleines et contournement de celle-ci ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $m_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$)

Les figures II. 2b, II. 2c, II. 2d, II. 2e et II. 2f, montrent que, en quittant la surface du matériau sous l'action d'un champ électrique, les premières gouttes d'eau viennent s'accrocher

respectivement sur les électrodes HT et terre. Suite à leur accumulation et leur effilement avec la croissance du champ électrique, elles réussissent, en compagnie des autres gouttes non encore évacuées ou celles refoulées par les électrodes, à raccourcir au maximum la ligne de fuite sèche de l'isolation, ce qui engendre dans un premier temps la formation de décharges électriques partielles entre les filets d'eau partiels, qui, en se développant avec l'élévation de la tension appliquée, finissent par entraîner le contournement du matériau.

Le phénomène de contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes à dents est illustré par la figure II. 3 [40]. Les figures II. 3b, II. 3c, II. 3d, II. 3e et II. 3f montrent que certaines gouttes arrivent à s'en aller en passant entre les dents des électrodes, mais d'autres viennent se coller aux dents en attirant vers elles d'autres. Leur accumulation au niveau des électrodes et la coalescence de certaines gouttes non encore éjectées de la surface, entraînent la réduction de la ligne de fuite sèche du matériau. Ceci implique une expulsion non totale des gouttes d'eau et la formation de décharges électriques partielles entre les gouttes, qui se développent avec l'élévation de la tension appliquée, pouvant entraîner, moins fréquemment que dans le cas précédent, le contournement de la surface de l'isolation.

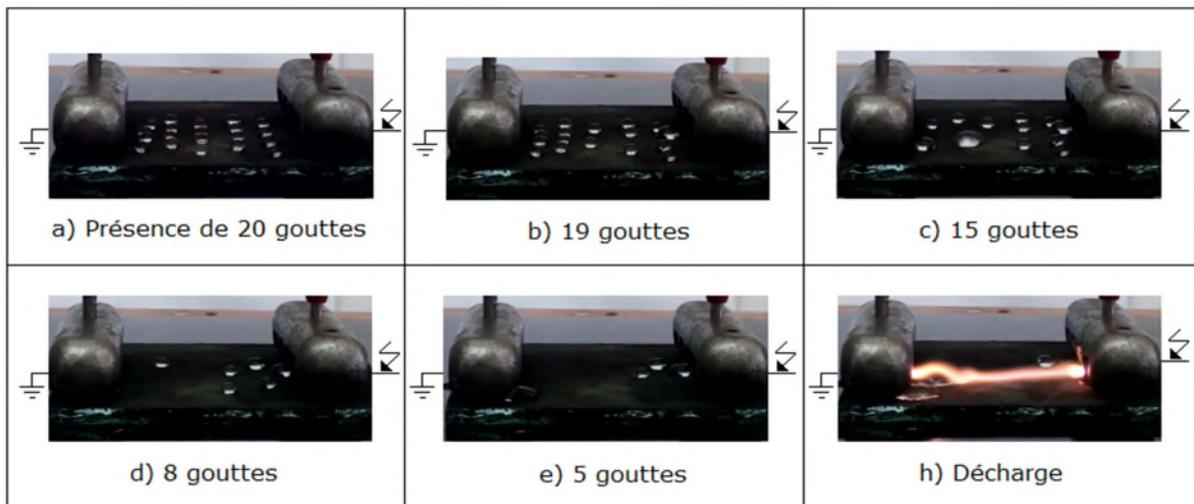


Fig. II. 3: Evacuation partielle des gouttes d'eau de la surface de l'isolation sous électrodes à dents et contournement de celle-ci ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $C_k = 40 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$)

Le phénomène de contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes à pont est illustré par la figure II. 4 [40].

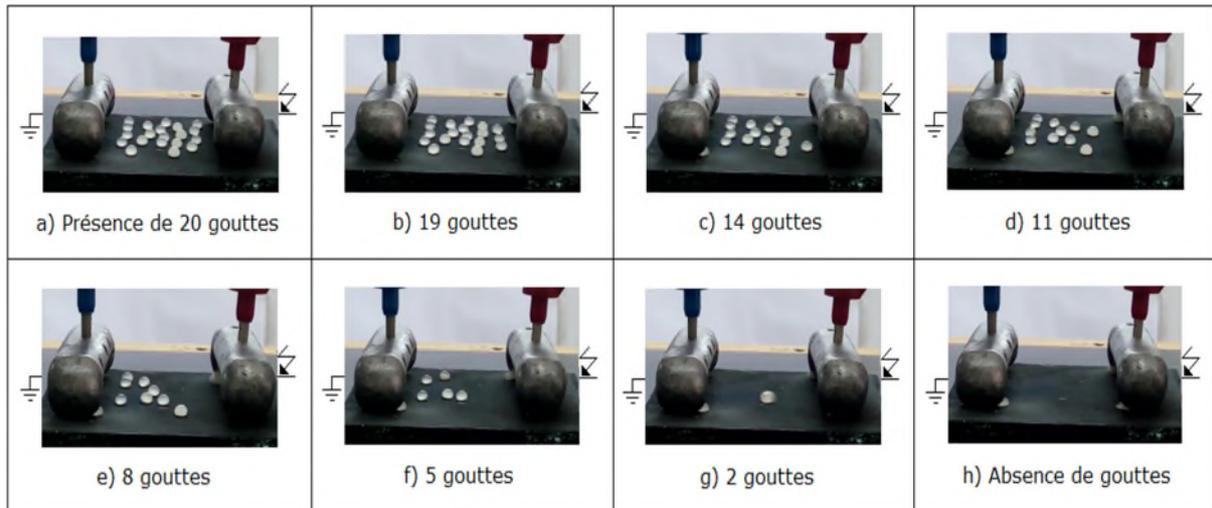


Fig. II. 4: Ejection complète des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation sous électrodes à pont ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $C_k = 40 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$)

Elle donne les étapes essentielles d'une éjection complète, selon un mode groupe-individuel et bidirectionnel, d'une multitude de gouttes d'eau avec du kaolin, la figure II. 4b reflète l'image de 19 gouttes d'eau persistantes et la figure II. 4c représente 14 gouttes restantes. Il est à remarquer qu'aucune des gouttes éjectées du matériau ne s'est accrochée aux pieds des électrodes. Les figures II. 4d et II. 4e montrent l'état d'une surface portant respectivement 4 gouttes et 1 goutte au moment où la tension appliquée est de l'ordre de 40 % de celle de contournement de l'isolation sans gouttes. Il est à constater là aussi l'évacuation en dehors du matériau sans collage d'aucune de ces gouttes sur les pieds des deux électrodes. L'image, illustrée respectivement par les figures II.4f, II. 4g et II. 4h montre une surface totalement dégagée sous une tension égale à environ 50 % de celle de contournement de l'isolation sans gouttes et aucune goutte n'a été retenue par les deux électrodes.

II. 10 Simulation de la pollution au laboratoire

II. 10.1 Essais sous pollution artificielle

Les essais au laboratoire consistent à reproduire les conditions de la pollution naturelle. Sont basés sur la transformation de la couche de pollution par des solutions réparties sur une surface isolante et dont la conductivité est différente. 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 [60].

II. 10.1.1 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 DDSE en mg/cm². 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 [61].

II. 10.1.2 Méthode du brouillard salin

La méthode de brouillard salin intéresse précisément la pollution marine qui est caractérisée par la formation d'une mince couche de sel conductrice recouvrant la surface de l'isolateur. La procédure utilisée pour simuler l'accumulation de pollution avec cette méthode consiste à vaporiser de la saumure sur l'isolateur à l'aide d'un ensemble de pulvérisateurs qui atomisent la solution saline dont la conductivité varie de 4,3 à 200 mS/cm. Le niveau de pollution obtenu est donc défini par la salinité du brouillard salin [45].

II. 10.1.3 Méthode de pollution liquide

La pollution n'est pas séchée avant l'essai [62]. Elle est constituée d'eau, de craie et de kaolin ou de méthylcellulose. La conductivité est ajustée par addition de NaCl. Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification.

II. 11 Techniques de lutte contre la pollution

L'augmentation de degré de pollution présente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées [63].

- Allongement de la ligne de fuite
- Isolateurs plats
- Graissage périodique
- Revêtement en silicone
- Les isolateurs composites
- Nettoyage des isolateurs

II. 11.1 Allongement de la ligne de fuite

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées:

- Le changement de type d'isolateur pour rallonger la ligne de fuite.

- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères.

II. 11. 2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)

Les isolateurs plats sont caractérisés par une faible accumulation de couche de pollution en comparant les isolateurs traditionnels. Ils s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les différentes régions [52].

II. 11. 3 Graissage périodique des isolateurs

Le graissage protège temporairement les isolateurs grâce à ses propriétés hydrophobes, en utilisant des graisses silicone. 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 [40, 47].

II. 11. 4 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 [64].

II. 11. 5 Utilisations des isolateurs composites

Les isolateurs composites ont de bonnes propriétés hydrophobes, sont revêtus d'un polymère, ils peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très élevés.

II. 11. 6 Nettoyage des isolateurs

Cette méthode consiste au nettoyage manuel des isolateurs et le lavage périodique hors tension, il est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles en respectant le processus du lavage et les distances de sécurité.

II.12 Conclusion

Le contournement des isolateurs des lignes aérienne en haute tension est l'évolution d'une décharge électrique le long de ces surface polluées jusqu'à la mise en court-circuit, de la haute tension à la masse. Il interrompt la distribution d'énergie électrique en entraînant souvent un délestage de la ligne soutenue par l'isolateur perturbant. Pour palier à ce phénomène et protéger le réseau de transport d'énergie électrique de ce problème il est impératif 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 utilisée (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 croit en passant d'une surface hydrophile à hydrophobe puis superhydrophobe.

**Chapitre III : Expérimentation sur la
performance des surfaces
superhydrophobes sous tension continue
négative**

III.1 Introduction

Sur les trois profils d'électrodes expérimentés lors des travaux de recherche antérieurs, seule la géométrie d'électrodes à pont contribue mieux à l'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation considérée [40]. Cependant, quelques gouttes d'eau atterrissent parfois aux pieds de telles électrodes, lors de leur éviction de l'isolation. Leur persistance et leur effilement sous l'action d'un champ électrique continu croissant, engendre le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation et par conséquent, des décharges électriques partielles résultantes entraînent le contournement de celle-ci.

Justement, l'objectif convoité à travers ce présent chapitre consiste en la recherche d'un autre profil d'électrodes très adéquat et la technique de leur montage sur l'isolation afin de résoudre le problème d'accrochage des gouttes d'eau aux pieds des électrodes, indépendamment de leurs paramètres électrogéométriques considérés, entre autres, leur volume, conductivité électrique et leur viscosité. Donc, la performance électrique d'une isolation superhydrophobe sera quantifiée en fonction des grandeurs d'influence suscitées et l'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation sera visualisée au moyen d'une caméra.

III. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure

III. 2.1 Modèle expérimental

Un support en bois, peint de plusieurs couches de vernis et à paroi supérieure mobile, a été réalisé. Il a la forme d'un parallélépipède de dimensions: 500 mm x 500 mm x 400 mm. Sa face supérieure est reliée à une rotule lui permettant de prendre une position d'inclinaison arbitraire ($\alpha \neq 0^\circ$).

La position horizontale de l'isolation ($\alpha = 0^\circ$), retenue dans cette étude, est illustrée par la figure III.1a1. Celle-ci est prise pour des raisons de reproduction de la situation la plus défavorable, correspondant à une performance électrique la plus faible de l'isolation superhydrophobe. Ceci est dû justement à la très faible mobilité des gouttes d'eau sous cette inclinaison et la probabilité élevée de contournement de l'isolation par des décharges électriques, régies par ces perles d'eau, suite à leur coalescence et leur effilement sous l'action d'un champ électrique quelconque [65-66].

Parmi les trois géométries d'électrodes confectionnées lors des travaux antérieurs [40], seul le profil des électrodes à pont permet l'éjection des gouttes d'eau en dehors de l'isolation, avec de temps à autre une retenue de quelques gouttes d'eau à leurs pieds. Leur persistance et leur effilement peut entraîner la création de décharges électriques partielles et/ou de

contournement du matériau et par conséquent son altération précoce. Afin de contourner ce problème, un jeu d'électrodes en acier inoxydable, de forme parallélépipédique et très arrondies à leurs extrémités, a été fabriqué. Leurs caractéristiques sont indiquées sur la figure III. 1. Leur largeur (l_e) est de 30 mm, leur épaisseur (e_e) est de l'ordre de 8 mm et leur longueur (L_e) de 120 mm. La distance interélectrode ou la ligne de fuite de l'isolation considérée est de 40 mm (Figs. III. 1a2 et 1b4).

Les électrodes sont suspendues à 10 mm de la surface de l'isolation superhydrophobe à l'aide de deux pitons. Cet interstice permet l'évacuation facile et rapide des gouttes d'eau de l'isolation et leur récupération par le bac de couleur rouge et leur réutilisation (Fig.III.1b5).

Un jeu de deux électrodes pleines parallélépipédiques a été confectionné.

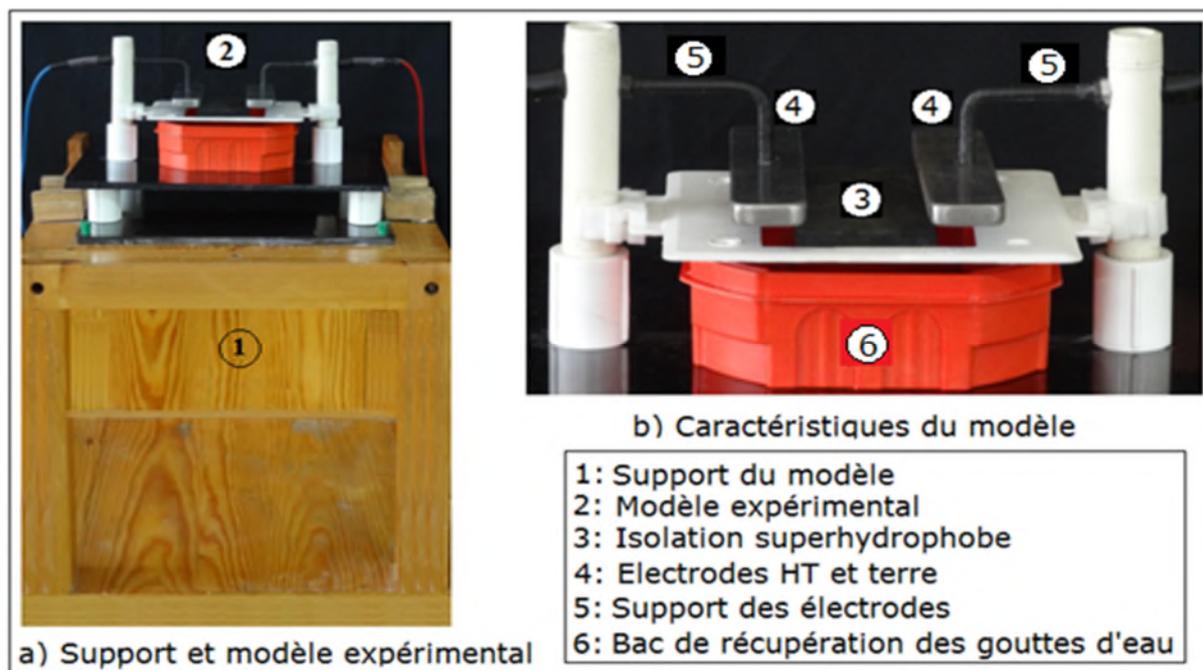


Fig.III.1: Caractéristiques du modèle expérimental

III. 2.2 Fabrication d'une isolation à surface superhydrophobe isolante

La fabrication d'une isolation électrique à surface superhydrophobe est subordonnée à la réalisation des trois étapes essentielles suivantes:

- Etalage manuel et uniforme d'une quantité de gel en silicone fraîche sous forme d'une couche très fine sur la face supérieure d'une plaque en verre (Fig. III. 2a).
- Dépôt d'une quantité du même produit sur un morceau de bois et sa mise à feu (Fig. III. 2b).
- Recouvrement d'une plaque en verre, de dimensions 120 mm x 50 mm x 5 mm, par de la suie émanant de la carbonisation du gel en silicone (Fig. III. 2b). La figure III. 2c montre la plaque totalement noircie et rincée à l'eau du robinet.

Plusieurs échantillons ont été confectionnés de la même manière et mis dans un dessiccateur afin de les conserver à l'abri de toute humidité régnant au laboratoire d'essai ou leur enlever celle accumulée sur leur surface durant la période de leur essai sous tension continue (Fig. III. 3a).

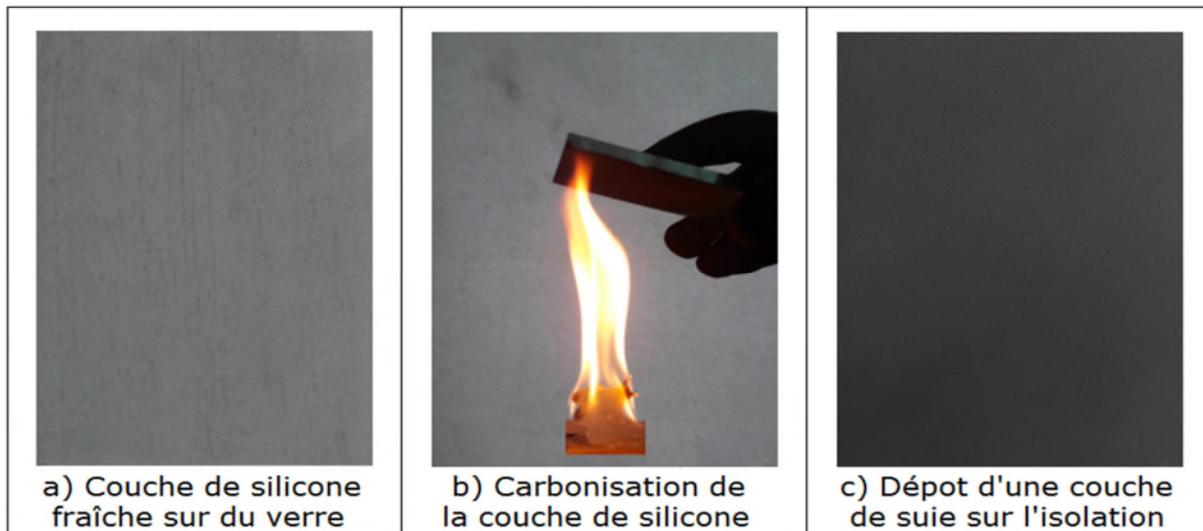


Fig. III.2: Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe

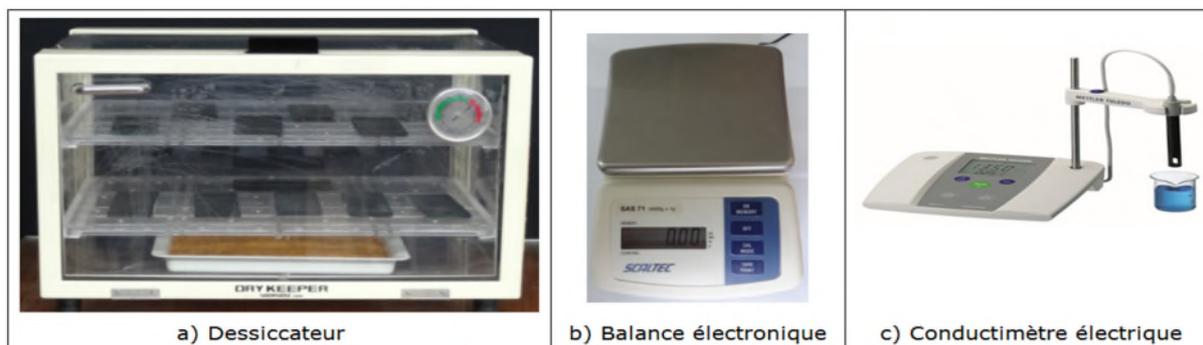


Fig. III.3: Dessiccateur, balance électronique et conductimètre à sonde mobile

III.2.3 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 employée dans le cadre de notre investigation (Fig. III.4). Le volume choisi de la goutte d'eau est fixé à l'aide d'un compteur solidaire avec la micropipette. Une quantité est aspirée de la solution se trouvant dans un bécher (Fig. III. 4a). Celle-ci est déposée sous forme d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. III. 4b). Les gouttes d'eau paraissent blanches sur les figures III. 4b et III. 4c, car elles proviennent d'une solution, composée d'un mélange d'eau et de kaolin (Fig. III. 4a).

La mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe est réalisée au moyen d'un logiciel (Image J) disponible sur internet. La valeur de l'angle de

contact statique d'une goutte d'eau, de 20 μl de volume, est de l'ordre de 161 $^\circ$ (Fig. III. 4d). Son angle de glissement sur la même surface inclinée par rapport à l'horizontale est inférieur à 2 $^\circ$. Ces valeurs sont conformes à celles obtenues par d'autres chercheurs sur une surface de nature différente[65 - 66].

Plusieurs solutions avec ou sans kaolin ont été préparées et mises en bouteilles. Ces solutions contiennent de l'eau distillée et du sel de cuisine. La masse de kaolin ajoutée à la solution est mesurée à l'aide d'une balance électronique (Fig. III.3b) et sa conductivité électrique au moyen d'un conductimètre à sonde mobile (Fig. III. 3c).

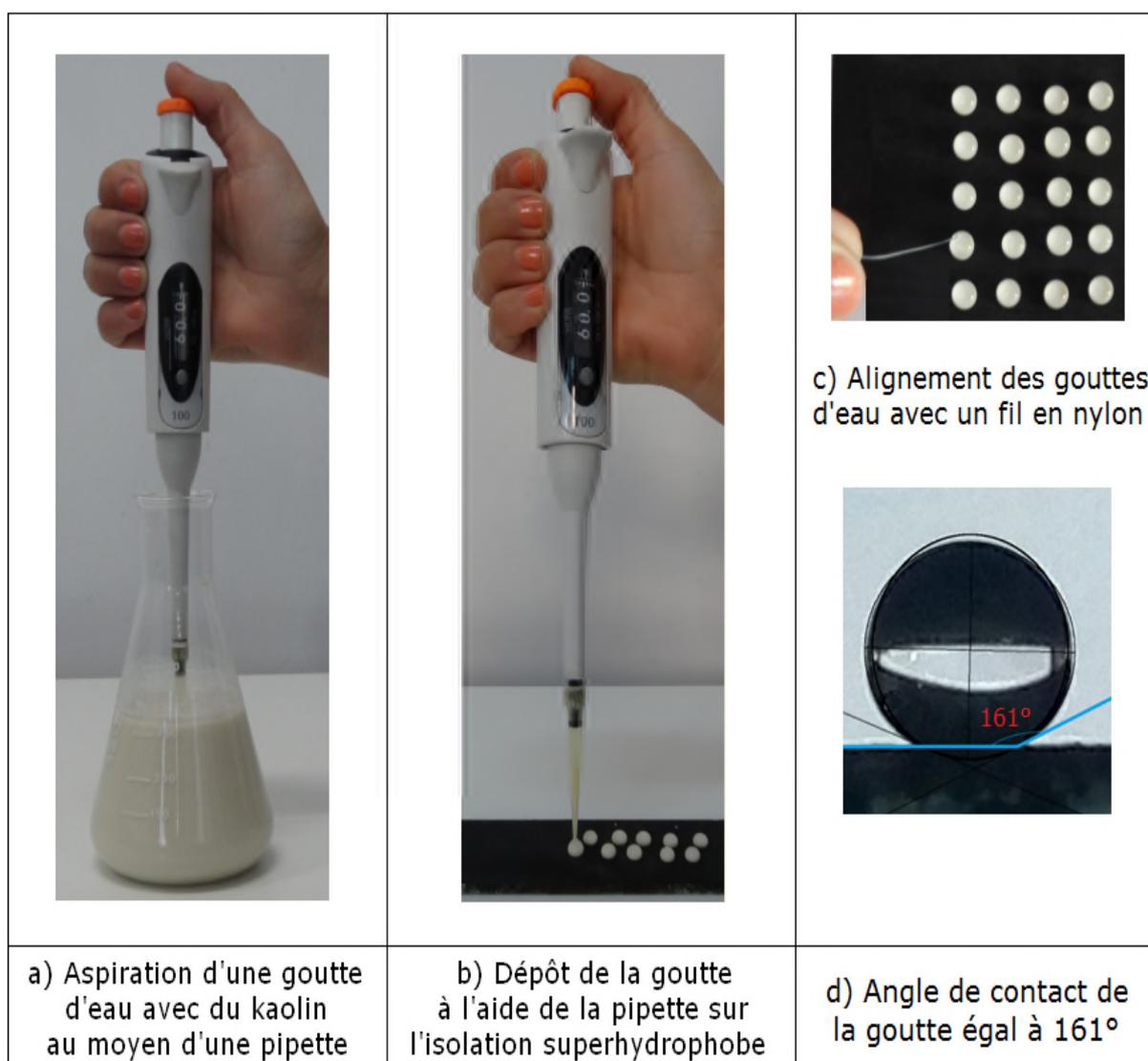


Fig. III. 4: Mesure de volume d'une goutte d'eau avec micropipette (5 à 100 μl) et son angle de contact

III.2. 4 Nombre de rangées de gouttes d'eau et leur arrangement sur l'isolation

Dans le cadre de cette investigation, deux types d'arrangement en lignes droites et en zigzag de plusieurs rangées de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation ont été exploités.

Les rangées disposées en lignes droites le long de la ligne de fuite de l'isolation (Fig. III. 5) sont composés chacune d'un ensemble de cinq gouttes alignées de tels sorte que les distances entre les centres de celle-ci et les électrodes sous tension (L_{dv}) et terre (L_{dg}) ainsi que celle séparant les centres des deux gouttes d'eau adjacentes (L_{dd}) sont maintenues constantes tout au long de l'expérimentation.

Les rangées en zigzag comprennent chacune d'elle un ensemble de cinq gouttes disposés en décalage l'une par rapport à l'autre le long de la ligne de fuite de l'isolation de telle manière que le chemin de leur liaison à travers leur centre ressemble à la lettre W ou M (Fig. III. 6). Quel que soit le mode d'arrangement, le nombre de rangés de gouttes d'eau est varié entre 1 et 5 (Figs. III. 5 et III. 6).

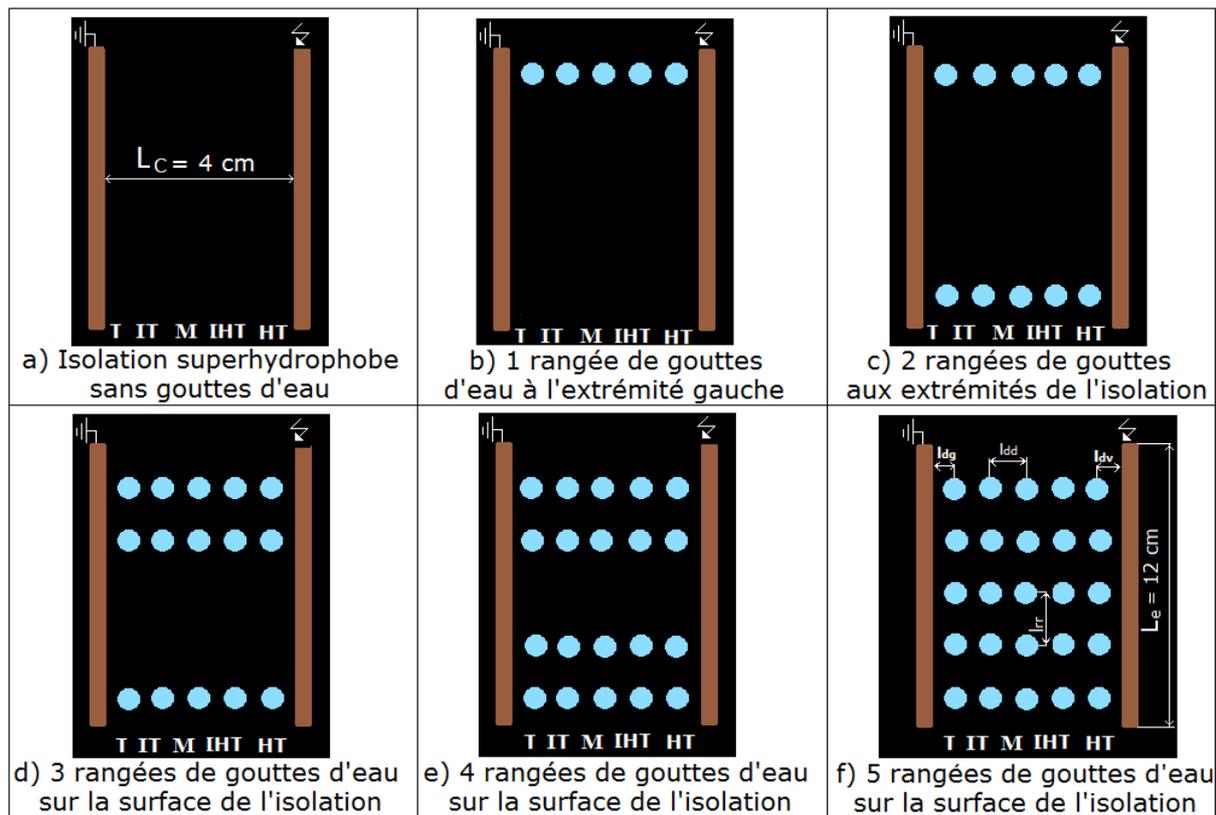


Fig. III.5: Emplacement du nombre de rangées en lignes droites sur la surface de l'isolation

Le choix de ces deux types d'arrangement est justifié par le fait que l'arrangement en zigzag des gouttes d'eau est le plus proche de celui rencontré dans la nature lors des phénomènes de condensation ou de pluie naturelle[67-68], par contre l'arrangement en lignes droites est

choisi afin de simuler le phénomène de coalescence des gouttes d'eau lors de leur évacuation de la surface de l'isolation superhydrophobe.

Concernant l'emplacement de la première rangée de gouttes d'eau, il existe plusieurs possibilités. Celle-ci peut être tout d'abord placée perpendiculairement ou parallèlement aux électrodes sous tension et terre. Dans le premier cas la rangée peut être apportée aux extrémités à droite ou à gauche de l'isolation ou bien dans la zone intermédiaire parallèle à la ligne de fuite de celle-ci. Dans le deuxième cas, la rangée peut être déposée soit au voisinage proche de l'électrode HT ou terre ou bien dans la zone intermédiaire. Le but recherché à travers cette configuration consiste en la création et la simulation de deux zones l'une humide et l'autre sèche et leur position sur la surface de l'isolation.

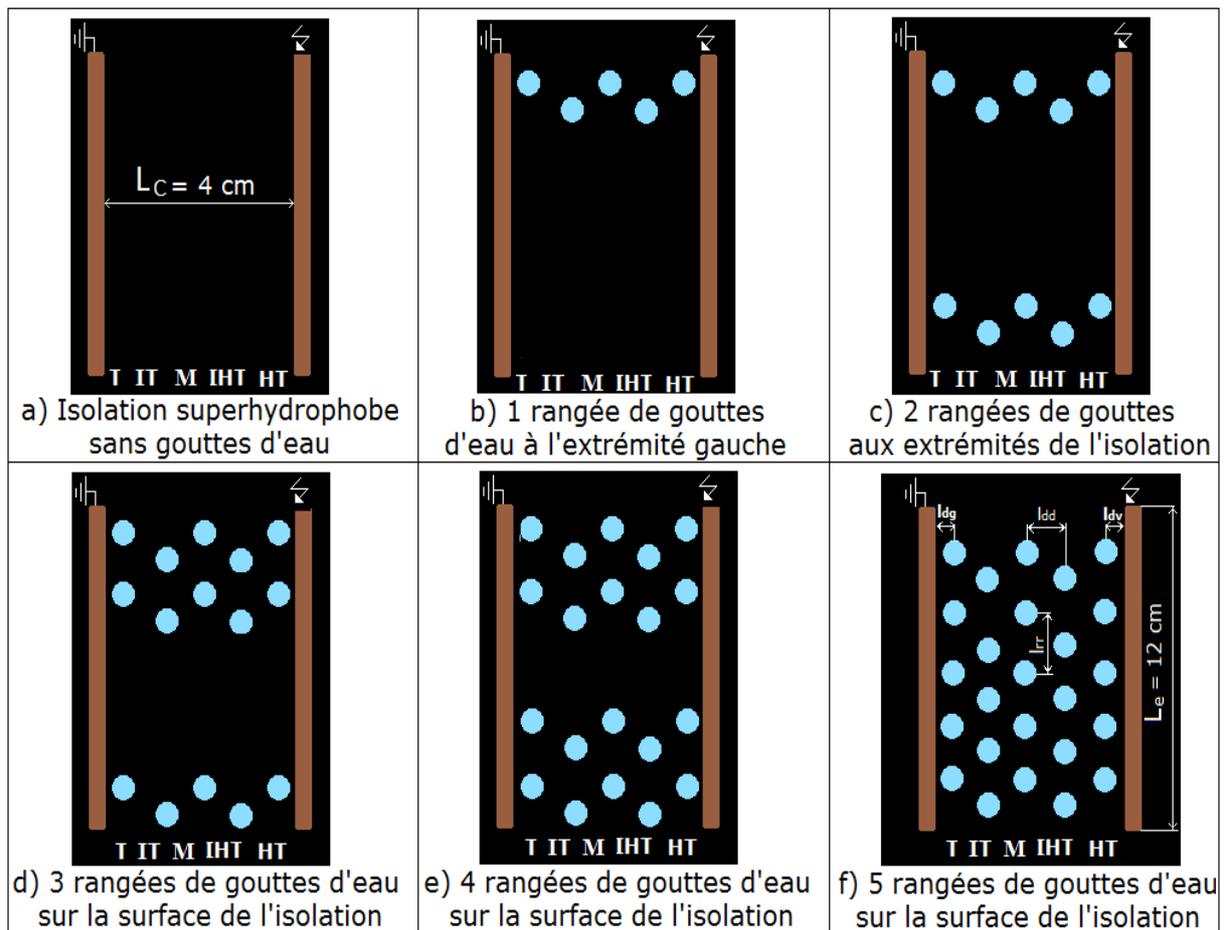


Fig. III. 6: Emplacement du nombre de rangées en zigzag sur la surface de l'isolation (L_c : Longueur de la ligne de fuite, L_{dd} : distance entre les centres de deux rangées successives des gouttes d'eau le long de la ligne de fuite L_c , L_{rr} : distance entre les centres de deux rangées adjacentes de gouttes d'eau sur la longueur de l'isolation, L_{dv} : 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_{dg} : 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)

III.2.5 Volume des gouttes d'eau et leur position

L'étude de l'effet du volume des gouttes d'eau sur la performance électrique de l'isolation superhydrophobe est effectuée en prenant une seule rangée des 5 gouttes d'eau et en choisissant des valeurs de leur volume égales à (10, 30, 40, 60 et 80) μl . La prise en considération de ces valeurs est justifiée par le fait que la taille des gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle est très différente. La position de la rangée des côtés HT, terre et milieu de l'isolation a été prise en considération (Figs. III. 7 et III. 10a).

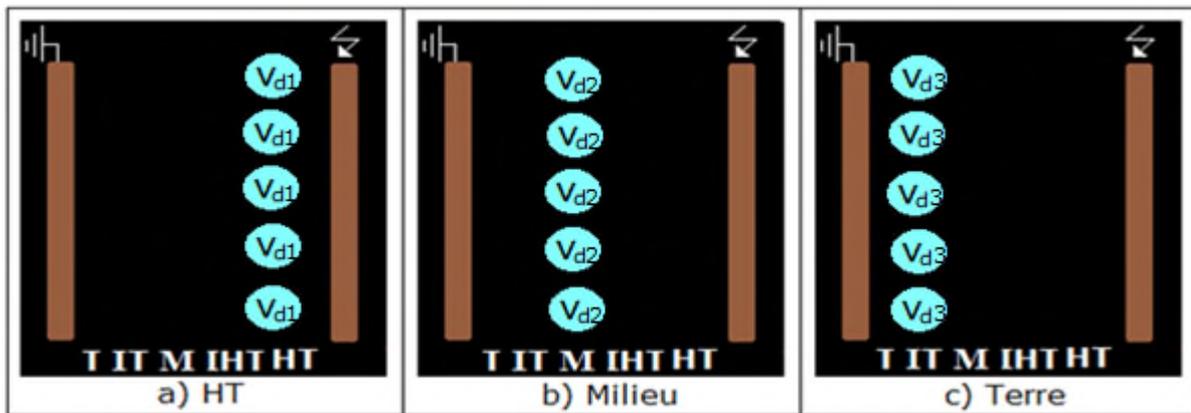


Fig. III. 7: Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à volume variable

III.2.6 Conductivité des gouttes d'eau et concentration en kaolin de la solution

L'eau utilisée dans cette étude n'est pas pure. Selon les divers paramètres d'influence de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la dite isolation, la solution employée peut contenir en plus de l'eau, du chlorure de sodium de telle sorte à varier la conductivité électrique des gouttes d'eau.

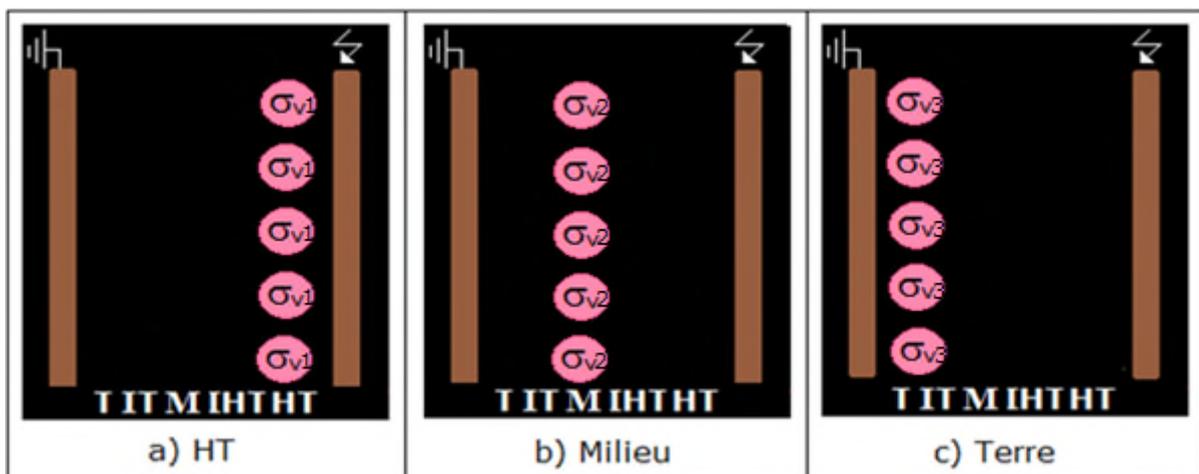


Fig. III. 8: Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à conductivité variable

L'intervalle de conductivité électrique de la solution polluante est variée entre $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $20 \text{mS}/\text{cm}$ (Figs. III. 8 et III. 10c) de telle sorte à simuler les niveaux de pollution des sites compris entre un niveau de contamination très léger et celui très fortement contaminé, ou du kaolin dont la masse est variée entre 0 et 120 g (Figs.III. 9et III. 10b) pour l'épaississement de la couche polluante.

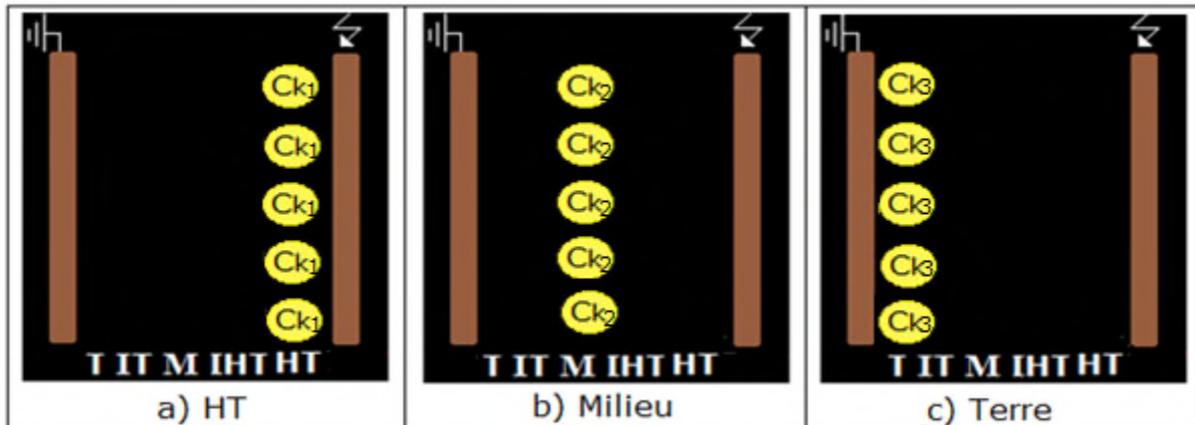


Fig. III. 9: Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à concentration en kaolin variable

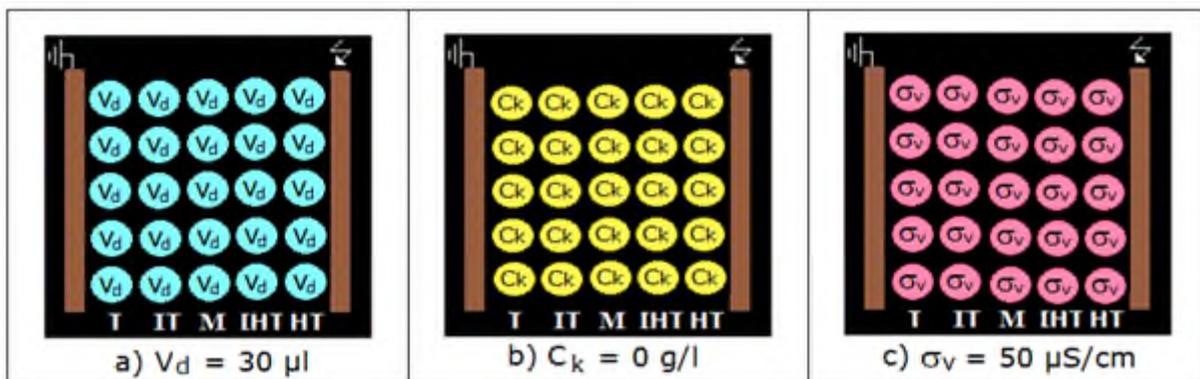


Fig. III. 10: Arrangement de 5 rangées x 5 gouttes en lignes droites sur la surface de l'isolation ($V_d=30\mu\text{l}$, $\sigma_v=50 \mu\text{l}$ et $C_k=0 \text{g/l}$)

III.2.7 Mesure de tension d'évacuation des gouttes d'eau

La tension continue d'essai de l'isolation est fournie par la station de mesure illustrée par la figure III.11. 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 ($106 \text{k}\Omega$), en dérivation avec le condensateur de lissage C_L (10nF). 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.

Pour chacune des grandeurs d'influence investiguées dans le cadre de ce travail, une série de 20 essais a été effectuée et la valeur retenue de la tension d'éjection de chacune des gouttes d'eau est la moyenne arithmétique de l'ensemble de celles obtenues sur la même série de mesure. Vu la très bonne répétitivité des techniques de mesure employées dans cette étude, l'erreur maximale relative obtenue est de l'ordre de 5 % de cette valeur moyenne [69,70].

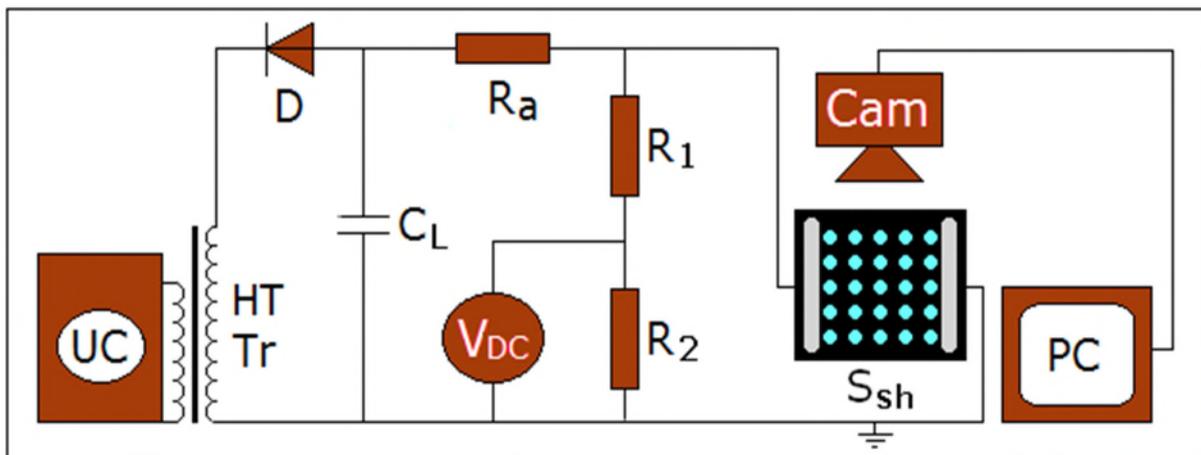


Fig. III. 11: Schéma de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes

III.3 Résultats expérimentaux et leur interprétation

III.3.1 Mode d'éjection des gouttes d'eau en dehors de l'isolation

Trois modes distincts d'évacuation des gouttes d'eau sous arrangements en zigzag et en lignes droites à l'extérieur de la surface de l'isolation superhydrophobe ont été répertoriés: évacuation individuelle, par groupes, ou bien groupe-individuelle des gouttes d'eau. Le mode d'expulsion par groupes signifie qu'elle s'effectue sous forme d'un ensemble de groupuscules de gouttes d'eau quittant séparément et successivement la surface de l'isolation. L'éjection individuelle se traduit par une expulsion une par une de l'ensemble des gouttes d'eau. Enfin le mode d'évacuation groupe-individuelle est la combinaison des deux types précédents et consiste en une expulsion successive d'un ensemble de groupuscules de gouttes d'eau, accompagnés chacun d'eux, parfois, d'une goutte d'eau individuelle.

Pour ce qui est du sens du déplacement des gouttes, celui-ci a lieu dans les deux directions, c'est-à-dire, vers les électrodes sous tension et terre. Il résulte de la visualisation du mode

d'éjection des gouttes d'eau, une apparition plus fréquente du mode d'expulsion groupo-individuelle et bidirectionnelle de celles-ci.

La figure III. 12 résume certaines phases importantes du mode d'éjection groupo-individuelle et bidirectionnelle de vingt cinq gouttes d'eau, arrangées en lignes droites. La figure III. 12a illustre l'arrangement en lignes droites de 25 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe hors tension. L'image de la figure III.12b correspond à une phase où 5 gouttes d'eau de la rangée avoisinant l'électrode sous tension, ont été expulsées à l'extérieur de l'isolation sous tension appliquée $U_a = 2,4$ kV. La figure III.12c montre la disparition de 5 gouttes d'eau de la rangée proche de l'électrode terre et 2 gouttes de celle sous tension.

Surface superhydrophobe sans gouttes d'eau	Nombre d'essais	Tension de contournement à sec	Conditions atmosphériques
Plaque n° 1	20	43,4 kV	$P_a=1008$ hPa, $H_r = 55$ %, $\Theta = 22$ °C

Tab. III. 1: Tension de contournement à sec de l'isolation superhydrophobe

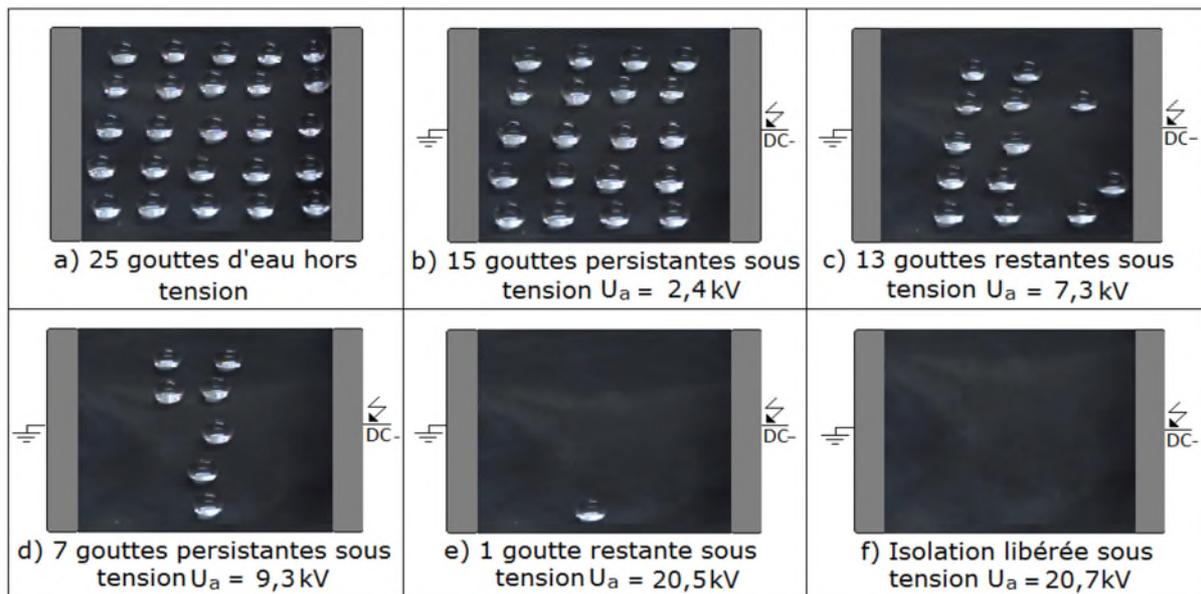


Fig. III. 12: Etapes essentielles d'éjection groupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites sans couvert ($V_d = 30$ μ l, $C_k = 0$ g/l, $\sigma_v = 50$ μ S/cm)

La figure III. 12 d illustre la persistance de 7 gouttes sous tension $U_a = 9,3$ kV. La figure III.12e montre la persistance d'une goutte d'eau de la rangée du milieu de l'isolation sous tension $U_a = 20,5$ kV. La figure III. 12f donne l'image d'une surface débarrassée de toutes ses

gouttes évacuées équitablement des côtés des électrodes sous tension et terre sous tension $U_a = 20,7$ kV.

L'évolution de la tension d'expulsion en dehors de l'isolation de 5 rangées x 5 gouttes d'eau en fonction de leur rang et du lieu de destination des gouttes d'eau via l'électrode sous tension (HT) ou terre (T) est illustrée par la figure III. 13.

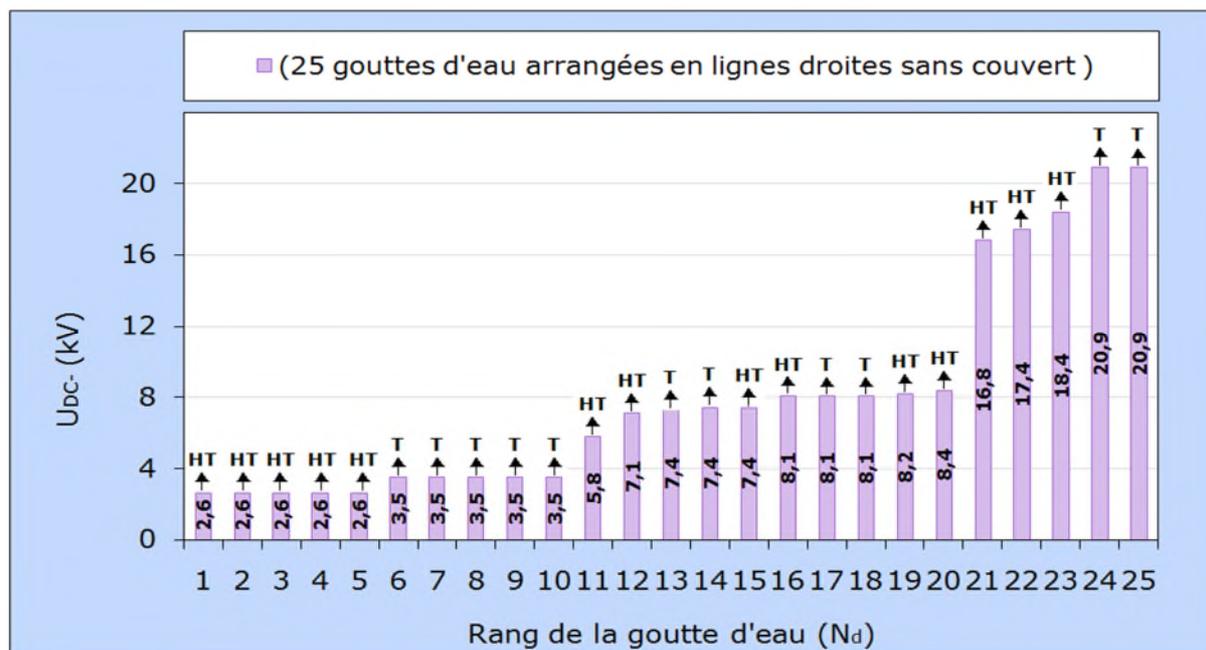


Fig. III. 13: $U_{DC} = f(N_d)$ pour un arrangement en lignes droites de 5 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0\text{g/l}$, $\sigma_v = 50\mu\text{S/cm}$)

Cette dernière donne l'histogramme caractérisant la tension d'éjection en fonction du numéro de la goutte d'eau évacuée de la surface de l'isolation. Cet histogramme reflète un mode d'évacuation grupo-individuelle bidirectionnelle de gouttes d'eau. Celui-ci est subdivisé en 12 séquences. La première est caractérisée par une éviction d'un groupe de 5 gouttes d'eau de la surface de l'isolation, via l'électrode HT, sous une tension $U_a = 2,6$ kV. Lors de la deuxième séquence, un ensemble de 5 gouttes d'eau est évacué à l'extérieur de cette dernière, via l'électrode terre, sous une tension $U_a = 3,5$ kV. Ce groupe est suivi par l'évacuation d'un ensemble de 2 gouttes d'eau via l'électrode HT. Lors de cette séquence, ces gouttes ont quitté l'isolation individuellement sous tensions égales respectivement à $U_a = 5,8$ kV et $U_a = 7,1$ kV. Ensuite, 3 gouttes d'eau ont été évincées de l'isolation sous une tension égale à 7,4 kV, 2 transitant par l'électrode terre et 1 par l'électrode HT. Cette séquence est suivie d'une éjection de 3 gouttes d'eau sous tension $U_a = 8,1$ kV, dont 2 via l'électrode terre et 1 via l'électrode HT. Lors des séquences suivantes, une succession d'évacuation individuelle de 5 gouttes sous

des tensions d'application différentes ($U_{a1}= 8,2$ kV, $U_{a2}= 8,4$ kV, $U_{a3} = 16,8$ kV, $U_{a4} = 17,4$ kV, $U_{a5}= 18,4$ kV) en transitant par l'électrode HT. La libération de la surface de l'isolation a lieu suite à l'évacuation des 2 dernières gouttes sous tension $U_a = 20,9$ kV via l'électrode terre.

Sachant que la tension efficace de contournement de l'isolation sans gouttes d'eau est égale à 43,4 kV, il résulte des figures III. 12 et III. 13 que la tension d'expulsion en dehors de l'isolation de la dernière goutte est égale à 48,16 %, de la tension de l'isolation à l'état sec.

Selon la figure III.14, une évacuation des gouttes d'eau de l'isolation est similaire à celle de l'arrangement en lignes droites sans couvert. La seule différence réside au niveau de la valeur de la tension d'éjection, qui est légèrement plus faible dans ce cas de figure. Sa valeur est de l'ordre de 38,7 % de la tension de contournement de l'isolation sans gouttes (Figs. III. 14 et III. 18). Ceci est dû au fait que le matériau considéré est couvert par une isolation en verre. Cette couverture repousse les lignes de champ vers les gouttes d'eau, ce qui fait diminuer leur tension d'évacuation de l'isolation.

La figure III.15 illustre l'allure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau en fonction de leur rang et du lieu de leur récupération via l'électrode sous tension (HT) ou terre (T). Son histogramme se résume en 8 séquences d'éjection des gouttes d'eau en dehors de l'isolation.

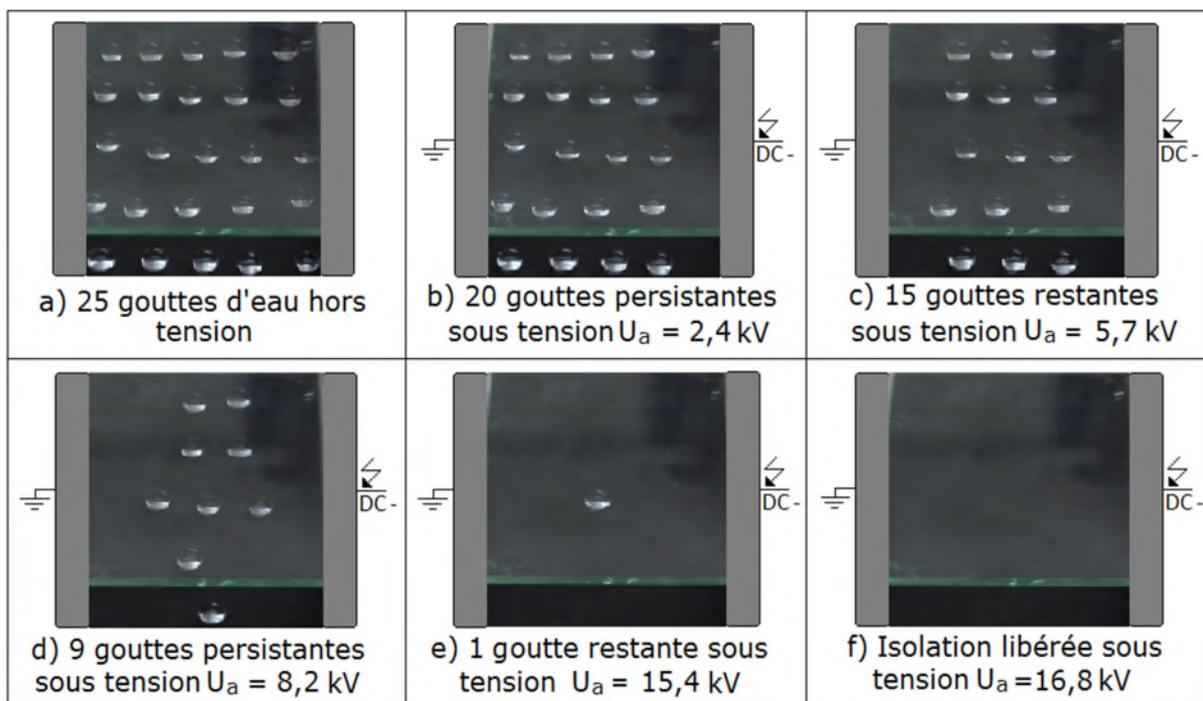


Fig. III. 14: Etapes essentielles d'éjection groupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites avec couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0\text{g/l}$, $\sigma_v = 50\mu\text{S/cm}$)

Les figures III. 16 et III. 17 représentent respectivement les phases essentielles d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation et l'histogramme de tension d'éjection des gouttes d'eau en dehors de sa surface en fonction de leur rang et du lieu de leur destination via l'électrode sous tension (HT) ou terre (T). Il existe une similitude entre les images illustrées d'une part par les figures III. 12 et III. 16 et d'autre part par les figures III. 14 et III. 17. La seule différence réside au niveau de la tension d'éviction des gouttes d'eau en dehors de l'isolation. Celle-ci est plus faible dans le cas d'un arrangement des gouttes d'eau en zigzag que celui d'un arrangement en lignes droites.

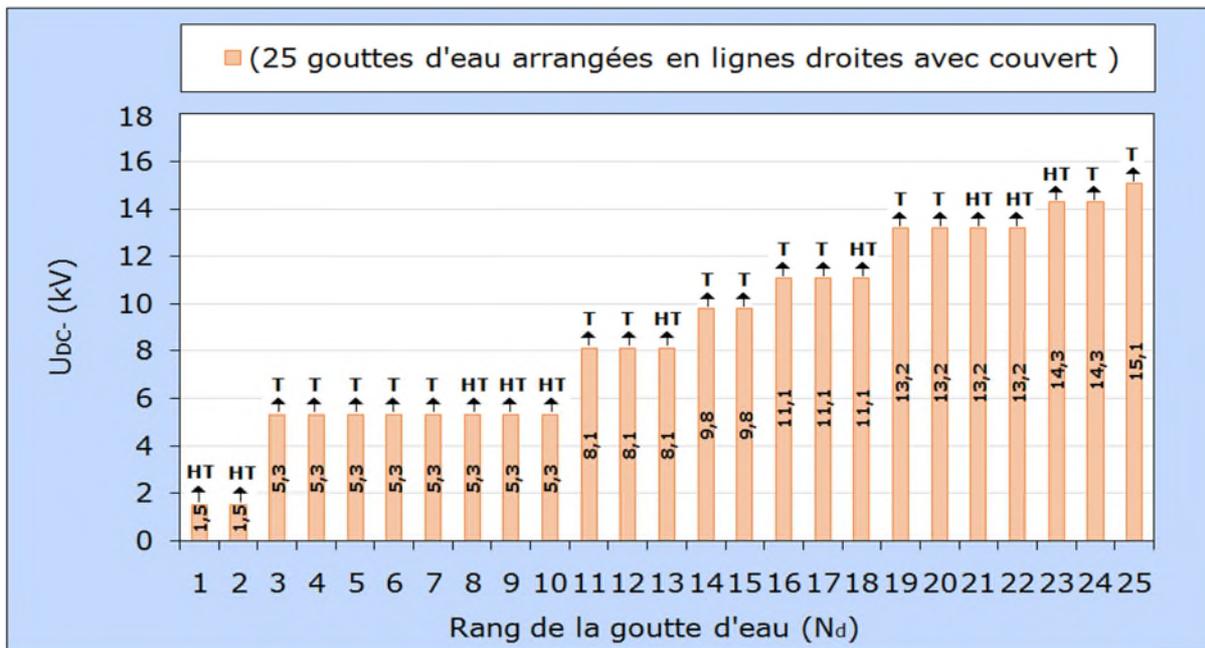


Fig. III. 15: $U_{DC} = f(N_d)$ pour un arrangement en lignes droites de 5 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe avec couvert ($V_d = 30 \mu l$, $C_k = 0 g/l$, $\sigma_v = 50 \mu S/cm$)

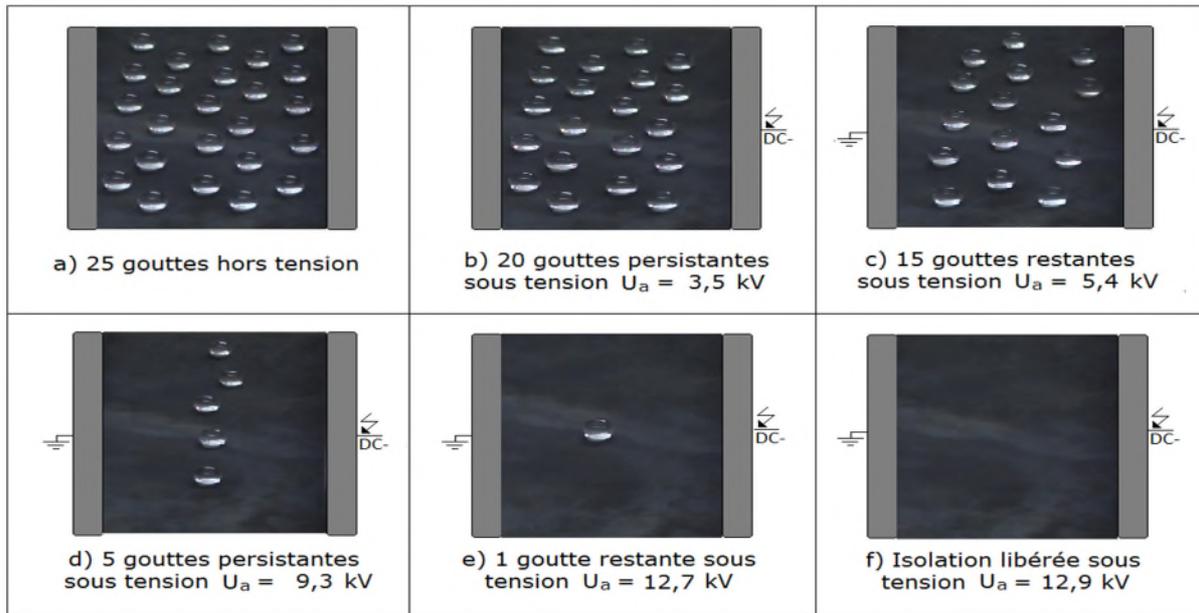


Fig. III. 16: Phases essentielles d'expulsion de 25 gouttes d'eau sous arrangement en lignes zigzag sans couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0\text{g/l}$, $\sigma_v = 50\mu\text{S/cm}$)
 La tension d'évacuation de la dernière goutte sous arrangement zigzag est de 27,2 % de celle de l'isolation à l'état sec (Figs. III.17 et III. 19).

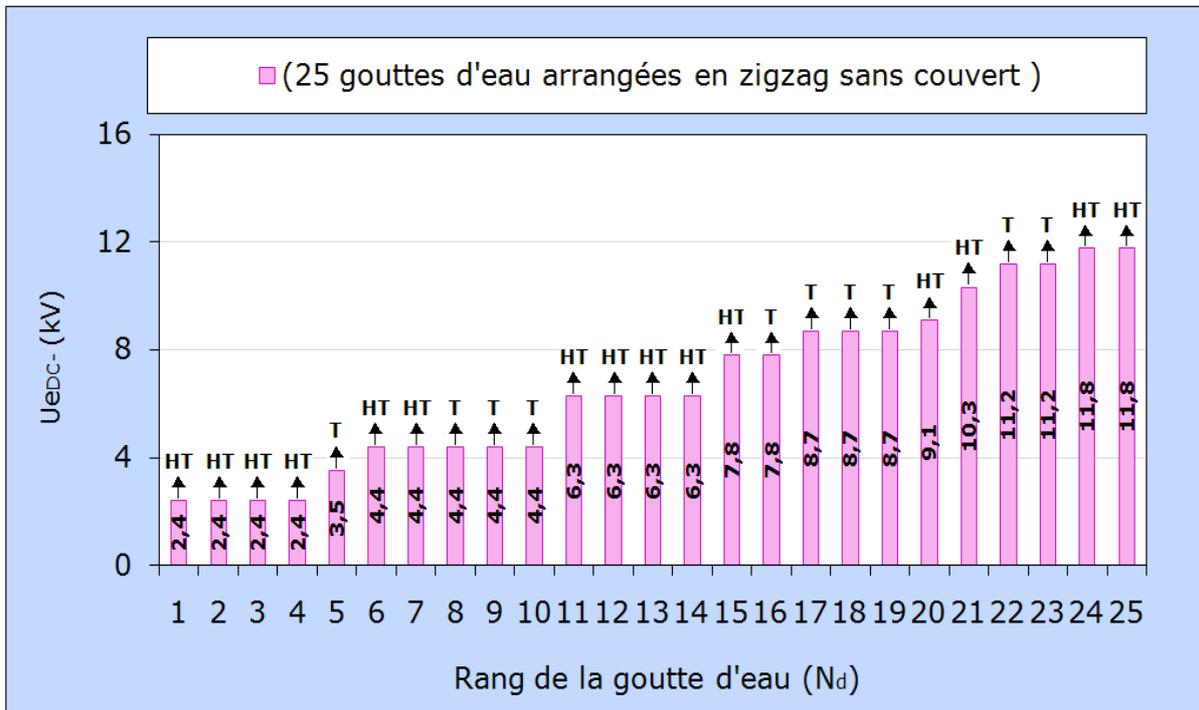


Fig. III. 17: $U_{DC-} = f(N_d)$ pour un arrangement en zigzag de 25 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert ($V_d = 30 \mu\text{l}$, $C_k = 0\text{g/l}$, $\sigma_v = 50\mu\text{S/cm}$)

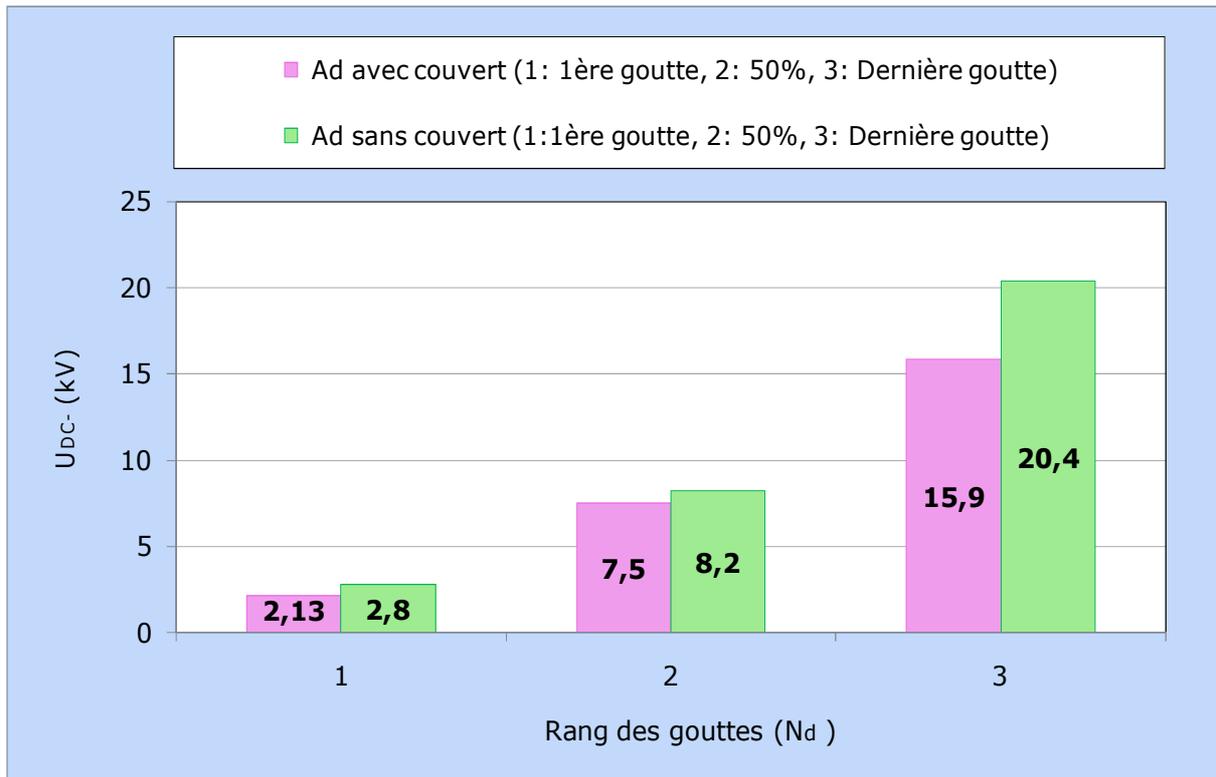


Fig. III. 18: Tension d'expulsion des gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites en fonction de leur position et du degré de couverture (A_d : arrangement en lignes droites)

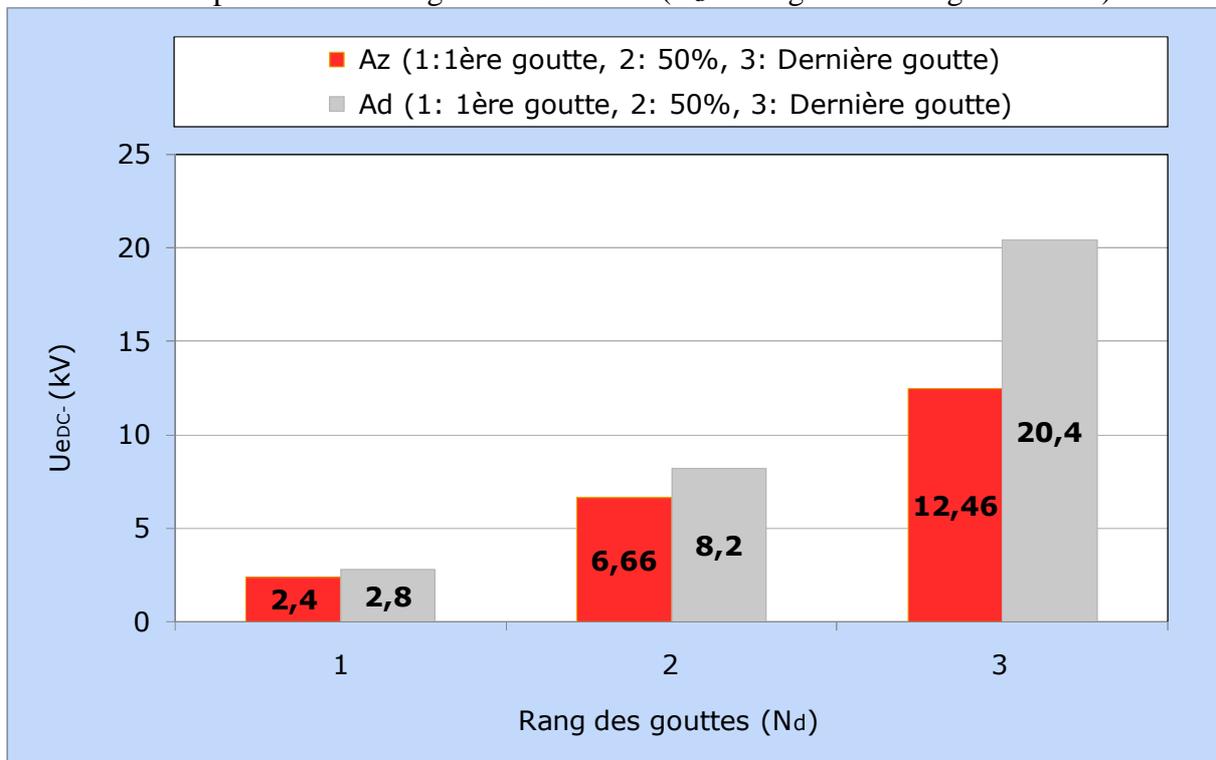


Fig. III. 19: Tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction de leur position et de leur mode d'arrangement (A_z : arrangement en zigzag)

Quel que soit le mode d'évacuation des gouttes d'eau en lignes droites avec ou sans couverture de l'isolation ou bien en zigzag, aucune création de décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation et aucun signe d'altération apparente de la surface de l'isolation n'a été détecté. La constance de la valeur de l'angle de contact de l'isolation, mesuré en fin de chaque série d'essais, dénote la rétention de la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude.

III.3. 2 Nombre de rangées de gouttes d'eau et leur localisation sur l'isolation

Dans le cas d'un arrangement en zigzag d'une rangée de gouttes d'eau, l'enchaînement de leur évacuation intéresse d'abord les deux gouttes situées du côté HT et terre, ensuite viennent celles se trouvant à l'intérieur de la rangée (Figs. III. 20 et III. 21).

La figure III. 22, donne l'allure des tensions d'éjection de la première goutte, la goutte médiane et la dernière goutte en fonction du nombre de rangées en parallèle le long de la ligne de fuite de l'isolation. Il en résulte que la tension d'éviction en dehors de l'isolation de la première goutte est indépendante de nombre de rangées apporté sur la surface de l'isolation. Sa valeur est de l'ordre de 3kV, ce qui correspond à 7 % de la tension de contournement de l'isolation à l'état sec.

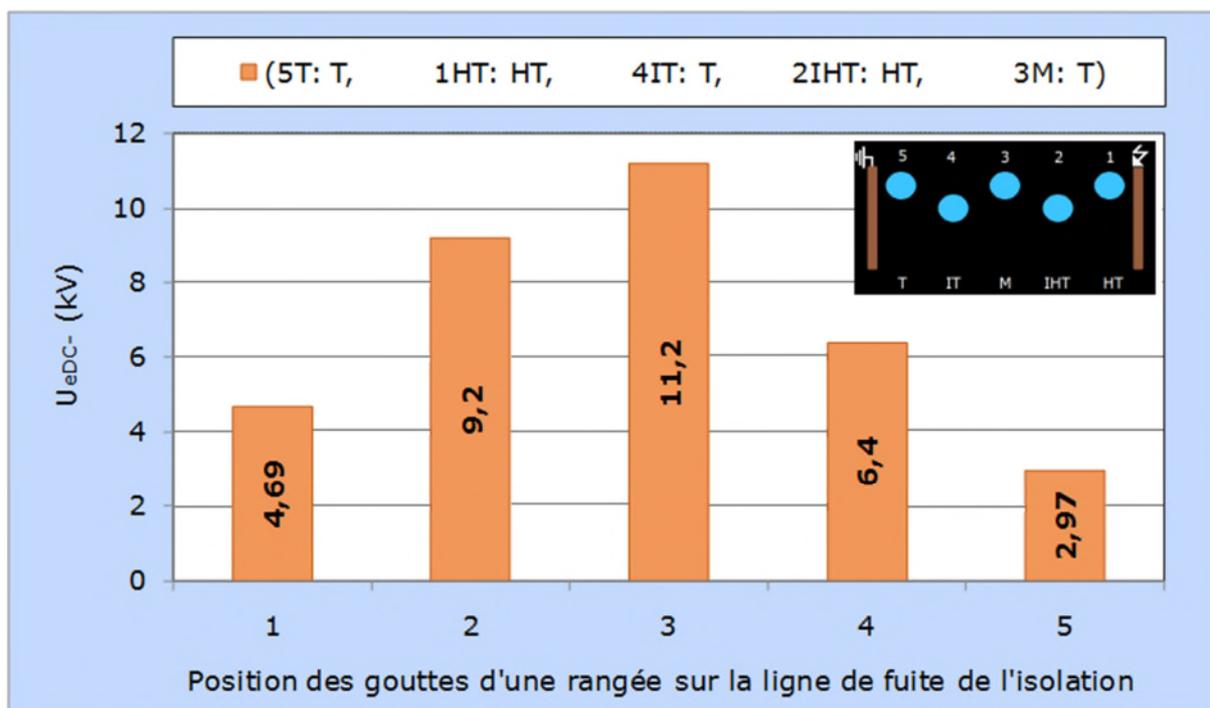


Fig. III. 20: Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation (3 gouttes vers la terre, 2 gouttes vers HT)

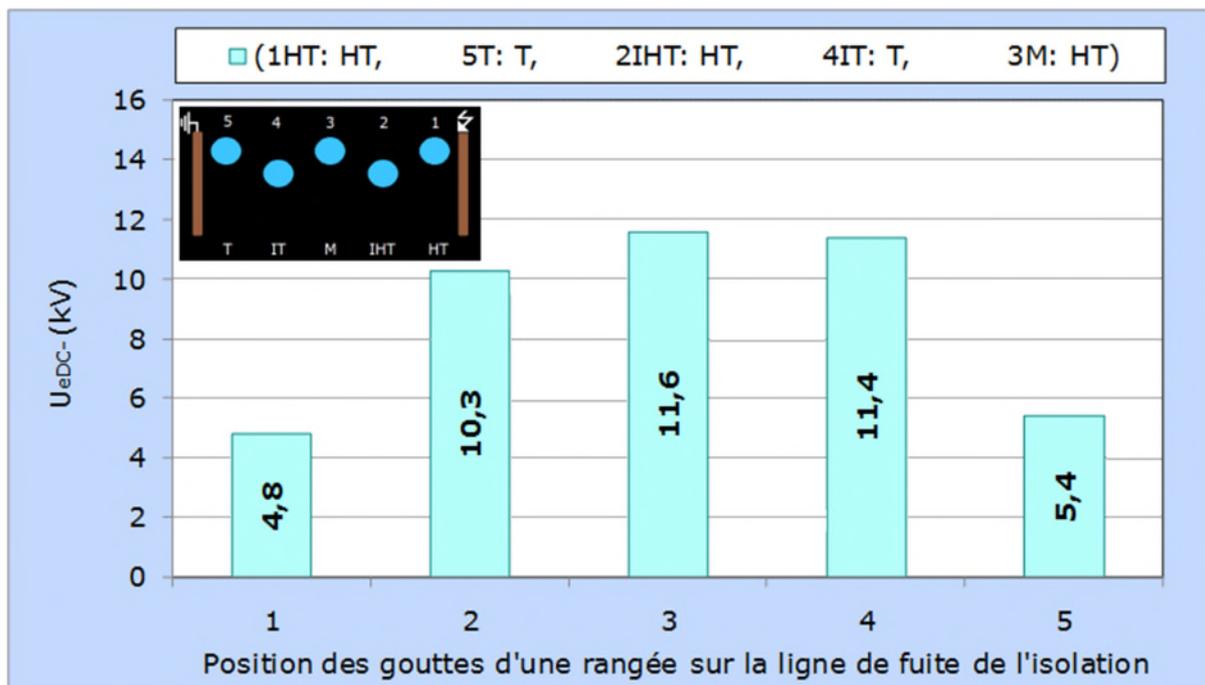


Fig. III. 21: Tension d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation (HT: haute tension, T: Terre, IHT: Intermédiaire à l'électrode haute tension, IT: Intermédiaire à l'électrode terre)

La tension d'évacuation de la goutte médiane est, pratiquement constante quel que soit le paramètre suscit, la tension de son expulsion est égale à 6,5 kV, ce qui est équivalent à 15% de la tension de contournement de l'isolation sans gouttes. Par contre la tension d'éviction de la dernière goutte à l'extérieur de l'isolation est légèrement croissante. La tension maximale de son expulsion est de l'ordre de 13 kV, ce qui correspond à 30 % de la tension de contournement de l'isolation à l'état sec.

Il est à remarquer que la variation du nombre de rangées de gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur la création de décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation et son altération. La stabilité de l'angle de contact du matériau, confirme la rétention de sa superhydrophobie.

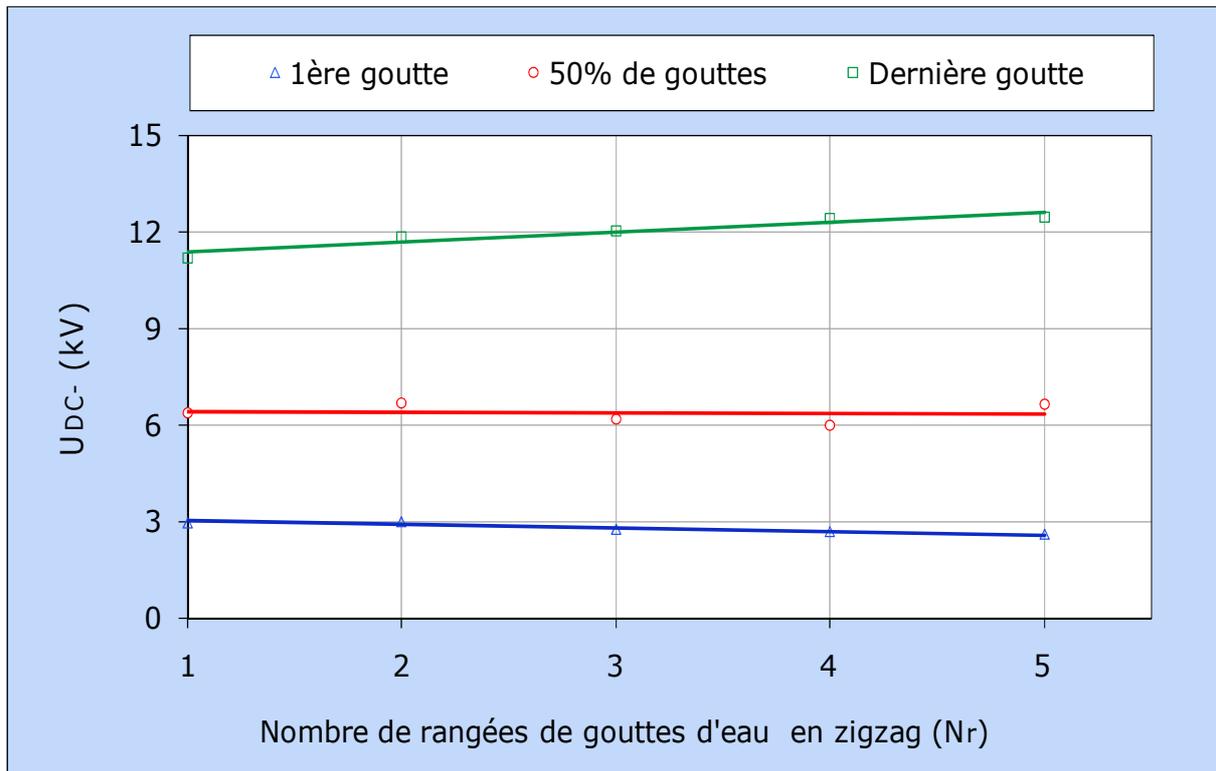


Fig. III. 22: Tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction du nombre de rangées sous arrangement en zigzag

Les figures III.23 et III.24 montrent un déclin de la tension d'évacuation de la dernière goutte d'eau en fonction de leur volume jusqu'à une valeur limite égale à $40 \mu\text{l}$. Au delà de cette limite, celle-ci demeure pratiquement constante quel que soit le volume varié. Il résulte de ces figures que la tension d'éjection de la dernière goutte est plus grande lorsque celle-ci se trouve au milieu de l'isolation que du côté terre ou du côté HT. La tension d'évacuation de la dernière goutte d'eau en dehors de l'isolation avec couverture est plus faible que celle sans couvert quel que soit l'arrangement. Il découle de ces figures qu'un petit volume nécessite une tension d'expulsion plus grande que lorsque le volume est plus élevé (Fig. III. 25).

III.3. 3 Volume des gouttes d'eau d'une rangée et son emplacement sur l'isolation

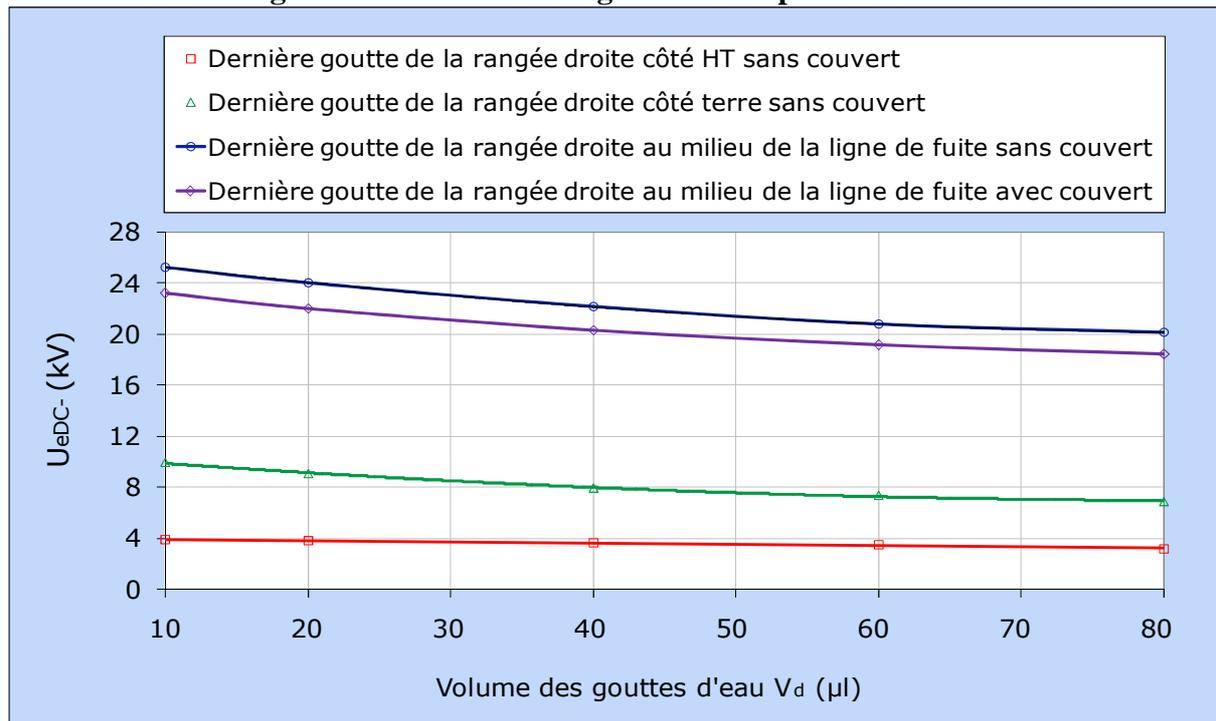


Fig. III. 23: Tension d'expulsion de la dernière goutte d'eau d'une rangée droite en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation

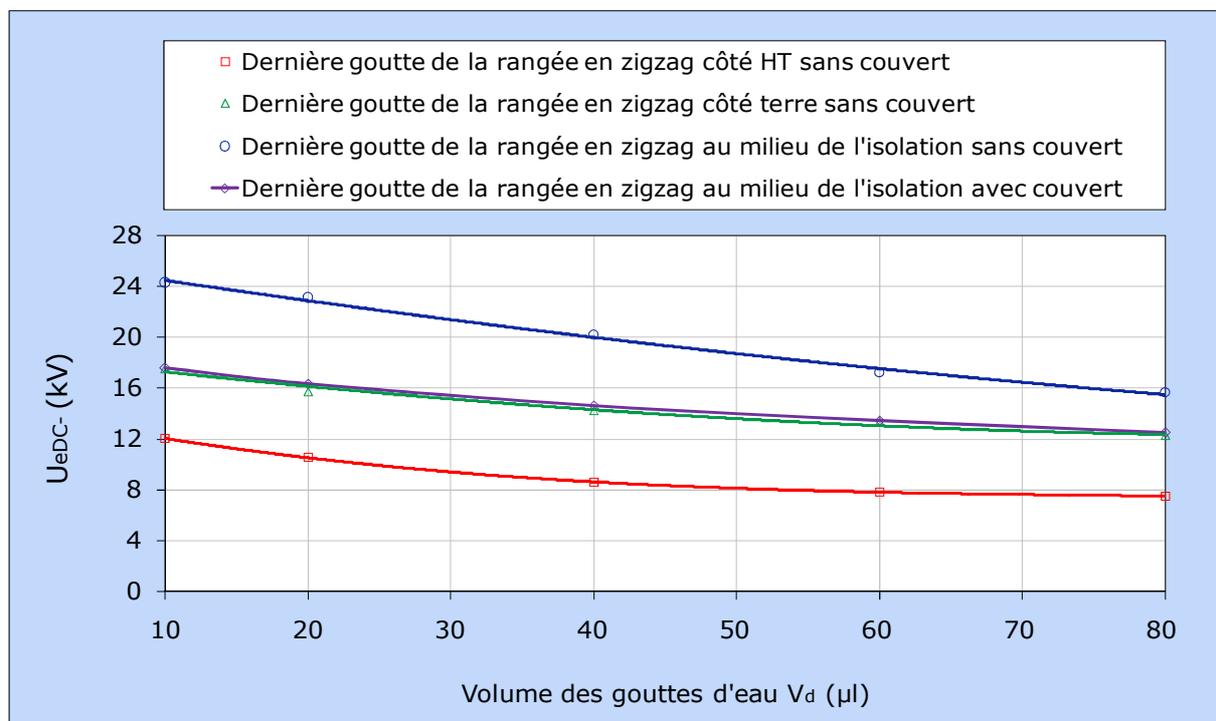


Fig. III. 24: Tension d'expulsion de la dernière goutte d'eau sous arrangement zigzag sans couvert en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation

Ceci peut être expliqué par le fait que les gouttes du petit volume s'encastrent entre les aspérités de la surface superhydrophobe par contre, les gouttes de grand volume restent sur les sommets des aspérités ce qui facilite leur éjection.

Les figures III. 26, III. 27, III. 28, III. 29 et III. 30 montrent les différentes phases d'évacuation des gouttes d'eau à volume égal à 10 et 80 μl d'une rangée à position interélectrode variable. Il est à remarquer, l'éjection d'abord des gouttes extrêmes de la rangée (III. 26b, III. 27b, III. 28b et III. 29b), ensuite vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de l'isolation indépendamment du degré de couverture (III. 26c, III. 27c, III. 28c et III. 29c).

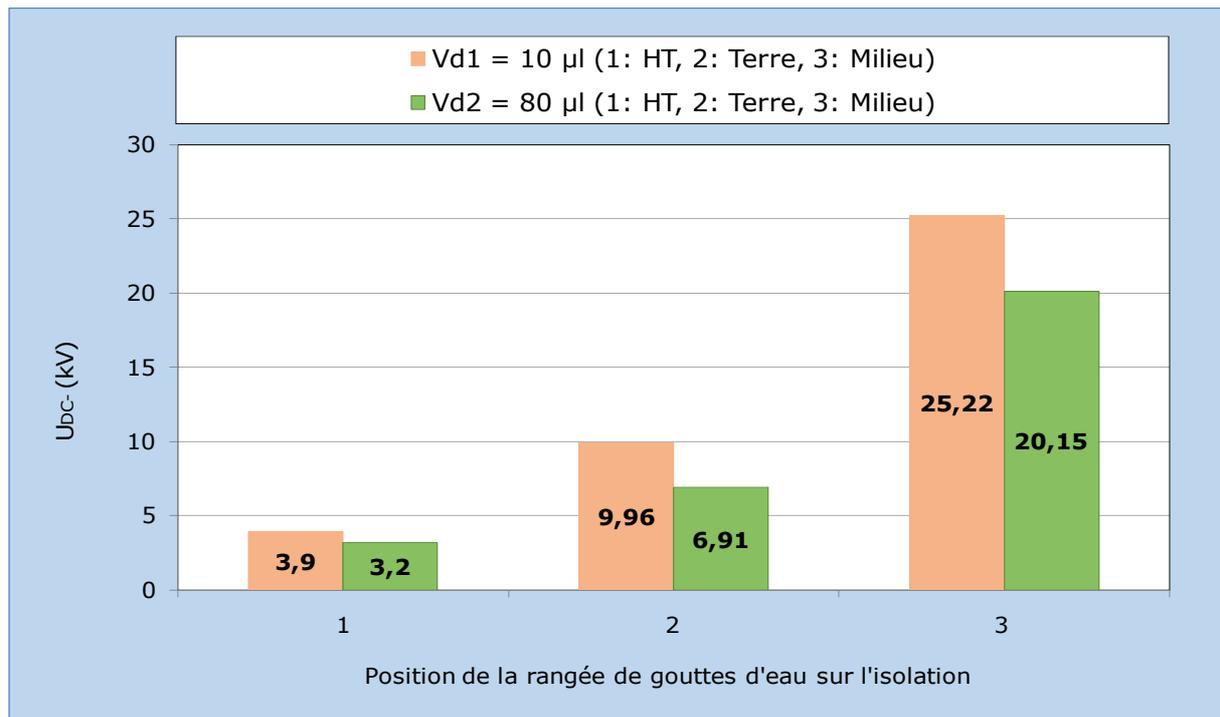


Fig. III. 25: Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur volume et position sur l'isolation

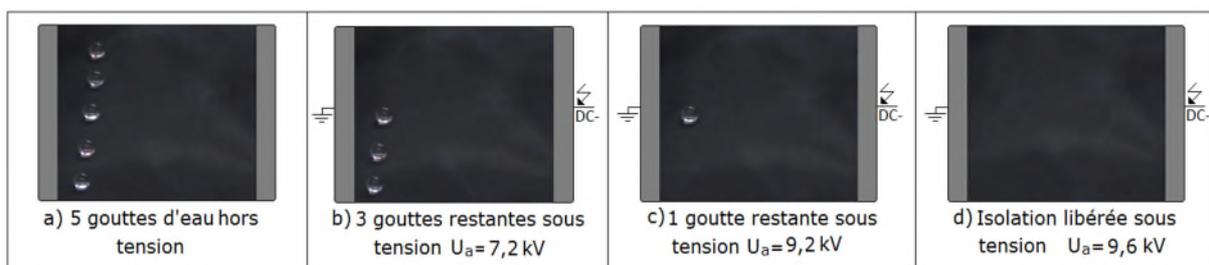


Fig. III. 26: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté terre ($V_d = 10 \mu\text{l}$)

Il ressort de ces résultats que, certes, un petit volume des gouttes d'eau nécessite une tension d'évacuation plus élevée, mais celle-ci ne dépasse pas 58 % de la tension de contournement de l'isolation à sec. Il est à constater dans ce cas l'absence de toute forme de décharge électrique pouvant engendrer tout vieillissement précoce du matériau. Ceci a été confirmé par la conservation de son angle de contact et par conséquent, sa superhydrophobicité.

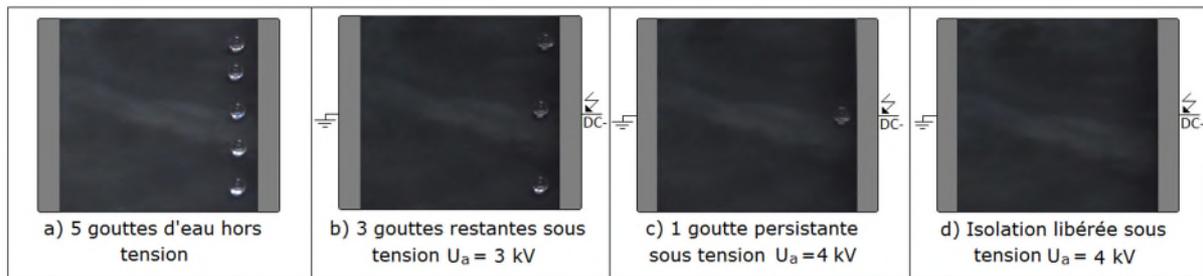


Fig. III. 27: Phases d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté HT ($V_d = 10 \mu\text{l}$)

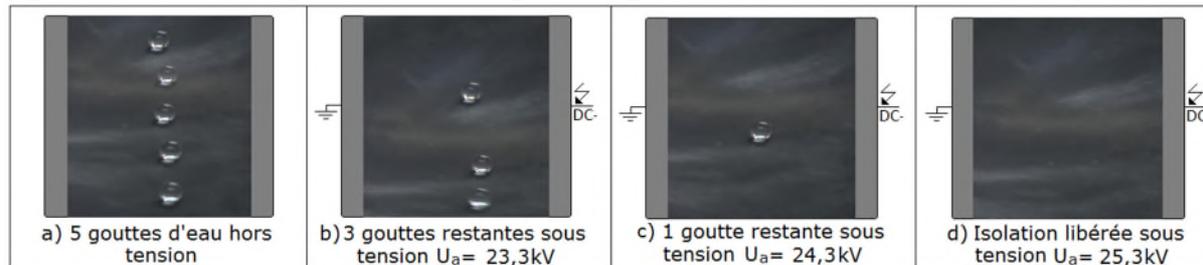


Fig. III. 28: Etapes d'évacuation de 5 gouttes au milieu de l'isolation sans couvert ($V_d = 10 \mu\text{l}$)

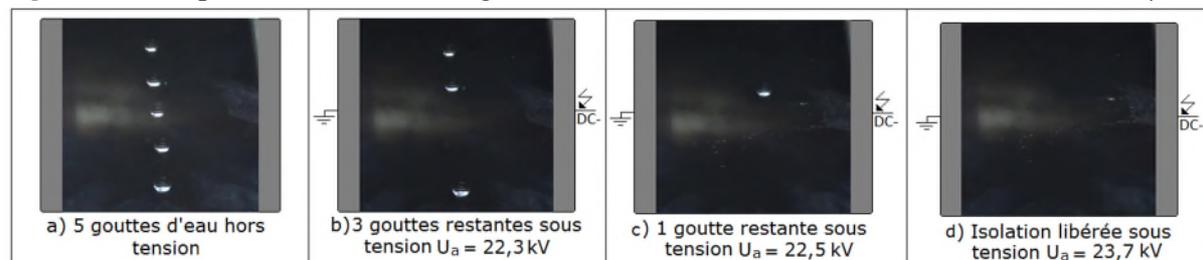


Fig. III. 29: Principales étapes d'évacuation d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite de l'isolation avec couvert ($V_d = 10 \mu\text{l}$)

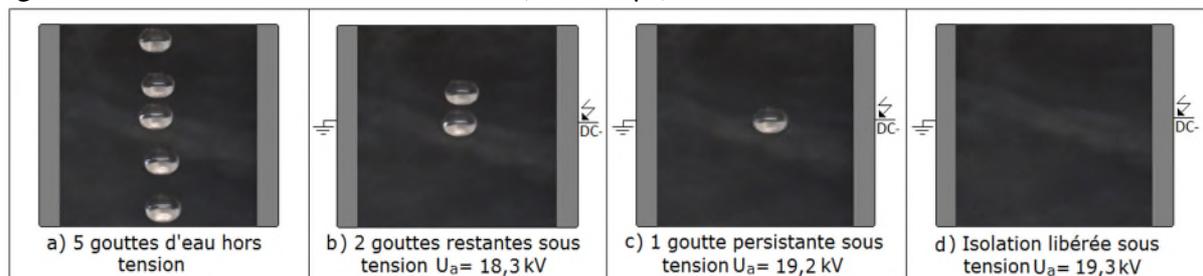


Fig. III. 30: Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de ligne de fuite de l'isolation sans couvert ($V_d = 80 \mu\text{l}$)

III.3. 4 Conductivité électrique des gouttes d'eau et leur position sur l'isolation

Les figures III.31, III. 32, III. 33 et III. 34 donnent l'allure des tensions d'éjection de la première goutte, la médiane et la dernière goutte d'eau en fonction de sa conductivité électrique sous arrangement en ligne droite en variant sa position sur la surface de l'isolation et le degré de couverture de cette dernière (HT, terre, milieu sans ou avec couvert). La figure III. 35 donne un histogramme de comparaison de la tension d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation, pour deux conductivités électriques, faible ($\sigma_v = 0,5$

mS/cm) et forte ($\sigma_v = 20$ mS/cm) et pour trois positions différentes. Il en découle que la tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus petite pour une conductivité élevée quel que soit l'emplacement de la rangée sur la surface de l'isolation.

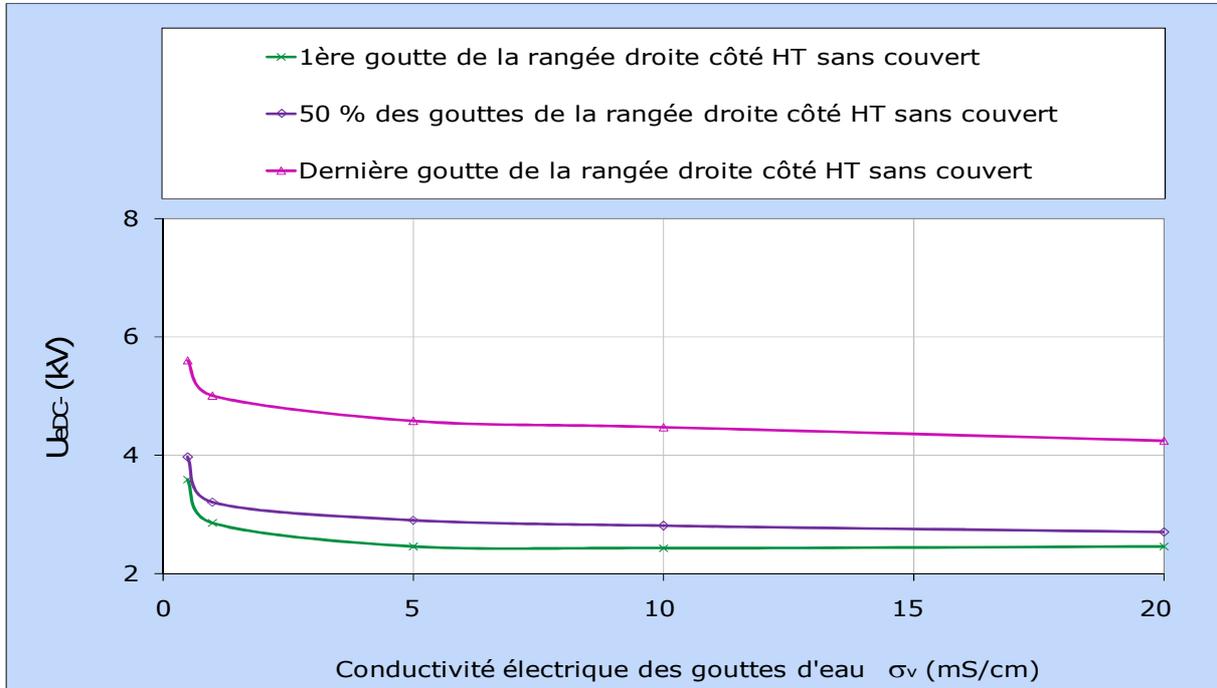


Fig. III.31: $U_e = f(\sigma_v)$ pour une rangée de 5 gouttes d'eau côté HT

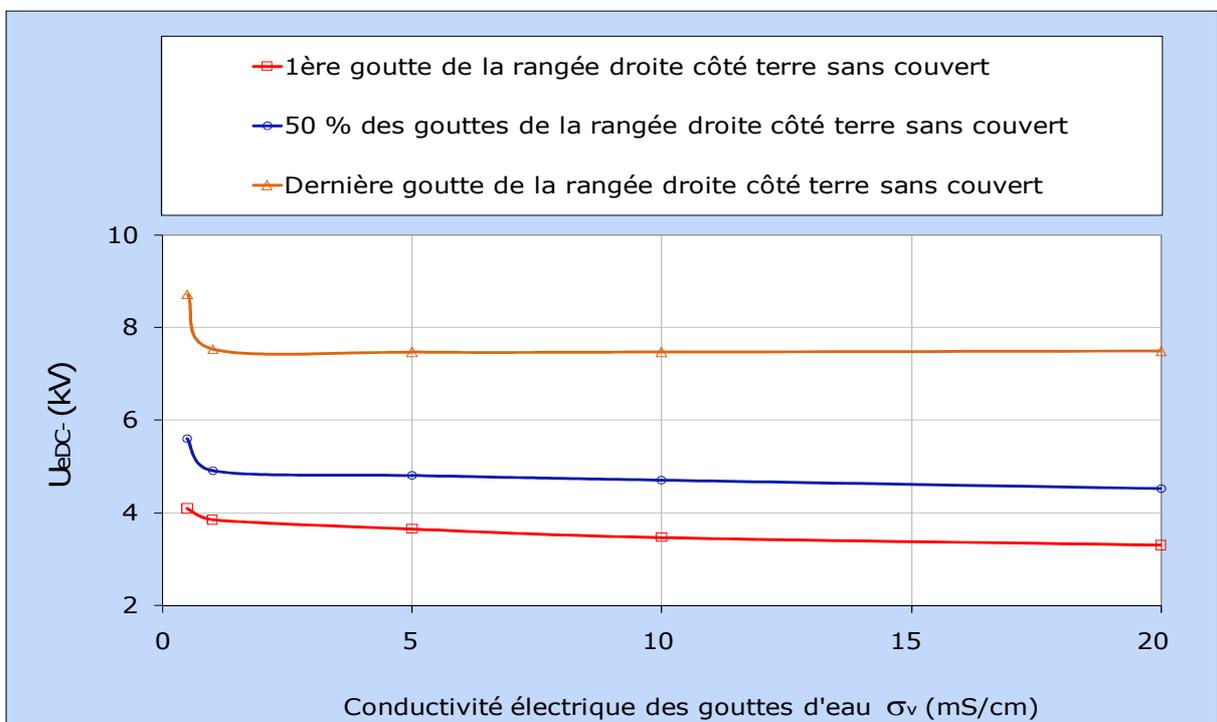


Fig. III. 32: $U_e = f(\sigma_v)$ pour une rangée de 5 gouttes d'eau côté terre

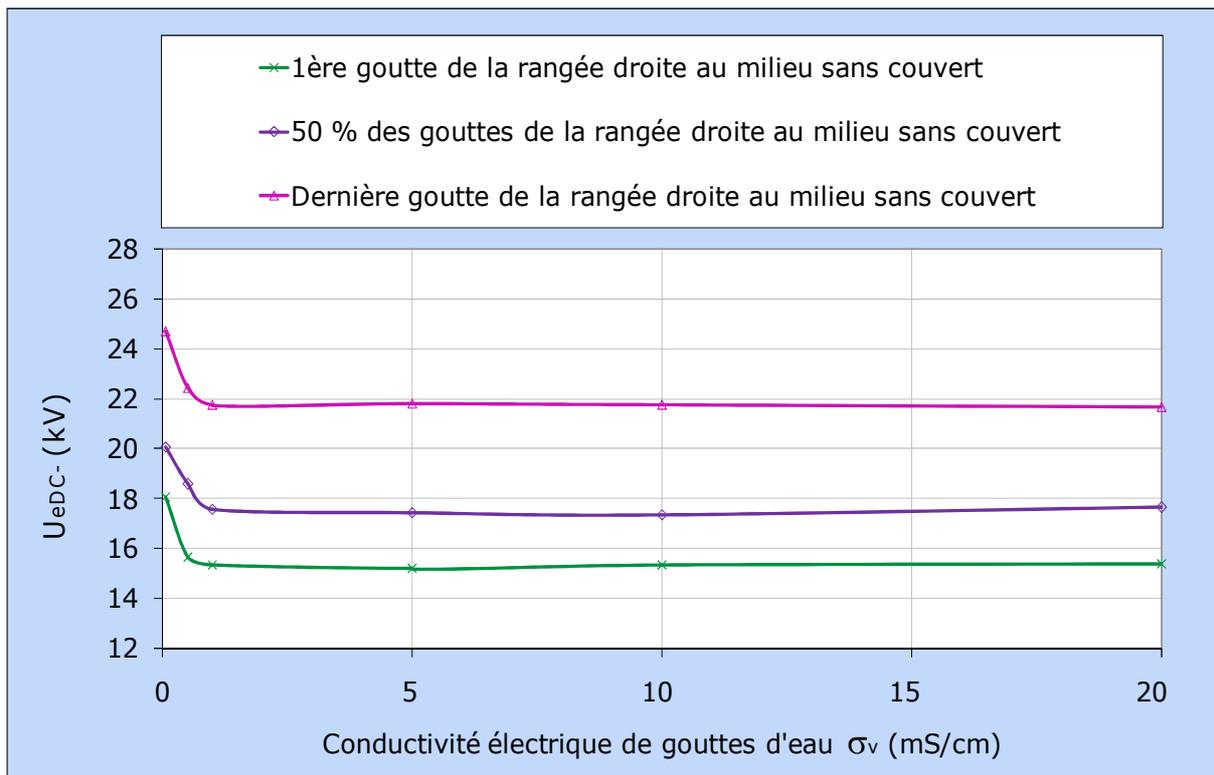


Fig. III. 33: Tension d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau sans couvert au milieu de la ligne de fuite en fonction de leur conductivité et degré de couverture

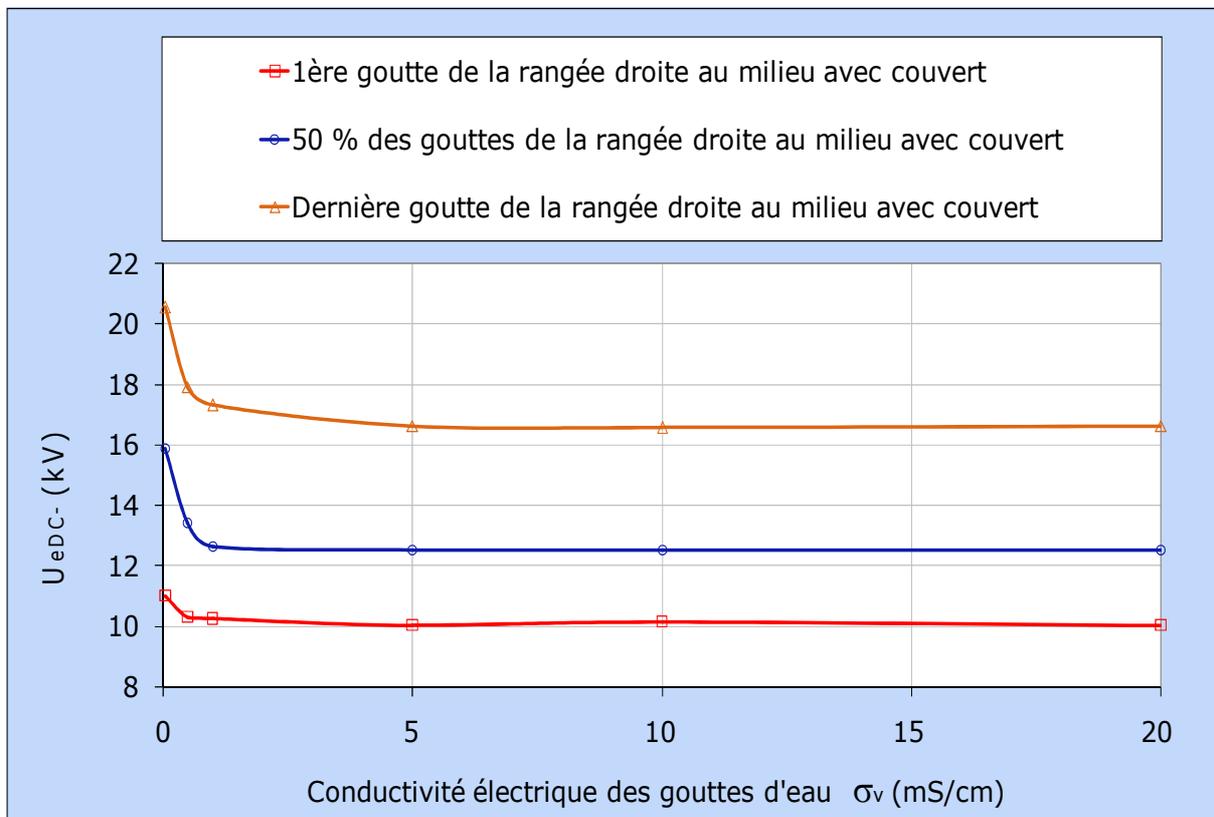


Fig. III. 34: Tension d'éviction d'une rangée de 5 gouttes d'eau avec couvert au milieu de la ligne de fuite en fonction de leur conductivité et degré de couverture

Il est à souligner que dans l'intervalle des conductivités électriques utilisées, l'éviction des gouttes d'eau, n'a à aucun moment été suivie de décharges électriques partielles et/ou de contournement du matériau pouvant entraîner son altération malgré un nombre assez élevé d'essais. Ceci est aussi confirmé par la non variation de son angle de contact.

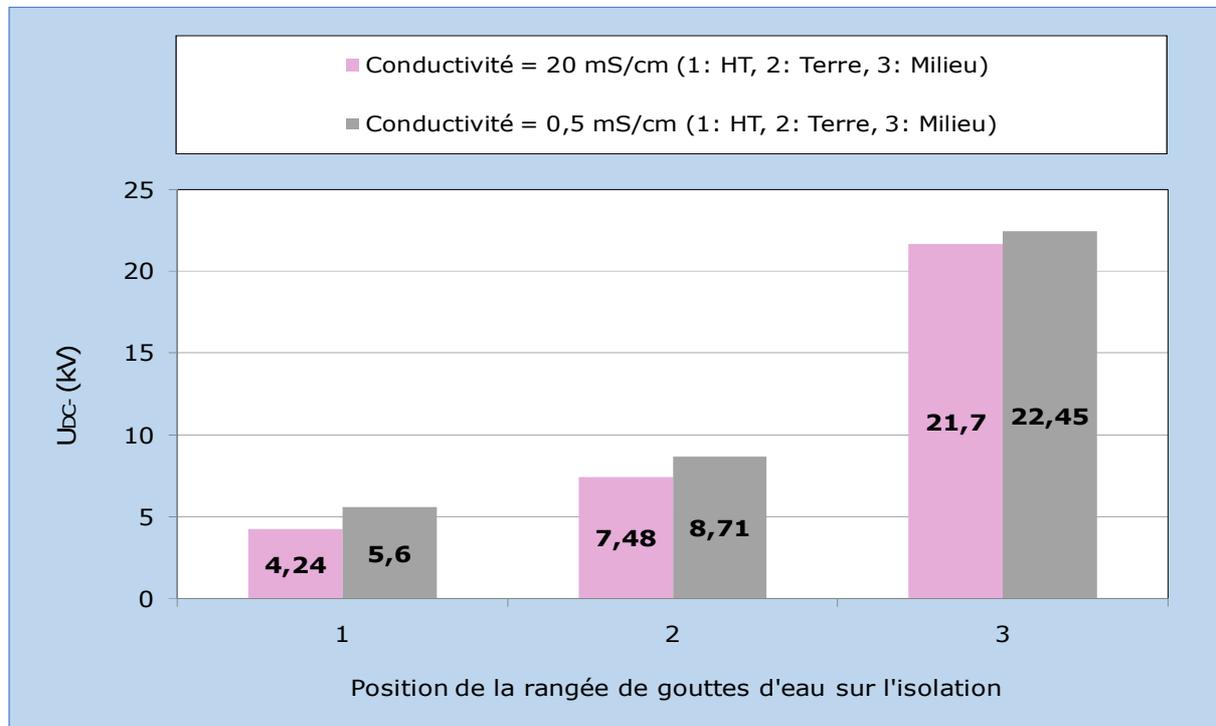


Fig. III. 35: Tension d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite en fonction de leur conductivité et position

Les figures III.36, III. 37, III.38, III. 39 et III. 40 illustrent les phases essentielles d'éjection en dehors de l'isolation de 5 gouttes d'eau pour deux conductivités différentes: $\sigma_{v1} = 0,5 \text{ mS/cm}$ et $\sigma_{v2} = 20 \text{ mS/cm}$. Il en ressort que l'éviction des gouttes intéresse en premier lieu celles situées aux extrémités de la rangée, puis vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de la rangée, indépendamment de la valeur de la conductivité considérée, la position de la rangée sur la surface de l'isolation et le degré de couverture de celle-ci.

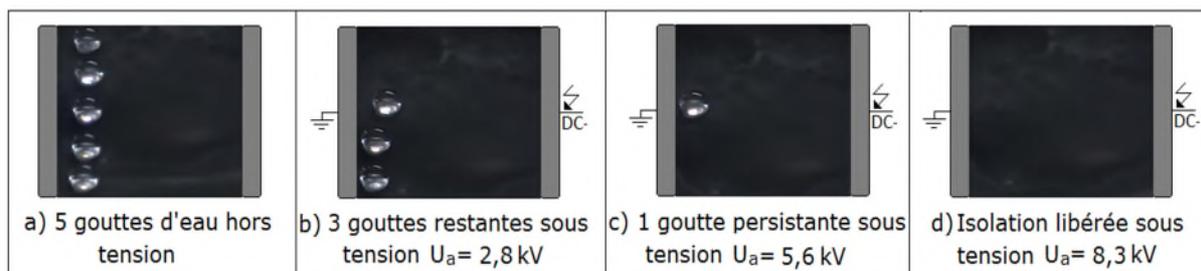


Fig. III.36: Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté terre sans couvert ($\sigma_v = 0,5 \text{ mS/cm}$)

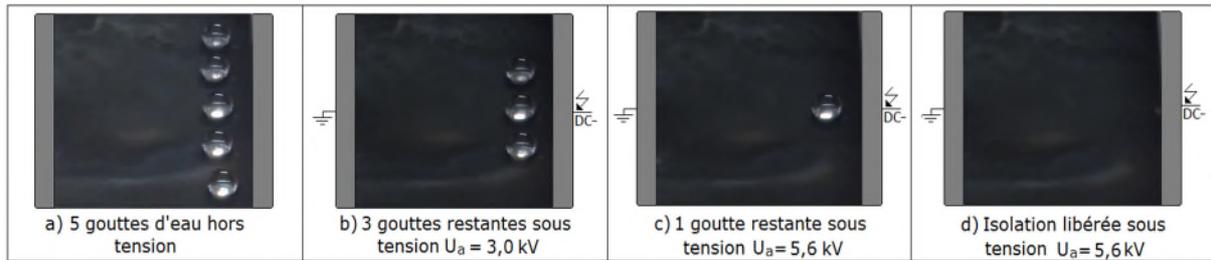


Fig. III.37:Phases essentielles d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau du côté HT sans couvert ($\sigma_v= 0,5 \text{ mS/cm}$)

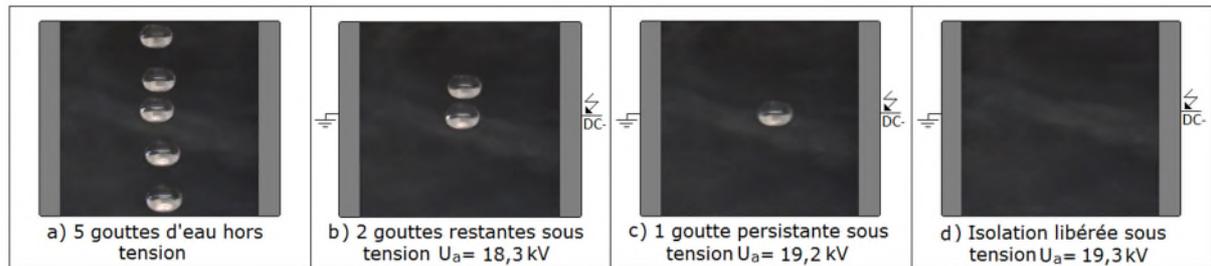


Fig. III. 38:Etapes d'éjection de gouttes au milieu du matériau sans couvert ($\sigma_v=0,5 \text{ mS/cm}$)

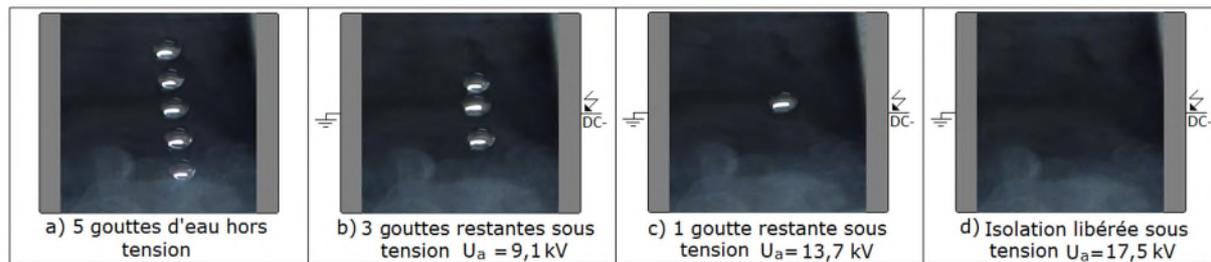


Fig. III. 39:Phases d'éviction de gouttes au milieu du matériau avec couvert ($\sigma_v=0,5 \text{ mS/cm}$)

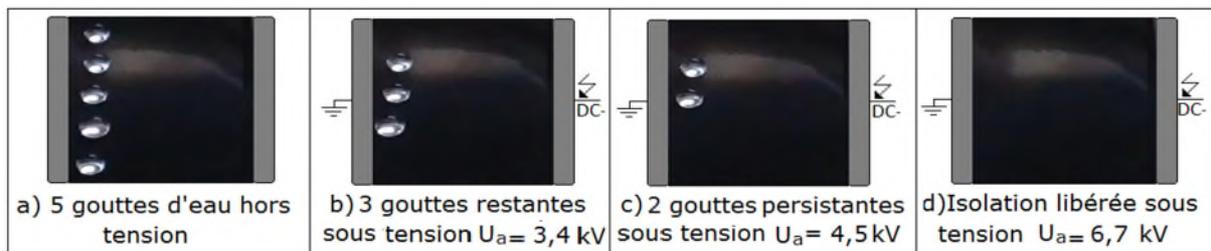


Fig.III.40:Phases d'expulsion de 5 gouttes du côté terre sans couvert ($\sigma_v= 20 \text{ mS/cm}$)

III.3. 5 Concentration en kaolin de la solution polluante

Les figures III.41,III.42,III.43 etIII.44 donnent l'évolution de la tension d'éjection de la première, la médiane et la dernière goutte d'eau en fonction du degré de concentration en kaolin de la solution utilisée et la position de la rangée sur la surface isolante superhydrophobe. Il en découle une allure strictement croissante jusqu' à une valeur limite de $C_k = 80 \text{ g/l}$. Au-delà de cette limite, celle-ci demeure pratiquement constante quels que soient la position de la rangée et le degré de couverture de l'isolation.La tension d'exclusion

des gouttes d'eau augmente au fur à mesure du déplacement de la rangée du voisinage des électrodes sous tension et terre vers le milieu de l'isolation superhydrophobe.

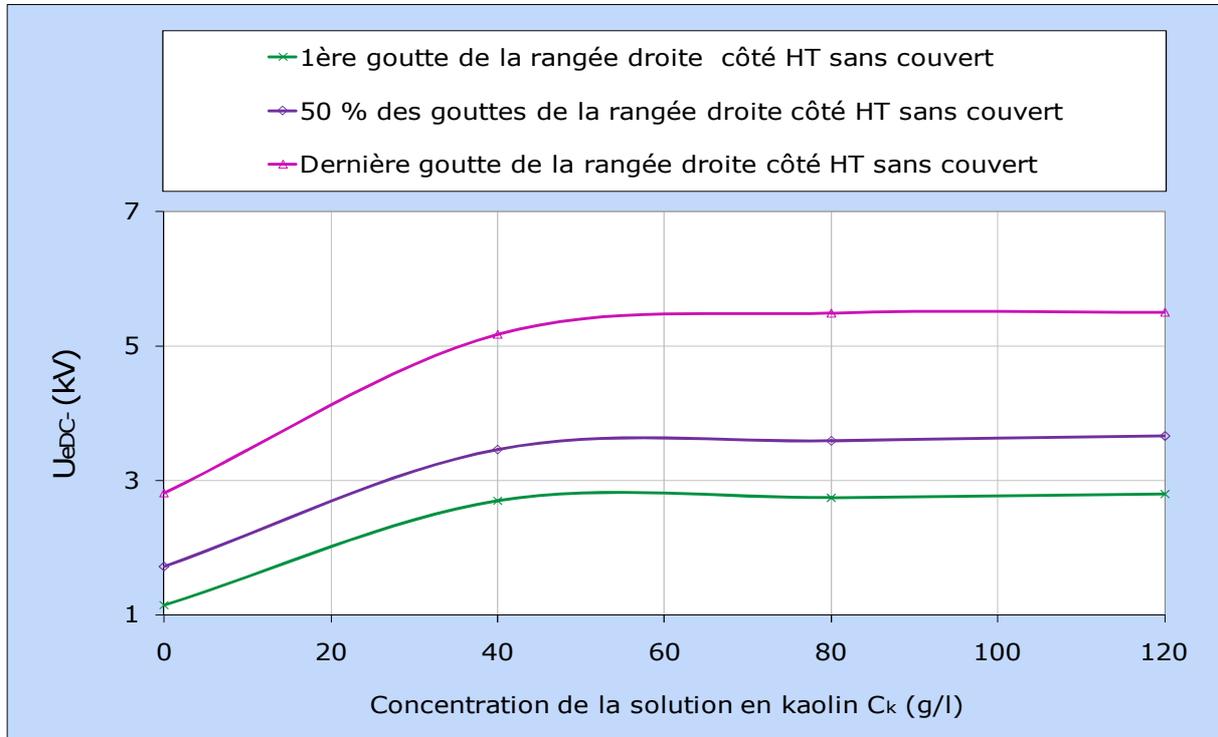


Fig. III.41: Tension d'expulsion des gouttes d'eau du côté HT en fonction de leur concentration en kaolin

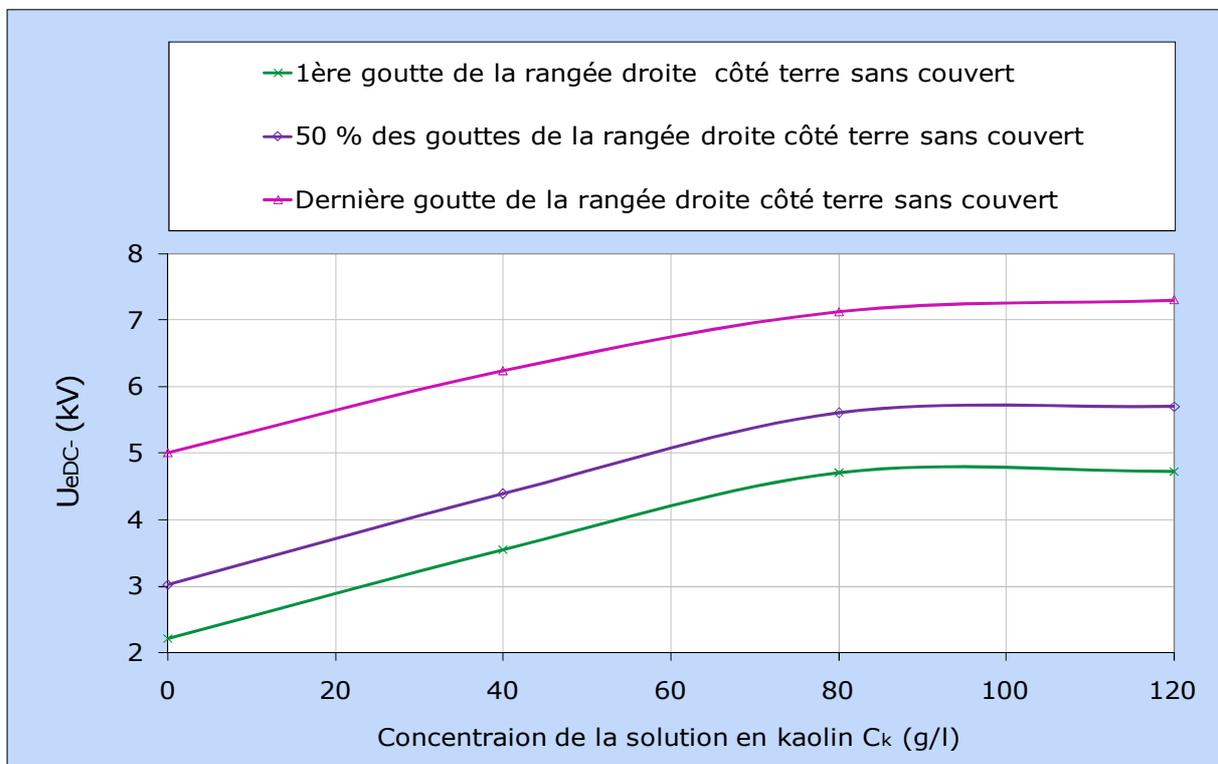


Fig. III. 42: Tension d'éviction des gouttes d'eau côté terre en fonction de leur concentration en kaolin

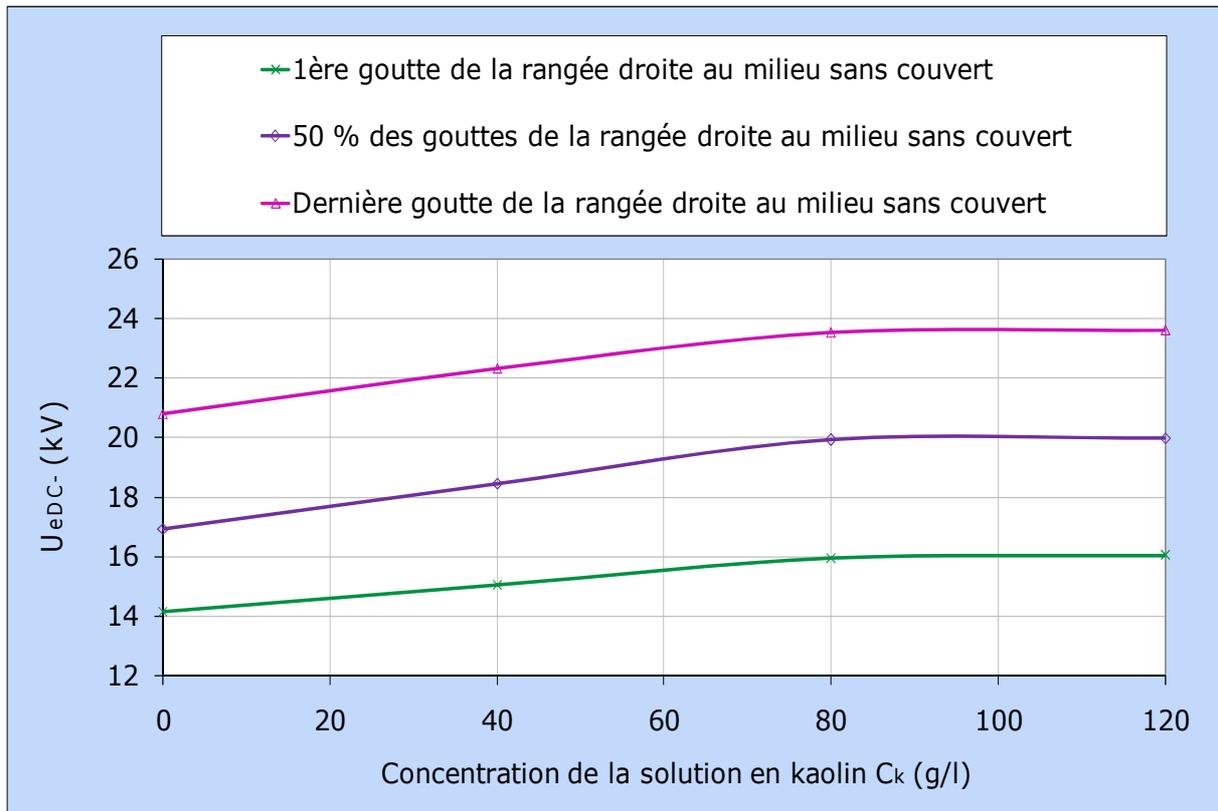


Fig. III. 43: Tension d'éjection des gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite sans couvert en fonction de leur concentration en kaolin

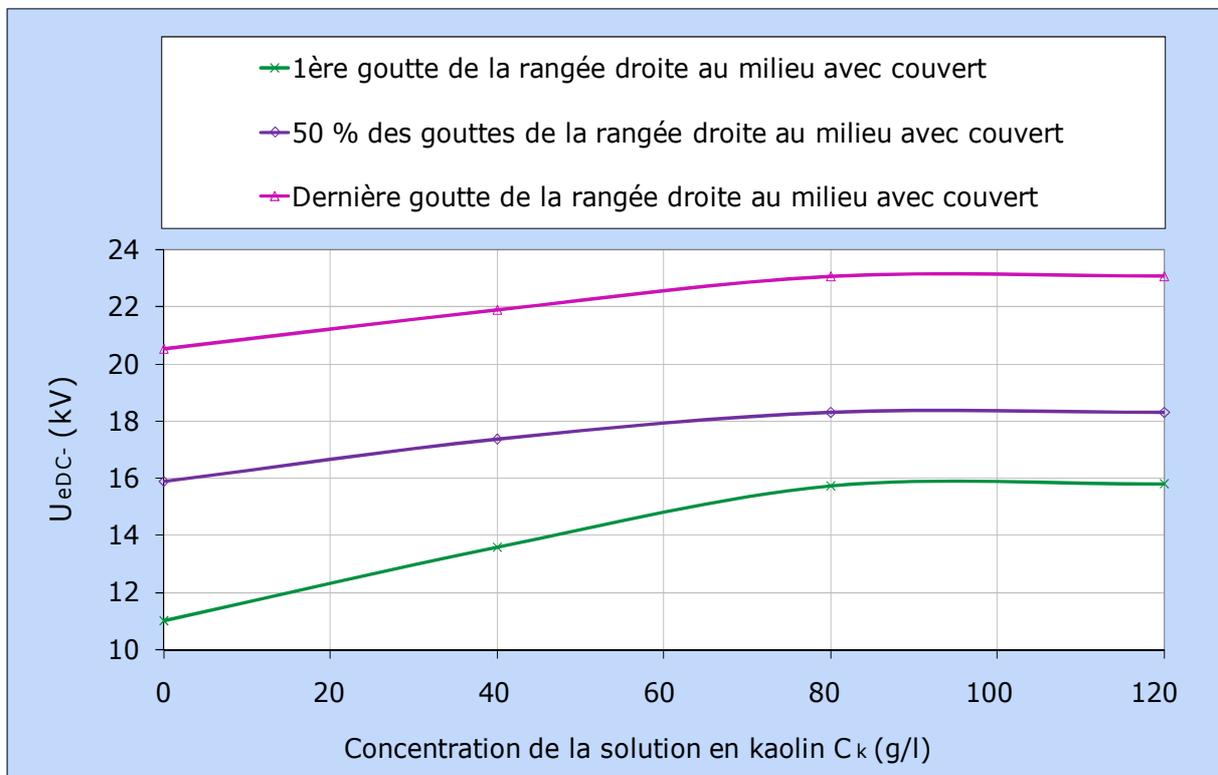


Fig. III. 44: Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée avec couvert au milieu de la ligne de fuite en fonction de leur concentration en kaolin

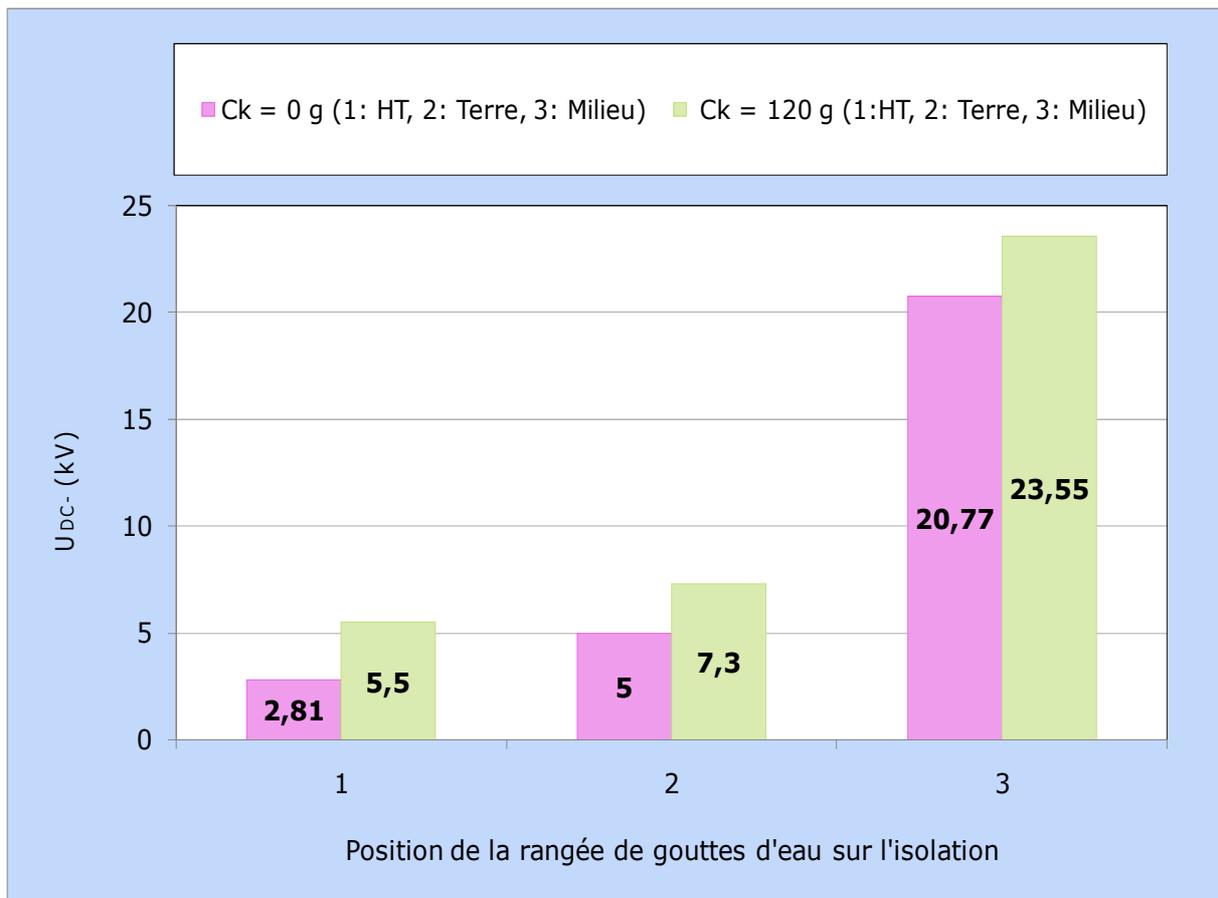


Fig. III. 45: Tension d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée droite en fonction de leur concentration en kaolin et position

L'élévation de la tension d'expulsion des gouttes d'eau avec la croissance de la concentration en kaolin de la solution peut être expliquée par le fait que les gouttes les plus visqueuses par conséquent les plus lourdes, cèdent partiellement une certaine quantité du kaolin qui s'enfonce dans les profondeurs entre les aspérités de l'isolation, ce qui entraîne le collage des gouttes à ces points d'impact, par conséquent leur tension d'éviction se voit croître.

La figure III.45 donne un histogramme de comparaison de la tension d'éviction des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation, pour deux concentrations différentes en kaolin de la solution: $C_{k1} = 0 \text{ g/l}$ et $C_{k2} = 120 \text{ g/l}$. Il en résulte une tension d'évacuation des gouttes d'eau plus importante pour une concentration plus élevée quel que soit l'emplacement de la rangée sur la surface de l'isolation.

Les figures III.46, III.47, III.48, III.49 et III.50 illustrent les phases essentielles d'évacuation d'une rangée de 5 gouttes d'eau en dehors de l'isolation pour deux concentrations en kaolin de la solution ($C_{k1} = 0 \text{ g/l}$ et $C_{k2} = 120 \text{ g/l}$).

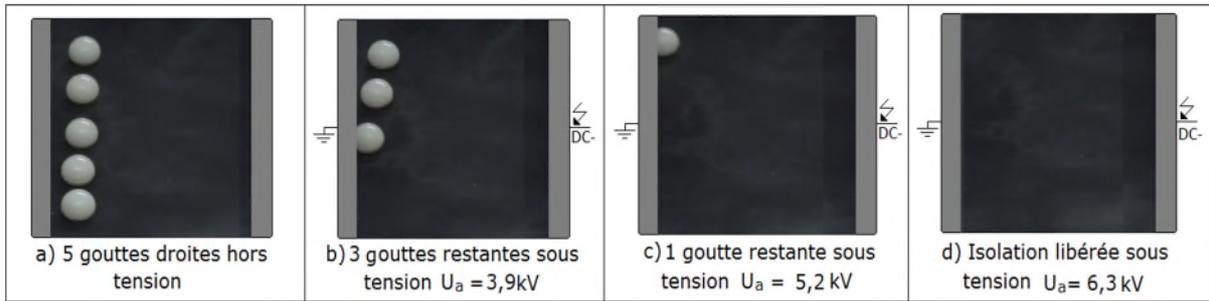


Fig. III. 46: Phases d'éviction de 5 gouttes d'eau côté terre sans couvert ($C_k = 120\text{g/l}$)

Il en découle que l'éjection des gouttes intéresse en premier lieu celles situées aux extrémités de la rangée, puis vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de celle-ci, indépendamment de la valeur de la concentration en kaolin considérée, la position de la rangée sur la surface de l'isolation et le degré de sa couverture.

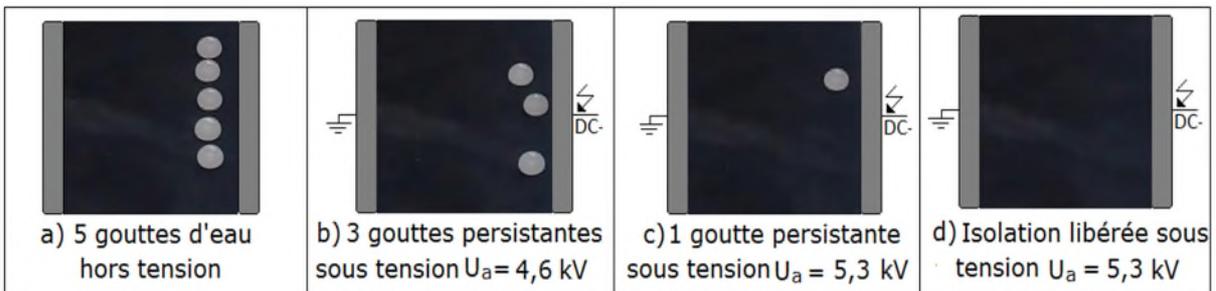


Fig. III. 47: Etapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau coté HT sans couvert ($C_k = 120\text{g/l}$)

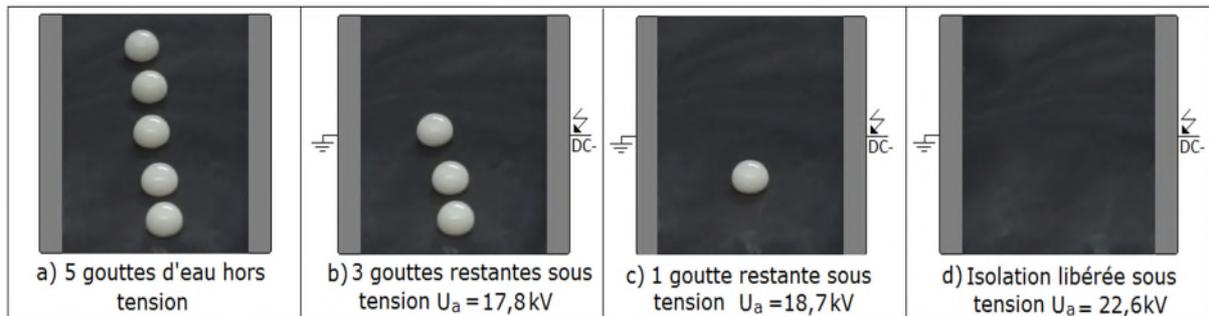


Fig. III.48: Principales étapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite sans couvert ($C_k = 120\text{g/l}$)

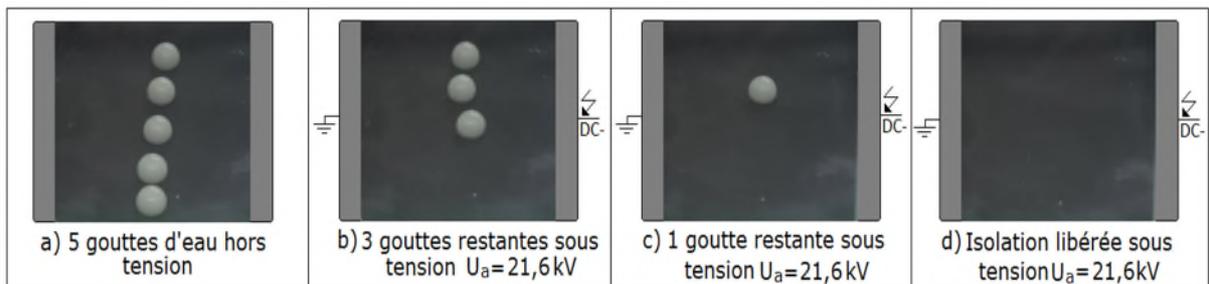


Fig. III.49: Phases essentielles d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau au milieu de la ligne de fuite avec couvert ($C_k = 120\text{g/l}$)

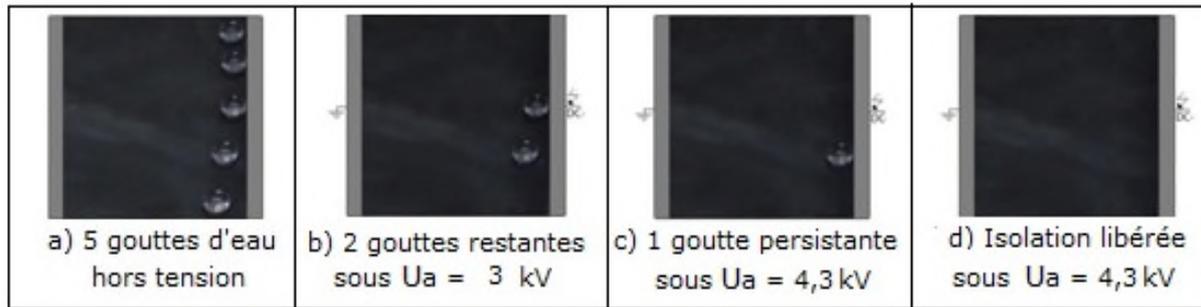


Fig. III. 50: Phases essentielles d'expulsion de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite côté HT sans couvert ($C_k = 0g/l$)

Malgré l'augmentation de la tension d'évacuation des gouttes d'eau avec l'élévation de sa viscosité, celle-ci ne dépasse pas 54 % de la tension de contournement de l'isolation à sec sans apparition de toute forme de décharge électrique destructive du matériau ou de son vieillissement. Par ailleurs, les multiples essais effectués dans cette partie n'ont aucun effet sur la valeur de l'angle de contact qui est restée constante tout au long de cette expérimentation.

III.4 Conclusion

Afin d'étudier le mode d'évacuation de gouttes d'eau en dehors d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative, une isolation superhydrophobe à base de silicone a été confectionnée. La mesure de l'angle de contact statique d'une goutte d'eau, posée en position horizontale sur celle-ci, a donné une valeur de l'ordre de 161° , celle de l'angle de son glissement sur cette surface, inclinée par rapport à l'horizontale, est égale à 2° . La visualisation du phénomène électrohydrodynamique de gouttes d'eau a mis en évidence l'apparition du mode d'expulsion groupo-individuelle et bidirectionnelle de celles-ci à l'extérieur de l'isolation.

Comparativement aux résultats issus des travaux antérieurs, concernant le profil des électrodes HT et terre, un nouveau jeu d'électrodes a été confectionné. Celui-ci est composé de deux électrodes parallélépipédiques pleines, à extrémités arrondies. Celles-ci ont été suspendues à 10 mm au dessus de la surface de l'isolation afin de faciliter l'éjection des gouttes d'eau en dehors de l'isolation sous l'action d'un champ électrique continu et leur récupération au niveau du bac de rétention d'eau.

Les résultats essentiels de quantification de la tension d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieure de l'isolation en fonction de leurs paramètres géométriques et électriques peuvent être résumés comme suit:

- La tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus grande sous un arrangement en lignes droites qu'en zigzag;
- Pour une goutte d'eau de rang quelconque (première, médiane, dernière), sa tension d'éviction augmente en fonction de sa position. Sa valeur est maximale lorsque celle-ci se trouve dans la zone médiane de l'isolation superhydrophobe;
- La tension d'expulsion d'une goutte d'eau avoisinant l'électrode sous tension est plus élevée que lorsqu'elle est proche de celle mise à la terre;
- La tension d'éjection des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur volume quelle que soit la position de la rangée dans laquelle elles se trouvent;
- Une goutte d'eau de faible conductivité électrique, nécessite une tension d'expulsion plus élevée que celle ayant une grande conductivité indépendamment de la position de la rangée à laquelle elles appartiennent;
- une tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation est plus élevée pour une grande concentration en kaolin de la solution.

Certes toutes les grandeurs suscitées agissent sur la tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation sans toutes fois dépasser 58% de la tension de contournement du matériau à l'état sec dans le cas le plus défavorable et par conséquent n'influent pas sur la performance électrique de l'isolation. D'autre part, à aucun moment de ces essais n'est observé une forme de décharge partielle et/ou de contournement du matériau et aucun signe de dégradation du matériau n'a été signalé. Ceci milite pour l'emploi d'une telle isolation dans les équipements électriques dans le domaine industriel.

Conclusion générale

L'étude de l'effet d'un dépôt de gouttes d'eau à paramètres électrogéométriques variables sur la performance électrique d'une surface superhydrophobe confectionnée à base de silicone d'une isolation sous tension continue négative 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 d'eau déposées sur la surface superhydrophobe considérée, le nombre de rangées, les types de leur arrangement, leur volume, leur conductivité électrique, la concentration en kaolin de la solution, ces perles d'eau quittent cette surface soit par groupe, individuellement ou grupo-individuel, dans le cas le plus défavorable à une tension égale à 58 % 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'éjection des gouttes demeure constante indépendamment du nombre de gouttes ajoutées.

-La tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus grande sous un arrangement en lignes droites qu'en zigzag.

-La tension d'expulsion d'une goutte d'eau avoisinant l'électrode sous tension est plus élevée que lorsqu'elle est proche de celle mise à la terre.

-La tension d'éjection des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur volume quelle que soit la position de la rangée dans laquelle elles se trouvent.

-Une goutte d'eau de faible conductivité électrique, nécessite une tension d'expulsion plus élevée que celle ayant une grande conductivité indépendamment de la position de la rangée à laquelle elles appartiennent.

-Une tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation est plus élevée pour une grande concentration en kaolin de la solution.

- [1] C Neinhuis, W. Barthlott, A. Botan "Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces", (1997), 79, 667-677.
- [2] Fourmentin, "Revêtements polyuréthane-acrylate organiques/inorganiques superhydrophobes", Thèse de doctorat de l'université de Lyon, octobre 2016.
- [3] N. Ilyès, "Etude de l'effet de la composition d'une couche mince et de ses conditions d'élaboration par plasma froid à partir de vapeurs organosiliciées sur les propriétés de surface d'un film polymérique", Thèse de doctorat de l'université des frères Mentouri Constantine, option Microélectronique, 2017.
- [4] T. Young, "An essay on the cohesion of fluids", Philos. Trans. R. Soc. London, vol. 95, pp. 65–87, 1805.
- [5] R. N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water", Ind. Eng. Chem., vol. 28, no. 8, pp. 988–994, 1936.
- [6] H. Liu, S.-W. Gao, J.-S. Cai, C.-L. He, J.-J. Mao, and T.-X. Zhu, "Recent Progress in Fabrication and Applications of Superhydrophobic Coating on Cellulose-Based Substrates", Materials, vol. 9, no. 3, p. 124, 2016.
- [7] Cassie, A. B. D. Baxter, S. Trans. Faraday Soc "Wettability of porous surfaces", (1944), 40, 546-51.
- [8] E. Guerret Elina, E Moncada-Potignon, "Super-hydrophobie", Olympiades de physique 2014-2015, pp .15-16.
- [9] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrophile>
- [10] J. Genzer and K. Efimenko, "Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review", The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, 2007.
- [11] http://www.mineralogie.fr/Structure_Matiere.html.
- [12] IEEE Std 957 "IEEE guide for cleaning isolators", 1995.
- [13] <http://hydrophobie.moonfruit.fr/superhydrophobie-naturelle/4422516>.
- [14] X. Gao and L. Jiang, "Water-repellent legs of water striders" Nature, 432:36, 2004.
- [15] Zhang, Yong-Lai, et al, "Recent developments in superhydrophobic surfaces with unique structural and functional properties." Soft Matter 8.44 (2012): 11217-11231.
- [16] 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.

- [17] 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.
- [18] H. J. Gao, X. Wang, H. M Yao, S. Gorb, E. Arzt , *Mater*, 2005, 37 , 275-85.
- [19] K. Liu, et al. *Nanoscale* 4 (3) (2012) 768.
- [20] Y. Cai, et al. *Adv. Funct. Mater.* 24 (6) (2014) 809.
- [21] <http://www.institutocean.org/rubriques.php?lang=fr&categ=1265713871&sscategorie=1324551762&article=1406734308/>, consulté le 22/05/2019.
- [22] Darmanin, Thierry, and Frédéric Guittard, "Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature", *Materials Today* 18.5 (2015): 273-285.
- [23] <http://physique.unice.fr/sem6/20142015/PagesWeb/PT/Monomere/page3.html>
- [24] <https://sites.google.com/site/superhydrophobienaturelle/5-1-effet-lotus-chez-d-autres-etres-vivants/>, consulté le 22/05/2019.
- [25] W. Barthlott and C. Neinhuis, Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, 202:1–8, 1997.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] M. A. Samaha, M.Gad-el-Hak, "Polymeric Slippery Coatings: Nature and Applications" *Polymers* 2014, 6, pp.1266-1311.
- [29] Saleema, N. Farzaneh , "Thermal effect on superhydrophobic performance of stearic acid modified ZnO nanotowers", *M., AppL Surf. Sci.* (2007), 254, 6.
- [30] Sarkar, D.K. Saleema, N "One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings", *Surf.Coat. Technol.* (2010), 204, 2483-2486.
- [31] Sarkar, D.K, Farzaneh, M, Paynter, R.W, "Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces", *Mater. Lett* (2008), 62, 1226-1229.
- [32] Karmouch, R. Ross, G.G "Superhydrophobic wind turbine blade surfaces obtained by a simple deposition of silica nanoparticles embedded in epoxy", *AppL Surf Sci.* (2010), 257, 665-669.

- [33] A. Kuechler, "Hochspannungstechnik ,Grundlagen – Technologie – Anwendungen", 3^{ème} édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [34] 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 "Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests", Nano Lett. (2003), 3, 1701-1705.
- [35] Huang, Y.Sarkar, D.K; Chen, X.G "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces", Mater. Lett. (2010), 64, 2722-2724.
- [36] Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H. ; Lee, Y.K "Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces", TRANSDUCERS 2009 - 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (2009), 441-444.
- [37] Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R. ; Kim, W.D "Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface", Chinese Science Bulletin (2009), 54, 3613-3616.
- [38] <https://www.industrie-techno.com/du-beton-intelligent-qui-dure-plus-d-un-siecle.29538>
- [39] <http://ultraeverdry-tap.com/>.
- [40] B. Smati, S. Soudani " Impact du dépôt de gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative ", PFE Master, Génie électrique, Université Abderrahmane MIRA –BEJAIA, Juin 2017.
- [41] 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.
- [42] Rebouh samia, "Impact de la pollution de l'air provoquée par la cimenterie tahar djouad sur la santé public et le cadre bati " Thèse de magister, option : ville et risque urbain, université mentouri de Constantine.
- [43] H. Aitsaid, L. Slimanou, "Effet de l'épaisseur d'un écran pollué sur la rigidité diélectrique d'un système d'électrode à champ non uniforme " PFE Master, option réseau électrique, U. A. M. Bejaïa, 2009.
- [44] S. Hai, R. Messouaf, "Effet de l'inclinaison sur le contournement d'une surface en silione hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue.", PFE master, U.A.M.Bejaia, juin 2014.
- [45] 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.

- [46] B. Naivonina Ravelonantsoa, "Effet du vent sur le taux d'accumulation de pollution à la surface des isolateurs de haute tension dans les conditions hivernales ", thèse de doctorat, université de Québec, décembre 2012.
- [47] T. Meraghni, I. Guia, "L'effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension", PFE Master, option réseau électrique, U. A. M. Bejaïa, 2015.
- [48] M.A.B. EL Koshairy, E. EL Sharkaoui, M.M. Awad, H.E.M. Zarzoura, M.M. Khalifa et A. Nosseir, " Performance de chaines d'isolateurs haute tension soumises à la pollution du désert ", CIGRE, Rapport 33-09, Paris 1982.
- [49] C. Huriaux, A.M. Rahal, "Le Contournement des isolatrices hautes tensions approché à l'aide d'un modèle de laboratoire ", RGE, tome 84, N° 6, juin 1975, pp. 425-429.
- [50] 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.
- [51] B. Souleiman, S.Badraeddine, "Influence de la pollution artificielle sur la tension de contournement d'une chaîne d'isolation MT", PFE master, université kasdi merbah ouargla, juin 2014.
- [52] 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.
- [53] A. Cimador, S. Vitet, "La pollution des isolateurs", EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [54] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. D. Deut. Akad, 1990.
- [55] 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.
- [56] K. haroun, D. boudraa, "Etude comparative de la performance électrique de deux configurations plan - plan et pointe - barrière isolante – plan sous tension continue et conditions de pollution très sévères", PFE Master, Génie Electrique, Université Abderrahmane MIRA – BEJAIA, 2017.
- [57] F. Amir, KH. Namaoui, " Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative", Mémoire d'ingénieur, UAM, Juin 2004.

- [58] Loana Soucy, "Effet de la fonte et de la pollution sur la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace", Mémoire d'ingénierie de l'université du Québec, octobre 1996.
- [59] N. Herbreteau, " Sites et sols pollués : développement d'une nouvelle thématique", Mémoire d'ingénierie à l' ENSP, avril 2003.
- [60] A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.
- [61] 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.
- [62] CEI 60-1. "Techniques des Essais à Haute Tension", Définitions et prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [63] 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.
- [64] F. Midi, K. Ouerdane, "Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en Région littorale", PFE, Génie Electrique, USTHB 1998.
- [65] R. Boudissa, F. Bouchelga, T. Belhoul, S. Kornhuber and K.D.Haim, "DC electrical performance of insulation silicone angled and covered with water drops rows arranged in zigzag", conference silicone insulation (CSI), wacker academy, Germany.
- [66] T. Belhoul, R. Boudissa, K.D. Haim, "Comparison of the Performance of Silicone and Glass Barriers under Direct Current and Very Severe Conditions of pollution", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, Issue 1, pp. 471 – 482, February 2017.
- [67] T. Braunsberger, M. Kurrat, "Cyclic Water Drop Corona on Silicone Rubber Samples", 15th International Symposium on high Voltage Engineering , University of Ljubljana, Elektrotechnisches Institut Milan Widmar, Ljubljana, Slovenia, August 27- 31, T4 -280, pp. 1-5, 2007.
- [68] R. Boudissa, T. Belhoul, K.D. Haim, S. Kornhuber, "Effect of Inclination Angle of Hydrophobic Silicone Insulation Covered by Water Drops on its DC Performance", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, Issue 5, pp. 2890-2900, October 2017.
- [69] IEC 62271-304, "Technical Specification of design classes of indoor enclosed switching 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.

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

L'objectif recherché dans notre travail consiste en la confection de surfaces superhydrophobes isolantes et d'un dispositif 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, la concentration en kaolin, degré de couverture) et électriques (conductivité électrique) de gouttes d'eau sur la tension de leur expulsion de la dite surface a été quantifiée.

Un profil composé de deux électrodes parallèles a été conçu et réalisé de telle sorte qu'aucune goutte expulsée par la surface superhydrophobe à l'extérieur de l'isolation ne puisse s'attacher à celle-ci, lorsque l'isolation est mise sous tension proche de la tension de contournement à sec.

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

-La tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus grande sous un arrangement en lignes droites qu'en zigzag.

-La tension d'expulsion d'une goutte d'eau avoisinant l'électrode sous tension est plus élevée que lorsqu'elle est proche de celle mise à la terre.

-La tension d'éjection des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur volume quelle que soit la position de la rangée dans laquelle elles se trouvent.

-Une goutte d'eau de faible conductivité électrique, nécessite une tension d'expulsion plus élevée que celle ayant une grande conductivité indépendamment de la position de la rangée à laquelle elles appartiennent.

-une tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation est plus élevée pour une grande concentration en kaolin de la solution.