

**R**épublique **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA  
Faculté De Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique



Réalisé par :

M<sup>elle</sup> ADNANI Zineb

M<sup>elle</sup> BENAMARA Katia



## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique  
Option : Réseaux électriques

Thème

*Performance électrique d'une isolation superhydrophobe  
avec gouttes d'eau sous tension continue positive*

Soutenu publiquement le 25 juin 2019 devant le jury composé de:

Mme A. BENDAHMANE	MAA	U.A.M.Bejaia	Présidente
Mr B. YAHYAOU	MCB	U.A.M.Bejaia	Examineur
Mr R. BOUDISSA	Professeur	U.A.M.Bejaia	Rapporteur
Mr K. HAMOUR	Doct	U.A.M.Bejaia	Co-Rapporteur

Promotion : 2018/2019



# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma très chère mère*

*A mon très cher père*

*Pour tous les sacrifices qu'ils ont fait pour m'offrir le climat idéal de  
travail et*

*qui m'ont apporté leur soutien depuis toujours, leur encouragement et  
leurs conseils dans les soucis de ma réussite.*

*A mes chers frères Aimad et Aissa*

*A mes chères soeurs Sonia, Amel et Radia*

*A mon très cher Kamel qui m'a soutenu tout au long de mon travail  
ainsi que sa famille*

*A ma collègue Zineb ainsi que toute sa famille*

*Et enfin à tous mes amis et la famille qui me sont très chers: Ounissa,  
Djamel, Toufik, Yamina, Siliya, Kahina, Kahina Thalayante et toutes  
mes copines du bloc M de la Résidence 17 Octobre 1962*

*Que dieu les garde « inchallah »*

*Katia*



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*Ma très chère mère, Mon très Cher père à qui  
j'adresse des vœux les plus ardents, longévité et bonne santé*

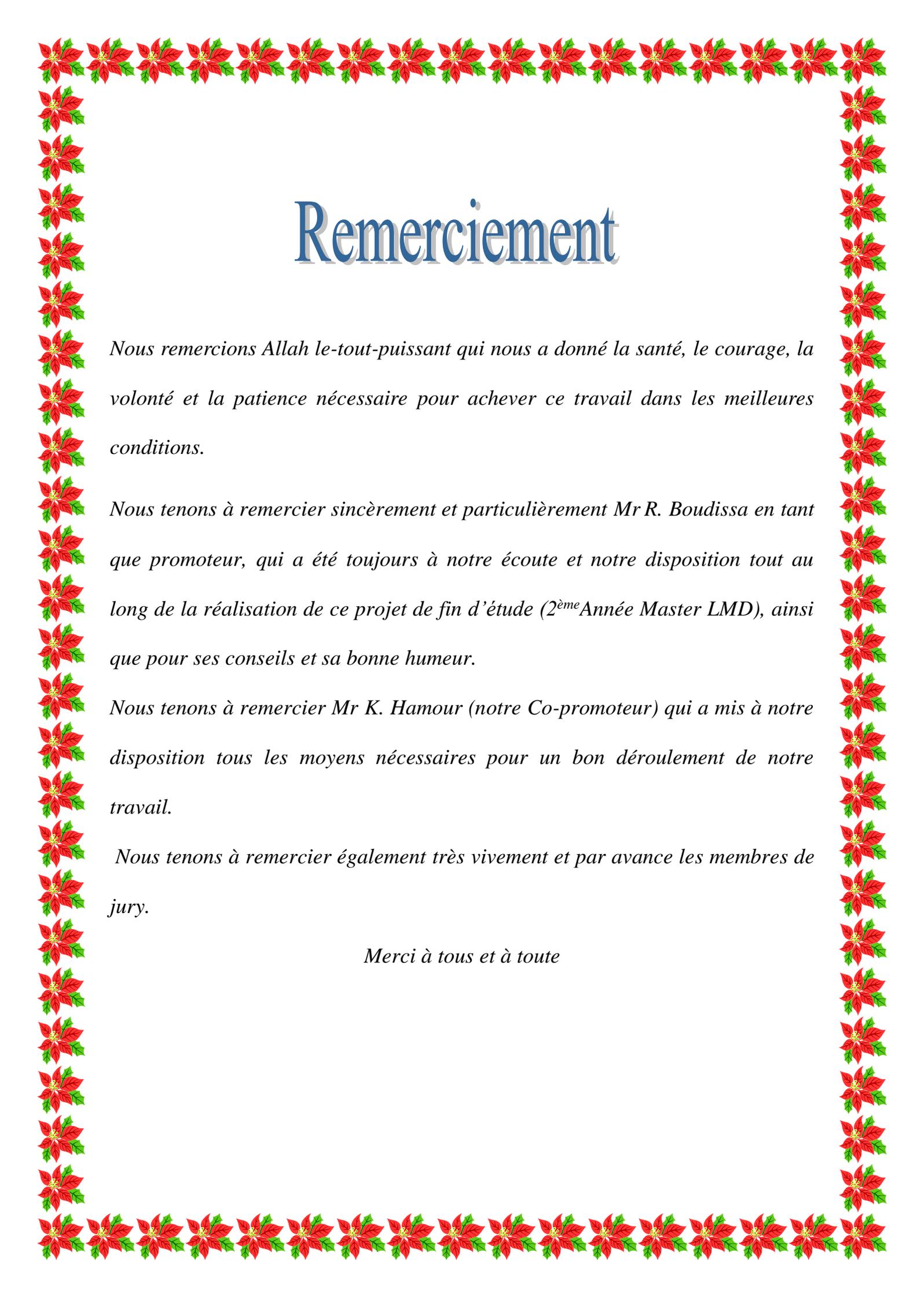
*Pour mes chers frère (Lakhal) et sœurs;*

*Pour la grande famille Adnani;*

*Pour mes très chers amis;*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*Zineb*



# Remerciement

*Nous remercions Allah le-tout-puissant qui nous a donné la santé, le courage, la volonté et la patience nécessaire pour achever ce travail dans les meilleures conditions.*

*Nous tenons à remercier sincèrement et particulièrement Mr R. Boudissa en tant que promoteur, qui a été toujours à notre écoute et notre disposition tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude (2<sup>ème</sup> Année Master LMD), ainsi que pour ses conseils et sa bonne humeur.*

*Nous tenons à remercier Mr K. Hamour (notre Co-promoteur) qui a mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour un bon déroulement de notre travail.*

*Nous tenons à remercier également très vivement et par avance les membres de jury.*

*Merci à tous et à toute*

# Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre I: Caractérisation des isolations superhydrophobes et travaux antérieur récents sur leur performance sous tension continue positive	
I. 1 Introduction.....	3
I. 2 Définition et signification .....	3
I. 2. 1 Angle de contact.....	3
I. 2. 2 Hydrophilité .....	3
I. 2. 3 Hydrophobicité.....	3
I. 2. 4 Superhydrophobicité.....	3
I. 2. 5 La mouillabilité .....	3
I. 2. 6 Force de Van der Waals .....	4
I. 2. 7 Tension superficielle.....	4
I. 3 Différents types de matériaux .....	5
I. 3. 1 Matériaux naturels .....	5
I. 3. 2 Matériaux artificiels .....	6
I. 3. 2. 1 Dépôt par bain chimique .....	6
I. 3. 2. 2 Dépôt par vapeur chimique .....	6
I. 3. 2. 3 Dépôt électrochimique .....	6
I. 3. 2. 4 Gravure chimique .....	7
I. 3. 2. 5 Photolithographie.....	7
I. 3. 2. 6 Techniques utilisant le plasma .....	7
I. 4 Propriétés électriques et particulières .....	7
I. 4. 1 Propriétés électriques .....	7
I. 4. 1. 1 Permittivité .....	7
I. 4. 1. 2 Rigidité diélectrique .....	8
I. 4. 1. 2. 2 Rigidité diélectrique longitudinale .....	8
I. 4. 1. 2. 1 Rigidité diélectrique transversale .....	8
I. 4. 1. 3 Résistance .....	8
I. 4. 1. 4 Facteur de pertes .....	9
I. 4. 2 Propriétés particulières .....	9
I. 4. 2. 1 Angle de contact .....	9
I. 4. 2. 2 Modèles de surfaces superhydrophobes .....	10

I. 4. 2. 3 L'hystérésis de l'angle de contact .....	11
I. 5 Paramètres d'influences .....	12
I. 5. 1 Rigidité superficielle .....	12
I. 5. 1. 1 Géométrie des électrodes .....	12
I. 5. 1. 2 Nature de la tension appliquée .....	12
I. 5. 1. 3 Durée d'application de la tension .....	13
I. 5. 2 Résistivité superficielle .....	13
I. 5. 2. 1 Champ appliqué .....	13
I.6 Applications .....	13
I. 7 Avantages et inconvénients .....	14
I. 8 Travaux antérieurs récents sur la performance électrique des isolations superhydrophobe .....	14
I. 9 Conclusion .....	20

## Chapitre II : Pollution des isolations électriques

II. 1 Introduction .....	21
II. 2 Définitions et significations .....	21
II. 2. 1 Pollution.....	21
II. 2. 2 Salinité .....	21
II. 2. 3 Couche de pollution .....	21
II. 2. 4 Degré de pollution .....	21
II. 3 Sources de pollution .....	22
II. 3. 1 Pollution naturelle .....	22
II. 3. 1. 1 Pollution désertique.....	22
II. 3. 1. 2 Pollution marine .....	22
II. 3. 1. 3 Autres types de pollution naturelle .....	22
II. 3. 2 Pollution industrielle .....	23
II. 3. 3 Pollution mixte .....	23
II. 4 Mesure de la sévérité de pollution d'un site .....	23
II. 4. 1 Conductance superficielle .....	23
II. 4. 2 Mesure de la pollution de l'air .....	24
II. 4. 3 Mesures optiques .....	24
II. 4. 4 Densité du dépôt non soluble (DDNS) .....	24
II. 5 Conséquence de la pollution sur les équipements électriques .....	25
II. 4. 5 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) .....	25

II. 5. 1 Arc non localisé .....	26
II. 5. 2 Arc fixe .....	26
II. 5. 3 Court-circuit .....	26
II. 5. 4 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe .....	26
II. 5. 4. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale .....	26
II. 5. 4. 2 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe incliné de 20° .....	27
II. 6 Simulation de la pollution au laboratoire .....	28
II. 6. 1 Essais sous pollution artificielle .....	28
II. 6. 1. 1 Méthode de la couche solide .....	28
II. 6. 1. 2 Méthode du brouillard salin .....	28
II. 6. 1. 3 Méthode de pollution liquide .....	28
II.7 Techniques de lutte contre La pollution .....	29
II. 7. 1 Allongement de la ligne de fuite .....	29
II. 7. 2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables) .....	29
II. 7. 3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes) .....	29
II.7. 4 Revêtement à base de silicone .....	29
II. 7. 5 Les isolateurs composites .....	30
II. 7. 6 Nettoyage des isolateurs .....	30
II. 8. Conclusion .....	30

### Chapitre III. Partie expérimental

III. 1 Introduction .....	31
III. 2 Modèle expérimental .....	31
III. 3 Techniques de mesure .....	32
III. 4 Résultats et discussions .....	38
III. 4. 1 Mode d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation .....	38
III. 4. 2 Nombre de rangées de gouttes d'eau et leur localisation sur l'isolation .....	43
III. 4. 3 Volume des gouttes d'eau d'une rangée et son emplacement sur la surface de l'isolation .....	44
III. 3. 4 Conductivité électrique des gouttes d'eau et leur position sur l'isolation ...	48
III. 4. 3 Concentration en kaolin de la solution polluante .....	53
III. 5 Conclusion .....	57
Conclusion générale .....	59

## Liste des figures

<b>Fig1.1:</b> force d'attraction des molécules d'eau, exemple d'une goutte d'eau déposée sur une feuille de sauge.	04
<b>Fig.1.2:</b> Représentation de l'angle de contact à l'équilibre	09
<b>Fig. I. 3:</b> Schéma de gouttes sur des surfaces super hydrophobes dont la rugosité est faite de piliers micrométriques, en état Wenzel (a) et en état Cassie-Baxter (b)	11
<b>Fig. I. 4:</b> Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact	11
<b>Fig. I. 5:</b> Démonstration de la propriété autonettoyante (a: une surface lisse, l'eau n'enlève pas les contaminants, b: surface superhydrophobe et autonettoyante)	12
<b>Fig. I. 6:</b> l'image de microscopie électronique à balayage et hydrophobie des surfaces de caoutchouc de silicone	14
<b>Fig. I. 7:</b> Tension de contournement sur chaque surface pour différents liquides	15
<b>Fig. I. 8:</b> le comportement électro hydrodynamique d'une gouttelette et phénomène d'embrasement associé sur différents surfaces	15
<b>Fig. I. 9:</b> Systèmes d'électrodes utilisées	16
<b>Fig. I. 10:</b> Tension continue positive d'expulsion en fonction de la nature de l'arrangement et du nombre de rangées de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe	17
<b>Fig. I. 11:</b> Tension continue positive d'expulsion en fonction du volume des gouttes d'eau déposée sur la surface de l'isolation superhydrophobe	17
<b>Fig. I. 12:</b> Tension continue positive d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe	18
<b>Fig. I. 13:</b> Tension d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe	19
<b>Fig. I. 14:</b> Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes pleines	19
<b>Fig. I. 15:</b> Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes à dents	20
<b>Fig. II.1:</b> Schéma et procédé de mesure de la DDNS	24
<b>Fig. II. 2:</b> Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale et recouverte de gouttes d'eau	26
<b>Fig. II. 3:</b> Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20° et recouverte de gouttes d'eau	27
<b>Fig. III. 1:</b> Modèle expérimental utilisé pour la réalisation des essais électriques	32
<b>Fig. III. 2:</b> Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe	32
<b>Fig. III. 3:</b> Micropipette de mesure de volume de gouttes d'eau graduée de 5 à 50 µl	33
<b>Fig. III. 4:</b> Dessiccateur, balance électronique et conductimètre électrique	34
<b>Fig. III. 5:</b> Arrangement de 5 rangées x 5 gouttes en lignes droites sur la surface de	35

l'isolation ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{l/cm}$ , $C_k = 0 \text{ g/l}$ , $L_c$ : Longueur de la ligne de fuite et $L_e$ : Longueur de l'électrode)	
<b>Fig. III. 6:</b> Emplacement du nombre de rangées en zigzag sur la surface de l'isolation	35
<b>Fig. III. 7:</b> Position d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite sur la surface de l'isolation à volume variable	36
<b>Fig. III. 8:</b> Position d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite sur la surface de l'isolation à conductivité variable	37
<b>Fig. III. 9:</b> Position d'une rangée des gouttes d'eau en ligne droite sur la surface de l'isolation à concentration de kaolin variable	37
<b>Fig. III. 10:</b> Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface super hydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes	38
<b>Fig. III. 11:</b> Phases essentielles d'expulsion groupe-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites sans couvert ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{ g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )	39
<b>Fig. III. 12:</b> $U_{DC+} = f(N_d)$ pour un arrangement en lignes droites sans couvert de 5 rangées x 5 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{ g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )	40
<b>Fig. III. 13:</b> Phases essentielles d'expulsion groupe-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation super hydrophobe sous arrangement en lignes droites avec couvert ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{ g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )	41
<b>Fig. III. 14:</b> $U_{DC+} = f(N_d)$ pour un arrangement en lignes droites avec couvert de 5 rangées x 5 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{ g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )	41
<b>Fig. III. 15:</b> Etapes essentielles d'évacuation groupe-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en zigzag sans couvert ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{ g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )	42
<b>Fig. III. 16:</b> $U_{DC+} = f(N_d)$ pour un arrangement en zigzag sans couvert de 5 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{ g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )	43
<b>Fig. III. 17:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau selon en fonction du nombre de rangées déposées	44
<b>Fig. III. 18:</b> Tension d'éviction de la dernière goutte d'eau d'une rangée droite en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation	45
<b>Fig. III. 19:</b> Tension d'éviction de la dernière goutte d'eau d'une rangée en zigzag en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation	45
<b>Fig. III. 20:</b> Tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction de leur volume sur la surface de l'isolation	46
<b>Fig. III. 21:</b> Phases essentielles d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau en zigzag côté HT en fonction de la tension de leur éviction ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	46
<b>Fig. III. 22:</b> Phases essentielles d'éjection de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite côté HT ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	47
<b>Fig. III. 23:</b> Principales étapes d'éjection de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite côté terre ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	47
<b>Fig. III. 24:</b> Principales étapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite sans couvert au milieu de la ligne de fuite de l'isolation ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	47
<b>Fig. III. 25:</b> Principales étapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite avec couvert au milieu de la ligne de fuite de l'isolation ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	47
<b>Fig. III. 26:</b> Principales étapes de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite sans couvert au	48

milieu de la ligne de fuite de l'isolation ( $V_g = 10 \mu\text{l}$ )	
<b>Fig. III. 27:</b> Tension d'éviction des gouttes d'eau d'une rangée droite côté HT en fonction de leur conductivité	48
<b>Fig. III. 28:</b> Tension d'éviction des gouttes d'eau sous arrangement en ligne droite côté terre en fonction de leur conductivité	49
<b>Fig. III. 29:</b> Tension d'éviction des gouttes d'eau sous arrangement en ligne droite du milieu sans couvert en fonction de leur conductivité	49
<b>Fig. III. 30:</b> Tension d'éviction des gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu de l'isolation avec couvert en fonction de leur conductivité électrique	50
<b>Fig. III. 31:</b> Tension d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée droite en fonction de sa position sur la surface de l'isolation pour deux conductivités électriques différentes des perles d'eau	51
<b>Fig. III. 32:</b> Phases essentielles d'éjection unidirectionnelle via HT de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	51
<b>Fig. III. 33:</b> Phases essentielles d'éjection unidirectionnelle via terre de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	51
<b>Fig. III. 34:</b> Phases essentielles d'éjection bidirectionnelle de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu sans couvert en ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	52
<b>Fig. III. 35:</b> Phases essentielles d'éjection bidirectionnelle de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu avec couvert ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )	52
<b>Fig. III. 36:</b> Phases essentielles d'éjection bidirectionnel de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu sans couvert ( $V_g = 10 \mu\text{l}$ )	52
<b>Fig. III. 37:</b> Tension d'expulsion en fonction de concentration en kaolin des gouttes d'eau déposées au voisinage très proche de l'électrode HT	53
<b>Fig. III. 38:</b> Tension d'expulsion en fonction de $C_k$ des gouttes d'eau déposées du côté terre sur la surface de l'isolation superhydrophobe	54
<b>Fig. III. 39:</b> Tension d'expulsion en fonction de $C_k$ des gouttes d'eau déposées au milieu de la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert	54
<b>Fig. III. 40:</b> Tension d'expulsion en fonction de $C_k$ des gouttes d'eau déposées au milieu de la surface isolante superhydrophobe avec couvert	55
<b>Fig. III. 41:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée droite en fonction de sa position sur la surface isolante superhydrophobe	55
<b>Fig. III. 42:</b> Phases essentielles d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite du côté terre de l'isolation sans couvert ( $C_k = 120 \text{ g/l}$ )	56
<b>Fig. III. 43:</b> Principales étapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite du côté HT de l'isolation sans couvert ( $C_k = 120 \text{ g/l}$ )	56
<b>Fig. III. 44:</b> Principales étapes d'expulsion de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu de la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert ( $C_k = 120 \text{ g/l}$ )	57
<b>Fig. III. 45:</b> Phases essentielles d'éjection de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu de la surface isolante avec couvert ( $C_k = 120 \text{ g/l}$ )	57
<b>Fig. III. 46:</b> Phases essentielles d'expulsion de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite du côté HT de l'isolation sans couvert ( $C_k = 0 \text{ g/l}$ )	57

**Liste des tableaux**

<b>Tab. I. 1:</b> Matériaux naturels (Animaux, oiseaux et autres)	05
<b>Tab. I. 2:</b> Exempels d'applications	13
<b>Tab. III. 1:</b> Tension de contournement de l'isolation a son état sec	38

$\theta$  : Angle de contact

$E_p$  : Champ électrique propre

$E_e$  : Champ électrique extérieur

$\varepsilon_r$  : Permittivité relative

$R_v$  : Résistance transversale

$R_s$  : Résistance superficielle

$R_i$  : Résistance d'isolement

$\theta_e$  : Angle de Young

$\gamma_{SV}$  : Tension superficielle solide-vapeur

$\gamma_{SL}$  : Tension superficielle solide-liquide

$\gamma_{LV}$  : Tension superficielle liquide-vapeur

$r\gamma_{SV}$  : Energies en jeu pour surface solide/vapeur

$r\gamma_{SL}$  : énergies en jeu pour surface solide/liquide

$r$  : Rugosité

$\theta^*$  : Angle apparent de la goutte

$\theta_e$  : Angle de Young

$\phi_s$  : Fraction de surface occupée par le sommet des créneaux

HAC : Hystérésis de l'angle de contact

$\theta_a$  : Angle d'avancée

$\theta_r$  : Angle de reculée

TiO<sub>2</sub> : Dioxyde de titane

SiO<sub>2</sub> : Dioxyde de silicium

CEI : Communauté des états indépendants

G: La conductance superficielle

I : Courant électrique

V : Tension d'alimentation de l'isolateur

DDNS : Densité du dépôt non soluble mg / cm<sup>2</sup>

m<sub>f</sub>: Masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg

m<sub>i</sub> : Masse initiale du papier filtre en mg

A : Surface lavée de la barrière en cm<sup>2</sup>

DDSE : Densité du dépôt de sel équivalent

NaCl : Chlorure de sodium

V : Volume de la suspension en cm<sup>3</sup>

S: Surface nettoyée en cm<sup>2</sup>

S<sub>a</sub> : La salinité exprimé en kg / m<sup>3</sup>

α : Angle d'inclinaison

L<sub>e</sub>: Longueur de l'électrode

l<sub>e</sub> : Largeur de l'électrode

e<sub>e</sub> : épaisseur de l'électrode

L<sub>dv</sub> : Distance entre l'électrode haute tension et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche

L<sub>dg</sub> : Distance entre l'électrode terre et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche

L<sub>dd</sub> : Distance entre les centres de deux rangées successives de gouttes d'eau

l<sub>rr</sub> : Distance entre les centres de deux rangées adjacentes de gouttes d'eau sur la longueur de l'isolation

L<sub>c</sub> : Longueur de la ligne de fuite

$V_d$  : Volume variable

$\sigma_v$ : Conductivité variable

$C_K$  : Concentration en kaolin variable

$R_1/R_2$ : Diviseur de tension résistif

$V_{DC}$  : Voltmètre de crête

$S_{sh}$  : Surface superhydrophobe isolante

Cam : Caméra

PC : personal computer

$R_a$  : Résistance d'affaiblissement de courant

Tri : transformateur

D : Diode

$C_L$  : Capacité de lissage de la tension

$U_c$  : Unité de commande de transformateur

HV, Tr : Transformateur élévateur

HT : Haute tension

IHT : Intermédiaire haute tension

T : Terre

IT : Intermédiaire terre

M : Milieu

$P_a$  : La pression atmosphérique

$H_r$ : L'humidité

T : La température

$U_a$  : La tension appliquée

$N_d$  : Nombre de goutte

# **Introduction générale**

## Introduction générale

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension.

Les lignes à haute tension sont les composants principaux des réseaux de transport de l'énergie électrique. Elles permettent l'acheminement de l'énergie des centrales électriques vers les centres de consommation. Hormis les conducteurs, les lignes électriques comportent d'autres éléments dans lesquels les isolateurs. Ces derniers jouent un rôle à la fois mécanique et électrique dans la sécurité du transport et la distribution de l'énergie. En effet, ils doivent tenir les conducteurs et les isoler du pylône.

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne. Les isolateurs sont également soumis à plusieurs contraintes environnementales pouvant conduire à leur vieillissement. En pratique, les défaillances proviennent de l'action combinée du champ électrique et des facteurs environnementaux (la pollution). Trois mécanismes fondamentaux décrivent la durée de vie d'un isolant sous l'action d'un champ électrique : le vieillissement électrique, la dégradation et finalement la rupture diélectrique.

Le comportement des isolateurs pollués est un sujet d'intérêt croissant dans de nombreux pays. Cet intérêt est lié au choix de matériau constituant l'isolateur, étant donné les nombreuses perturbations causées par la pollution. D'énormes travaux de recherche ont été effectués soit au laboratoire ou bien sur site afin déterminer la performance électrique des isolations hydrophile et hydrophobe. Il a été prouvé que les isolations hydrophobes sont plus performantes que celles hydrophiles. Ces derniers temps il a été constaté une dégradation fréquente des isolations hydrophobes sous conditions humides. Ceci a poussé les chercheurs à concevoir d'autres types d'isolations du genre superhydrophobes. Cependant il existe très peu de recherche sur la performance électrique des isolations superhydrophobes sous tension continue positive.

Ce qui nous a amené à approfondir la recherche sur la surface isolante superhydrophobe et plus précisément sur les performances électriques des isolations avec gouttes d'eau sous tension continue positive. Suite à cette constatation le but recherché à travers ce présent travail consiste en l'étude expérimentale de l'effet de certains paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau sur

l'évolution de la tension continue positive de leur évacuation. A cet effet, nous avons subdivisé ce travail en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous rappelons et discutons sur les différents états de surfaces, nous citerons les principaux matériaux superhydrophobes naturels et artificiels, nous présenterons leur propriétés électriques et spéciales, les différents techniques de fabrication de matériaux superhydrophobes ainsi que les domaines essentiels d'applications de ces types de matériaux. Nous clôturerons ce chapitre par un aperçu sur les travaux antérieurs très récents sur la surface superhydrophobe en tension continu positive.

Le deuxième chapitre porte sur la caractérisation des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur les équipements électriques. Des méthodes de détermination du degré de pollution des sites, de sa simulation au laboratoire ainsi que des techniques de lutte contre ces phénomènes y seront présentées.

Le dernier chapitre sera consacré principalement à l'étude expérimentale de l'évaluation de la tension d'expulsion de gouttes d'eau sur une surface superhydrophobe conçue et réalisée par nous même en fonction des paramètres suivants : nombre de gouttes, de rangées, leur volume, leur conductivité et la concentration en kaolin dans la solution polluante.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale qui représente la synthèse globale de notre travail.

## ***Chapitre I***

***Caractérisation des isolations  
superhydrophobe et travaux antérieurs  
récents sur leur performance sous  
tension continue positive***

## **I. 1 Introduction**

Dans ce chapitre quelques définitions seront données. Ensuite, certains types d'animaux, insectes et plantes possédant la caractéristique de superhydrophobicité seront présentés et quelques domaines d'application de celle-ci seront décrits de l'hydrophobicité et la superhydrophobicité de surfaces. Enfin, une synthèse des résultats obtenus lors des expériences se rapportant au comportement électrohydrodynamique des gouttes d'eau recouvraient une surface superhydrophobe sera faite.

## **I. 2 Définitions et significations**

### **I. 2. 1 Angle de contact [1]**

On appelle angle de contact  $\theta$ , 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.

### **I. 2. 2 Hydrophilité**

Est un composé ayant une affinité pour l'eau et tendance à s'y dissoudre. Il est également ionique. Il peut être soluble dans l'eau (hydrosoluble) ou les solvants polaires.

### **I. 2. 3 Hydrophobicité [2]**

C'est la capacité de la surface d'une matière à ne pas absorber d'eau. Ainsi sur une surface hydrophobe, l'eau forme de petites gouttelettes qui s'élargissent au fur et à mesure jusqu'à ne plus tenir sur la surface et s'écouler sans pour autant la mouiller.

### **I. 2. 4 Superhydrophobicité**

Les matériaux superhydrophobes sont une catégorie des matériaux hydrophobes ayant un angle de contact supérieur à 150° [1]. On dit qu'une surface est superhydrophobe si et seulement si une goutte d'eau reposant sur cette surface atteint un angle de contact d'au moins 150°. Pour cela une surface doit posséder deux caractéristiques: premièrement son matériau de surface est apolaire, dans un second temps sa texture de surface réalise le modèle Cassie. [3]

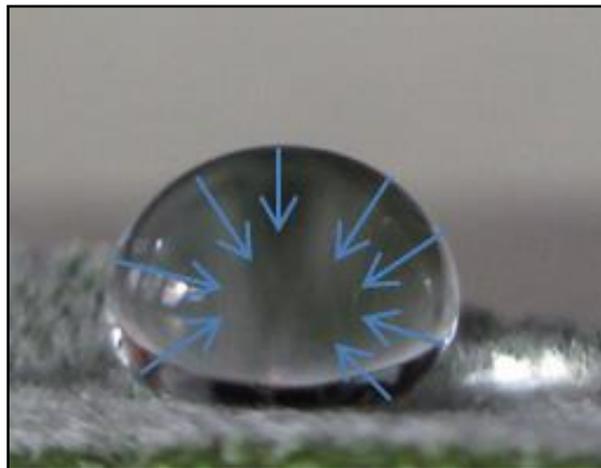
### **I. 2. 5 La mouillabilité [4]**

La mouillabilité est fonction du mouillage qui correspond à la capacité d'un produit à mouiller une surface. Le mouillage est un des phénomènes importants intervenant dans les collages.

De façon générale, lorsqu'un liquide est mis en contact avec la surface d'un solide, il se forme un angle de raccordement du premier sur le second. Lorsque le mouillage est parfait, l'angle de raccordement devient nul. Dans ce cas l'énergie d'adhésion est maximum. Pour un système liquide-solide donné, le mouillage dépend de la pression, de la température, de l'hygrométrie.

### I. 2. 6 Force de Van der Waals [5]

Les liquides sont caractérisés par des forces d'attraction de courte portée entre molécules appelées forces de Van der Waals. A l'intérieur du liquide, ces forces sont sans effet car elles se compensent : elles s'appliquent dans toutes les directions donc la somme des forces est nulle. Mais à la surface, la somme de ces forces d'attractions est dirigée vers l'intérieur du liquide, puisqu'il n'y a des molécules du liquide que d'un côté et du gaz de l'autre côté. En conséquence, la surface du liquide prend la valeur la plus petite possible pour minimiser la tension de surface d'où la force demi-sphérique, voir sphérique d'une goutte sur une surface.



**Fig. I. 1** force d'attraction des molécules d'eau, exemple d'une goutte d'eau déposée sur une feuille de sauge

### I. 2 .7 Tension superficielle [6]

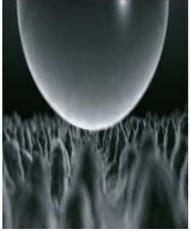
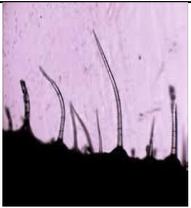
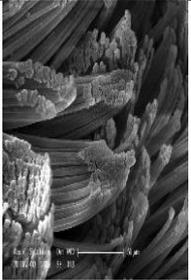
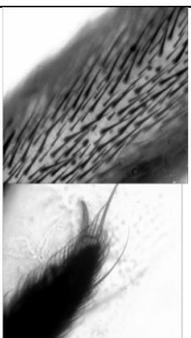
Appelée tension de surface ou énergie d'interface ou bien encore énergie de surface. La tension superficielle est une force qui existe au niveau de toute interface entre deux milieux différents (entre un solide ou un liquide et un gaz). La tension entre des milieux identiques: deux solides, deux liquides, ou également entre un liquide et un solide est généralement appelée: la tension interfaciale.

C'est donc cette force, la tension superficielle, qui permet à la goutte d'eau de ne pas s'étaler sur une feuille, ou à certains insectes de marcher sur l'eau, ou bien encore qui permet cette forme bombée de l'eau dans un verre à ras bord avec la notion de capillarité.

### I. 3 Différents types de matériaux [6 - 7]

#### I. 3. 1 Matériaux naturels

Le tableau I.1 regroupe quelques végétaux, animaux et oiseaux superhydrophobes

Type de matériau	Valeur de l'angle	Type de surface	Exemple	Photo	Caractéristiques	Photo Microscope
Plantes	<150°	Super hydrophobe	Lotus		L'effet lotus est dû à la présence de micro et nano structures rugueuses	
	79°	Hydrophobe	Plante grasse, Crassua		Pas de trichome Pellicule, probablement de la cire	
	41°	Hydrophobe	Géranium		Trichomes très espacés Couleur terne	
Animaux	<150°	Super hydrophobe	Canard		Structures appelées barbe recouvre la plume	
	170°	Super hydrophobe	Gerris		Poils tout inclinés dans une même direction est espacés chacun par une même distance :il s'agit d'une structure isotrope	

Tab I.1 : Matériaux naturels (Animaux, oiseaux et autres)

### **I. 3. 2 Matériaux artificiels**

Généralement pour obtenir une surface superhydrophobe, il suffit d'être hydrophobe, avec une basse énergie de surface, mais surtout rugueux, dans les échelles micrométrique et nanométriques, en favorisant l'emprisonnement d'air dans la topographie. Au courant des années 1990 et 2000, plusieurs techniques ont été proposées. Le procédé pour l'obtention de surface peut se faire en deux étapes : rendre un substrat rugueux dans le mode nano-micro et abaisser l'énergie de surface [8]. Toute fois, il est possible d'obtenir des rugosités tout en abaissant l'énergie de surface en une seule étape. Les techniques les plus communes sont décrites dans cette section, comme par exemple le dépôt par bain chimique, le dépôt électrochimique ou encore les revêtements au plasma [9].

#### **I. 3. 2. 1 Dépôt par bain chimique [9]**

Le dépôt par bain chimique est une des méthodes les plus simples pour l'application de couches minces et de nanomatériaux, des matériaux ayant des caractéristiques particulières à cause de leur taille nanométrique. Cette technique permet de faire de grandes quantités de substrats ou encore de travailler en continu. L'avantage majeur de cette technique c'est qu'elle ne requiert pas d'équipement dispendieux, seulement un contenant, une solution de déposition et un substrat. Lorsque le substrat est mis en contact avec la solution, il y a une réaction ou une décomposition survenant près de la surface formant des dépôts de topographie distincte.

#### **I. 3. 2. 2 Dépôt par vapeur chimique [10]**

Le dépôt par vapeur chimique est une technique d'application de film solide de haute pureté et de haute performance. L'équipement utilisé est coûteux, demandant une chambre contrôlée (pression et température) réduisant la grosseur possible du substrat. Dans ce procédé, un substrat est exposé à des vapeurs chimiques pouvant réagir ou se décomposer à la surface produisant le dépôt désiré.

#### **I. 3. 2. 3 Dépôt électrochimique [11]**

Le dépôt électrochimique (électrodéposition) est une technique d'application de couche mince sur des métaux. Cette technique est rapide, peu coûteuse et permet des procédés à des températures normales. Le procédé consiste à placer deux substrats dans un liquide (produit chimique basique ou acide). L'un est la cathode, l'autre est l'anode. En utilisant du courant continu de différent voltage, certain composé sont déposés sur des surfaces. Il est possible de varier la grosseur et la quantité de composés à la surface. La nature du composé déposé et sa géométrie varient selon si la pièce est anode ou cathode.

#### **I. 3. 2. 4 Gravure chimique [12]**

La gravure chimique est un procédé qui consiste à enlever des couches microscopiques de métaux à l'aide d'une base ou d'un acide. Le procédé utilisé est simple: le substrat de métal est déposé dans la solution qui attaque la surface. Cette technique est peu coûteuse et permet de varier plusieurs paramètres comme le temps d'attaque, la concentration de l'acide ou la température du procédé par exemple, permettant ainsi de modifier la géométrie et la nature des surfaces.

#### **I. 3. 2. 5 Photolithographie [13]**

Le procédé de Photolithographie est très utilisé en électronique pour l'application de couche mince sur une surface. Le procédé est simple au début, mais devient complexe à la longue. Comme première étape il faut enduire la surface d'un film mince de polymère ou de photo résine laquelle est radiée par un faisceau lumineux de haute précision donnant la topographie requise. L'équipement s'avère coûteux, toutefois il permet d'obtenir des topographies continues.

#### **I. 3. 2. 6 Techniques utilisant le plasma [14]**

Le plasma est beaucoup utilisé en nano-fabrication des surfaces. Il peut être utilisé comme technique d'arrachement de matière ou technique de déposition. Pour la gravure des substrats, la surface est attaquée par des ions arrachant ainsi certaines parties. Pour la déposition, les ions déposent sur la surface des ions pris dans un bain de vapeurs chimiques.

### **I. 4 Propriétés électriques et particulières**

#### **I. 4. 1 Propriétés électriques [15]**

Les propriétés de surface d'un matériau sont fortement liées aux espèces chimiques présentes à sa surface parmi les principales propriétés d'une surface se trouvent sa mouillabilité, autrement dit l'interaction de l'eau avec sa surface. Cette propriété est liée aux groupes terminaux des molécules situés dans l'interface de la surface, et qui sont soit hydrophiles, hydrophobes, superhydrophobes. Le comportement d'un matériau est caractérisé par sa réaction à une sollicitation et parmi ces propriétés on distingue 4 types:

##### **I. 4. 1. 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. Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

- La permittivité d'un matériau apolaire demeure presque constante dans un domaine de température et de fréquence bien déterminé ainsi par un facteur de dissipation diélectrique faible. La permittivité d'un matériau polaire varie en fonction de la température et de la fréquence, il est caractérisé par un facteur de dissipation maximale.
- L'humidité accroît dans de grandes proportions la permittivité et le facteur de dissipation.
- Les pertes diélectriques augmentent avec l'intensité du champ électrique appliqué, surtout à partir du moment où le seuil d'ionisation est dépassé et où les décharges intenses commencent à se produire dans les vides de l'isolant.

#### **I. 4. 1. 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. Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux on distingue deux types de rigidité:

##### **I. 4. 1. 2. 1 Rigidité diélectrique transversale**

Elle est obtenue en appliquant un champ électrique aux surfaces principales du matériau.

##### **I. 4. 1. 2. 2 Rigidité diélectrique longitudinale**

Elle est obtenue en appliquant un champ électrique entre deux conducteurs situés sur une même surface du matériau. Elle dépend peu de la nature de l'isolant, mais beaucoup plus de son état de sécheresse et de propreté.

- lorsque la température croît la rigidité diélectrique est soit constante, soit légèrement décroissante. Puis à partir d'une certaine température limite appelée température de transition, une décroissance très rapide est amorcée.

##### **I. 4. 1. 3 Résistance**

On distingue trois types de résistances:

- Résistance transversale ( $R_v$ )
- Résistance superficielle ( $R_s$ )
- Résistance d'isolement ( $R_i$ )

Concernant cette propriété, le matériau testé lors de cette étude est caractérisé par sa résistance superficielle.

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.

- La résistivité d'un matériau isolant en fonction du champ électrique est constante pour des valeurs inférieures ou égales à une certaine limite constituant la zone de linéarité. Au-delà de cette limite la résistivité superficielle est variable.

- la résistivité des matériaux isolants décroît en fonction de la température.

- l'influence de l'humidité sur la résistivité superficielle des matériaux isolants dépend de la teneur en eau à la saturation des matériaux considérés et de son état présent d'humidification.

#### I. 4. 1. 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.

### I. 4. 2 Propriétés particulières

#### I. 4. 2. 1 Angle de contact [16]

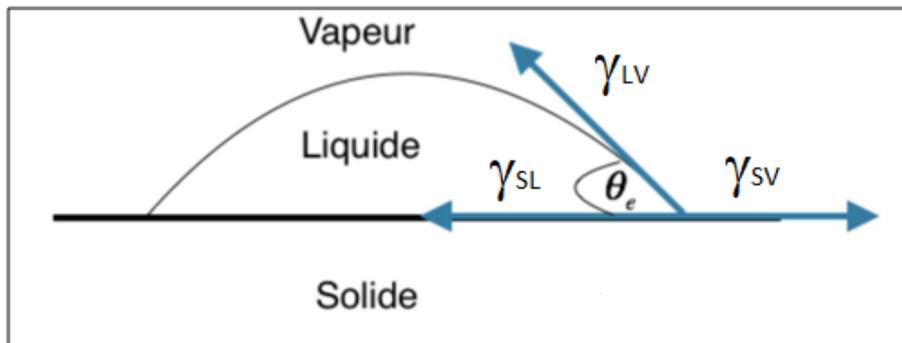


Fig. I. 2 : Représentation de l'angle de contact à l'équilibre

L'angle de contact (ou angle de raccordement) d'un liquide sur un solide est l'angle formé par la surface du solide avec la tangente à une goutte du liquide déposée sur ce solide passant par le bord de la goutte. (Fig. I. 2). Sa valeur d'équilibre se calcule par la loi de Young-Dupré reliant les énergies de surface.

$$\cos \theta_e = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (\text{I. 1})$$

$\gamma_{SV}$  : est la tension superficielle solide-vapeur (Nm-1).

$\gamma_{SL}$  : est la tension superficielle solide-liquide (Nm-1).

$\gamma_{LV}$  : est la tension superficielle liquide-vapeur (Nm-1).

#### I. 4. 2. 2 Modèles de surfaces superhydrophobes [17 - 18]

D'après la littérature, il existe deux modèles permettant de décrire l'influence de la morphologie des surfaces texturées sur le mouillage. Par exemple, le modèle de Wenzel considère une surface rugueuse imprégnée par le liquide et le modèle de Cassie-Baxter modélise le mouillage d'un substrat rugueux lorsque le liquide n'envahit pas la rugosité.

Le modèle de Wenzel est le plus souvent appliqué dans le cas de surfaces texturées physiquement, et celui de Cassie-Baxter pour celles texturées chimiquement. On arrive parfois à combiner ces deux modèles et avoir des surfaces composites.

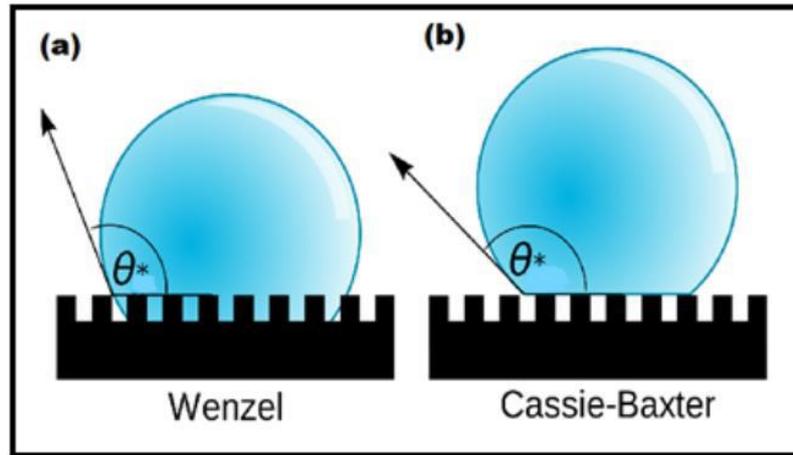
**Selon Wenzel (1936)** est supposé que la goutte posée épouse la rugosité du solide Fig. I. 3a, cela revient à considérer que les énergies en jeu pour les surfaces solide/vapeur et solide/liquide sont  $r\gamma_{SV}$  et  $r\gamma_{SL}$ , en notant  $r$  la rugosité, rapport de la surface réelle du matériau sur sa surface apparente ( $r > 1$ ). On en déduit que l'angle apparent  $\theta^*$  de la goutte s'écrit, en fonction de l'angle de Young  $\theta_e$ .

La relation de Wenzel est la suivante [17]:

$$\cos\theta^* = r\cos\theta_e \quad (\text{I. 2})$$

**Selon Cassie (1944)** le liquide risque de ne pas se conformer à un solide pour lequel il n'a pas d'affinité. Il reposera plutôt sur les sommets de ces aspérités, en laissant de l'air sous lui (Fig. I. 3b). En raisonnant sur le cas simple d'une structure crénelée, on voit que la base d'une telle goutte touchera le solide sur la fraction  $\varphi_s$  de surface occupée par le sommet des créneaux, et l'air sur la fraction  $(1 - \varphi_s)$ , les angles sur ces deux milieux sont  $\theta$  et  $180^\circ$ , et l'angle observé sera une moyenne entre ces deux valeurs (qui s'obtient via les cosinus de ces angles, comme nous l'apprend la relation de Young). On trouve ainsi pour l'angle apparent sur une telle surface composite [18] :

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



**Fig. I. 3 :** Schéma de gouttes sur des surfaces superhydrophobes dont la rugosité est faite de piliers micrométriques, en état Wenzel (a) et en état Cassie-Baxter (b)

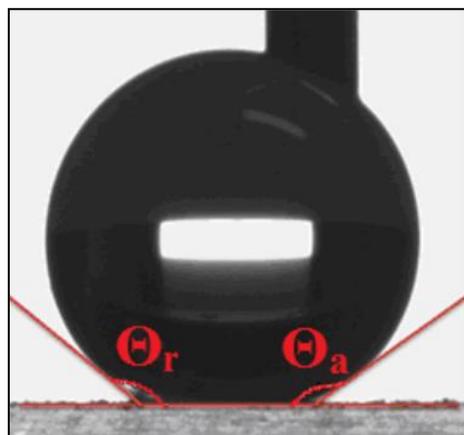
#### I. 4. 2. 3 L'hystérésis de l'angle de contact

Un angle de contact supérieur à  $150^\circ$  n'est pas le seul critère permettant de qualifier les surfaces superhydrophobes. Ces surfaces démontrent aussi une faible hystérésis de l'angle de contact (HAC) [19]. Ce dernier nous permet de comprendre le comportement d'une goutte d'eau vis-à-vis d'une surface en mouvement. C'est-à-dire de savoir si la goutte va s'accrocher ou glisser sur la surface. Pour cela, on mesure l'angle d'avancée et de reculée (Fig. I. 5).

On note HAC la différence entre l'angle d'avancée ( $\theta_a$ ) et l'angle de reculée ( $\theta_r$ ) (Équation I. 4). Plus l'hystérésis de l'angle de contact est grande, plus l'accrochage des gouttes est important. A l'opposé, plus il est petite, plus la goutte glisse facilement sur la surface.

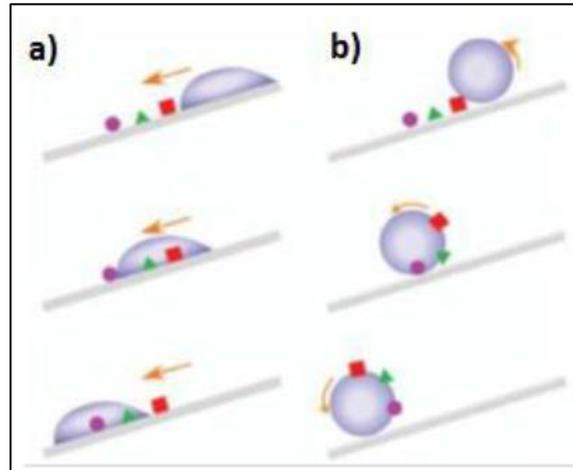
L'importance de l'hystérésis de l'angle de contact est souvent attribuée aux surfaces chimiquement et morphologiquement hétérogènes et aussi à la présence d'une rugosité [20].

$$\text{HAC} = \theta_a - \theta_r \quad (\text{I. 4})$$



**Fig. I. 4:** Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact (HAC)

Les surfaces superhydrophobes possèdent un large champ d'applications dans divers domaines. L'application la plus courante est celle des surfaces autonettoyantes [21]. Cette propriété permet l'élimination de poussières et autres saletés des surfaces (Fig. I. 5).



**Fig. I. 5:** Démonstration de la propriété autonettoyante (a: une surface lisse, l'eau n'enlève pas les contaminants, b: surface superhydrophobe et autonettoyante) [22]

Les surfaces superhydrophobes sont souvent utilisées dans le domaine biomédical [23], empêchant les contaminants de se propager sur les surfaces. De plus, ces surfaces peuvent servir comme des agents anticorrosifs [24]. Aussi, ils sont applicables afin de protéger différentes structures et équipements de la neige ou le givre qui y adhèrent [25].

## I. 5 Paramètres d'influences [5]

### I. 5. 1 Rigidité superficielle

#### I. 5. 1. 1 Géométrie des électrodes

- Si les électrodes ne déterminent pas sur sa surface un champ uniforme, le champ moyen de contournement sera inférieur au champ uniforme que pourrait supporter la surface isolante (c'est aux bords des électrodes que se produisent les concentrations de champ).
- Une autre raison pour laquelle la forme des électrodes affecte les tensions de contournement d'une isolation est liée au rôle des décharges dans le milieu ambiant. C'est également au voisinage des bords des électrodes que celles-ci ont la plus grande probabilité de se produire. D'où la nécessité de préciser les rayons de courbure des électrodes.

#### I. 5. 1. 2 Nature de la tension appliquée

Généralement la tension de contournement de l'isolation décroît, lorsque l'on passe de l'impulsion au continu et du continu a l'alternatif.

### I. 5. 1. 3 Durée d’application de la tension

La tension de contournement de l’isolation diminue avec l’augmentation de la durée d’application de la tension. Cette fonction définit la courbe de durée de vie d’un matériau, cette décroissance est imputable à l’action prolongée ou répétée des décharges de surface qui fatiguent le matériau et le rendent vulnérable sous tension plus faibles.

L’influence de l’humidité est sensible dans le cas de la rigidité diélectrique, particulièrement lorsqu’il s’agit de produits hygroscopiques, comme certains stratifiés à base de papiers.

### I. 5. 2 Résistivité superficielle

#### I. 5. 2. 1 Champ appliqué

La résistivité est indépendante du champ appliqué, c’est-à-dire que le courant croît proportionnellement à la tension, pour des valeurs de champ inférieurs à une certaine valeur qui constitue la limite de la zone de linéarité.

Cette limite se situe à des niveaux différents suivant les matériaux, leur température et leur état hygroscopique, au-delà de cette limite, la variation du courant en fonction de la tension.

### I.6 Applications [6]

Domaine d’application	Photos	Nature de l’application	Explication
La marine		Bateau	éliminer le frottement entre l’eau et la coque du bateau en partie ce qui permet d’améliorer leur flottabilité, leur vitesse mais aussi de baisser leur consommation de carburant.
Nautique		Combinaison Gore-tex	améliorant les performances des nageurs
L’industrie		Araignée d’eau robotique	Nettoyage de canalisation pour les serpents ; exploitation, transport de marchandises et travaux agricoles pour bêtes à patte, ou encore déminage sous mas marin pour les langoustes

Tab. I. 2: Exemples d’applications

## I. 7 Avantages et inconvénients [6]

### I. 7. 1 Inconvénients

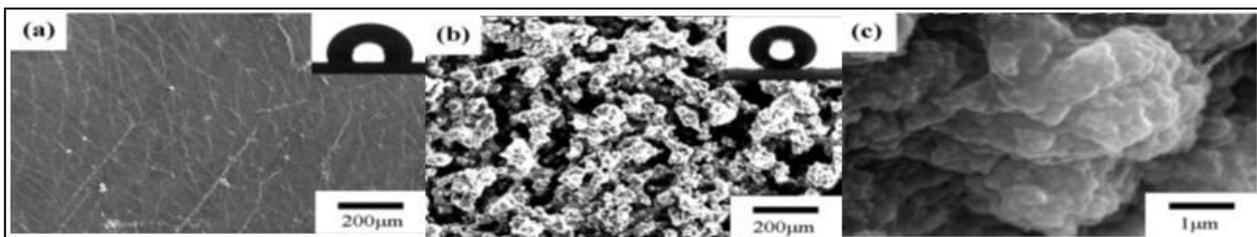
Comme nous venons de le voir, dans la plupart des produits utilisant le phénomène hydrophobique, les nanotechnologies sont au cœur de l'innovation. Les sprays hydrophobes, les peintures autonettoyantes (qui utilisent le  $TiO_2$ ), les pare-brise ou toutes autres applications, consistent en réalité en un dépôt d'une fine couche de nanoparticules. Cependant, il existe quelques inconvénients notables à cette utilisation :

- Le coût des matériaux ou des objets en eux-mêmes reste encore assez élevé. Par exemple le carrelage autonettoyant est innovateur et très utile mais est surtout peu abordable pour les personnes aux revenus moyens.
- La toxicité du spray n'a pas encore été réellement prouvée car cette invention est nouvelle mais ses composants sont nocifs pour la peau ou par inhalation.
- la durabilité de l'effet lotus qui est encore peu conséquent car les petites piques permettant de laisser passer l'air sont très fragiles, plus elles s'abîment moins le phénomène hydrophobe est performant ce qui baisse la rentabilité de ces innovations.

### I. 7. 2 Avantages

L'industrie parvient aujourd'hui à recréer artificiellement le phénomène d'hydrophobie grâce à la découverte de deux espèces chimiques qui possèdent chacune cette propriété : le carbone et le dioxyde de titane, Le premier avantage qui nous vient à l'esprit lorsque l'on parle de superhydrophobie est bien évidemment l'évacuation de l'eau, Le lotus possède une protection contre les salissures ainsi qu'une défense efficace contre les pathogènes, Les poussières se déposant sur les feuilles sont évacuées par une simple goutte d'eau qui tomberait sur la surface.

## I. 8 Travaux antérieures récents sur la performance électrique des isolations superhydrophobe



**Fig. I.6:** l'image de microscopie électronique à balayage et hydrophobie des surfaces de caoutchouc de silicone : a) commune b) superhydrophobe c) vue agrandie d'une partie

Y. Li et all a étudié l’effet de la conductivité et le volume sur la performance d’une surface superhydrophobe en comparaison par rapport à la même surface mais hydrophobe. Les images prises au microscope à balayage électronique avec différents agrandissements de la surface superhydrophobe sont résumées en figure I. 6.

La surface superhydrophobe fabriquée par les auteurs est à base de silicone pure sur laquelle sont greffées des nanoparticules de SiO<sub>2</sub>. Son angle de contact est de l’ordre de 161.8°.

L’effet de la conductivité électrique et le volume des gouttes d’eau sur la performance de la surface suscitée est illustrée par la figure I. 7. Il en résulte une influence négligeable de ces deux paramètres sur sa performance, contrairement à la surface hydrophobe qui voit sa performance diminuer avec l’élévation du volume et de la conductivité électrique.

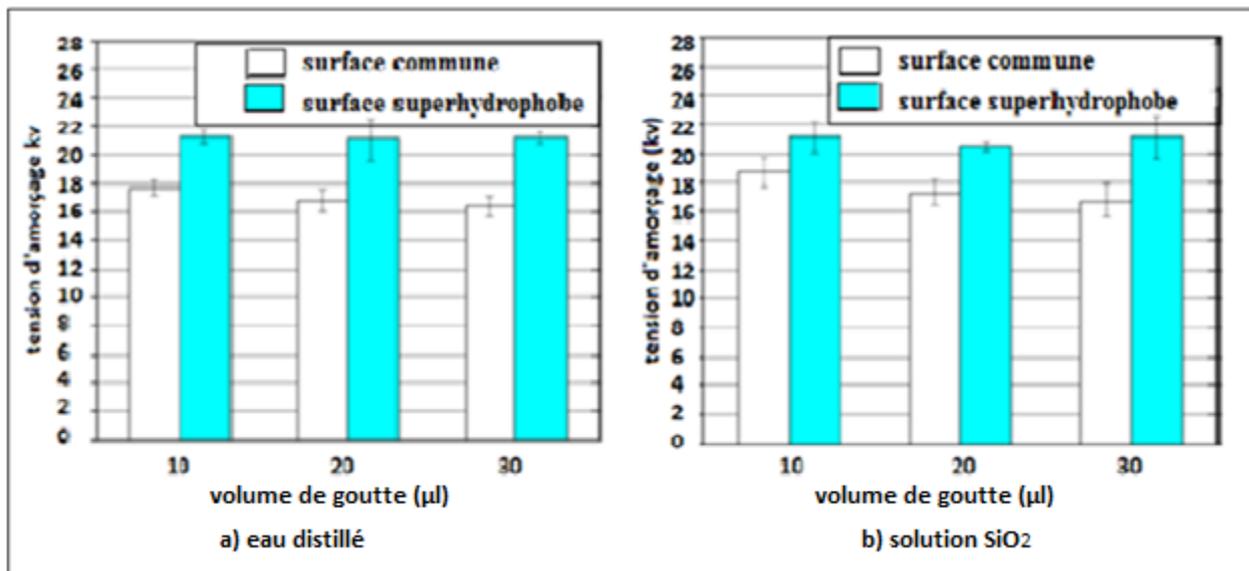


Fig. I. 7: Tension de contournement de chaque surface pour différents liquides

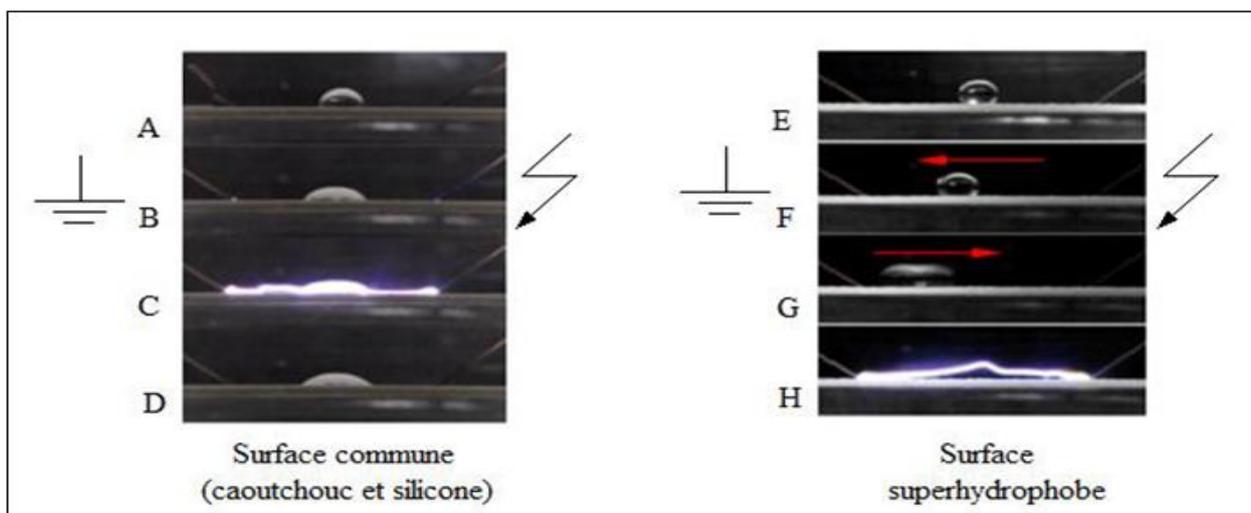


Fig. I. 8: Comportement électrohydrodynamique d’une gouttelette d’eau et phénomène de contournement de différentes surfaces sur lesquelles repose cette goutte

La visualisation du comportement électrique d'une goutte d'eau posée sur les surfaces hydrophobe et superhydrophobe est décrite par la figure I. 8. Selon ces auteurs, sur la surface hydrophobe le chemin d'isolation et la tension de contournement est affectée par le volume des gouttelettes ainsi que la conductivité. Par contre sur la surface superhydrophobe le chemin d'isolation est plus long que pour la surface hydrophobe et sa tension de contournement est plus élevée donc la gouttelette est capable de quitter la surface sous une tension continue.

Belguendouz et Kaouane [26] ont étudié le comportement des gouttes d'eau déposées en lignes droites et en zigzag sur une surface superhydrophobe sous une tension continue positive.

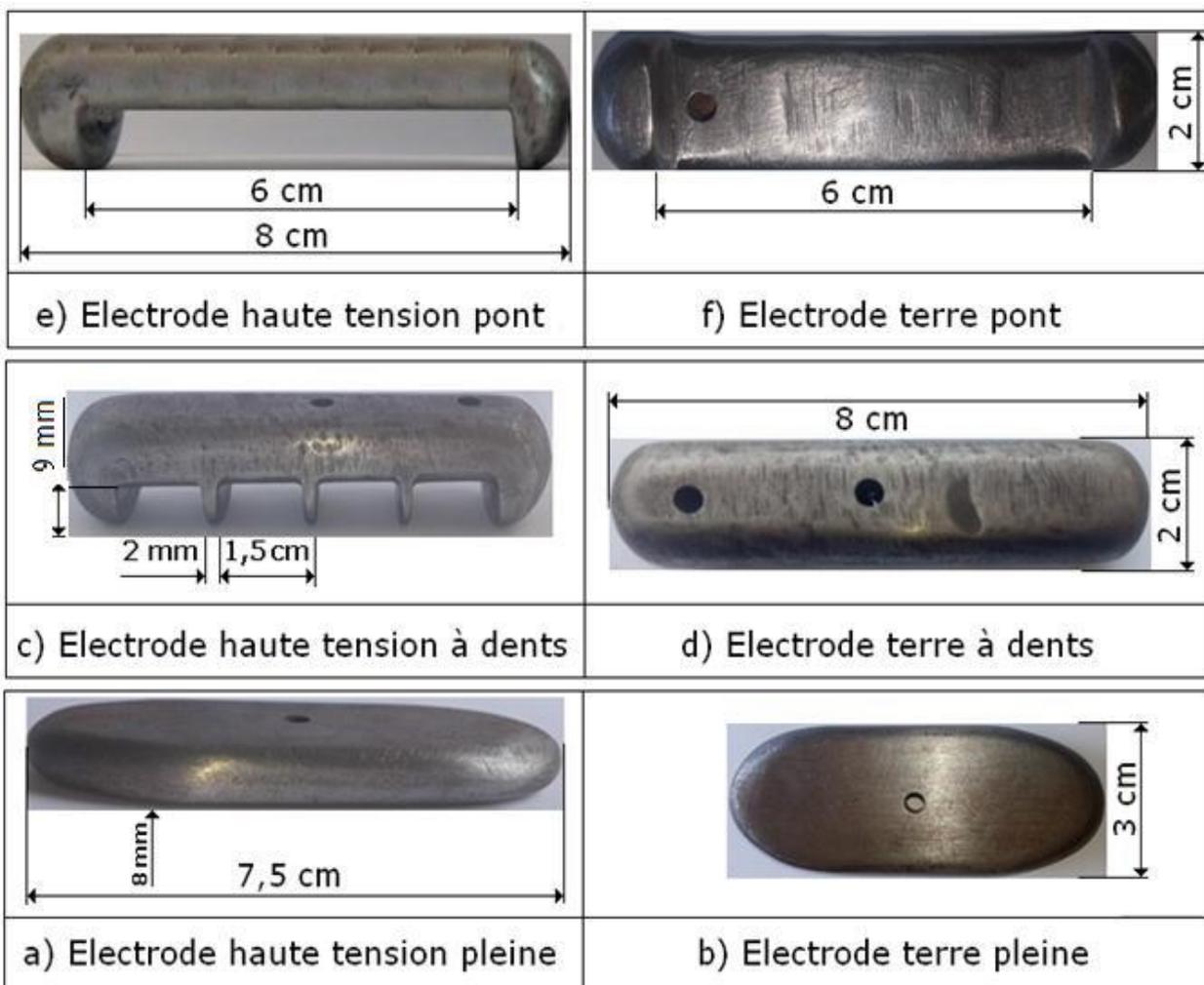
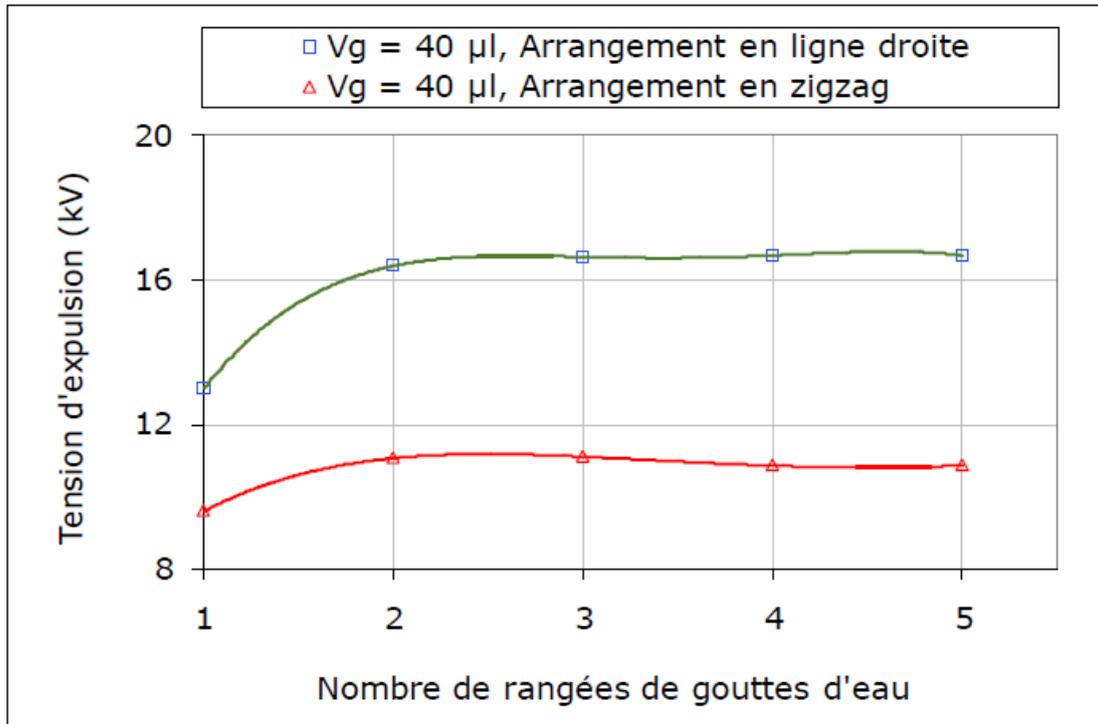


Fig. I. 9: Systèmes d'électrodes utilisées

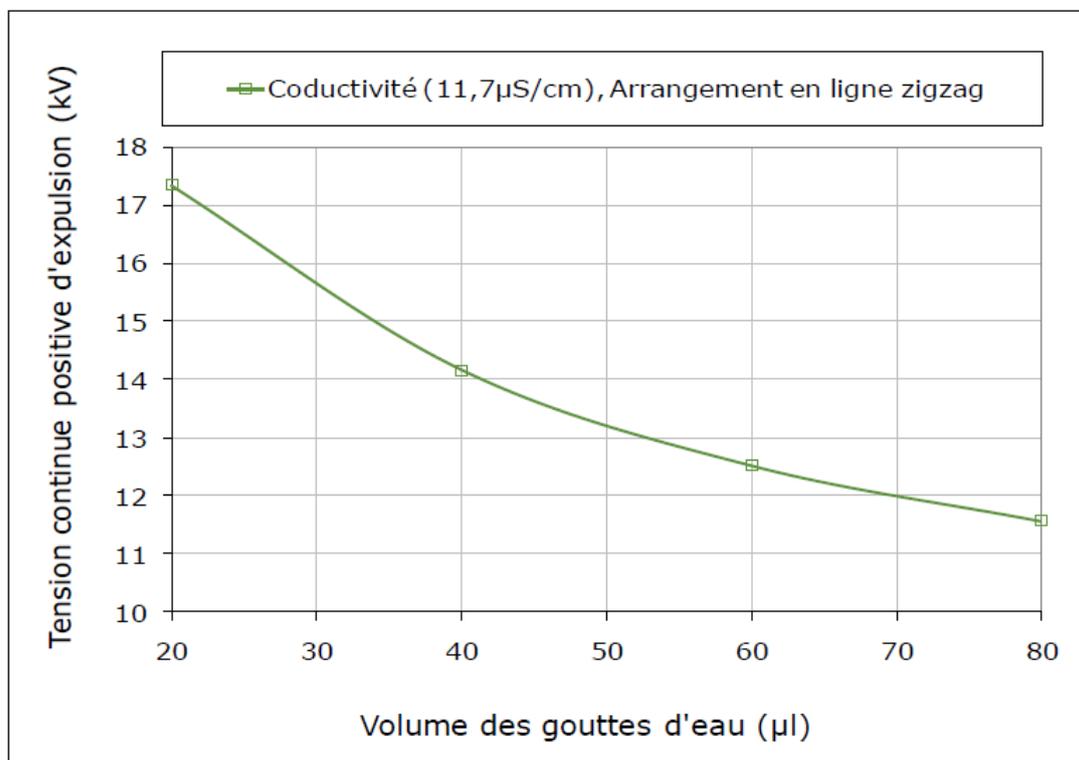
Trois profils d'électrodes ont été confectionnés (fig. I. 9).

Les auteurs ont montré que la tension d'expulsion de la dernière goutte d'eau croît jusqu'à une valeur limite du nombre de rangées de gouttes égale à 2 quel que soit le mode d'arrangement choisi et au-delà de cette limite, la tension d'évacuation demeure constante indépendamment du nombre

de rangées ajoutées (Fig. I. 10). La tension d'expulsion des gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites est plus élevée qu'en zigzag.



**Fig. I. 10:** Tension continue positive d'expulsion en fonction de la nature de l'arrangement et du nombre de rangées de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe



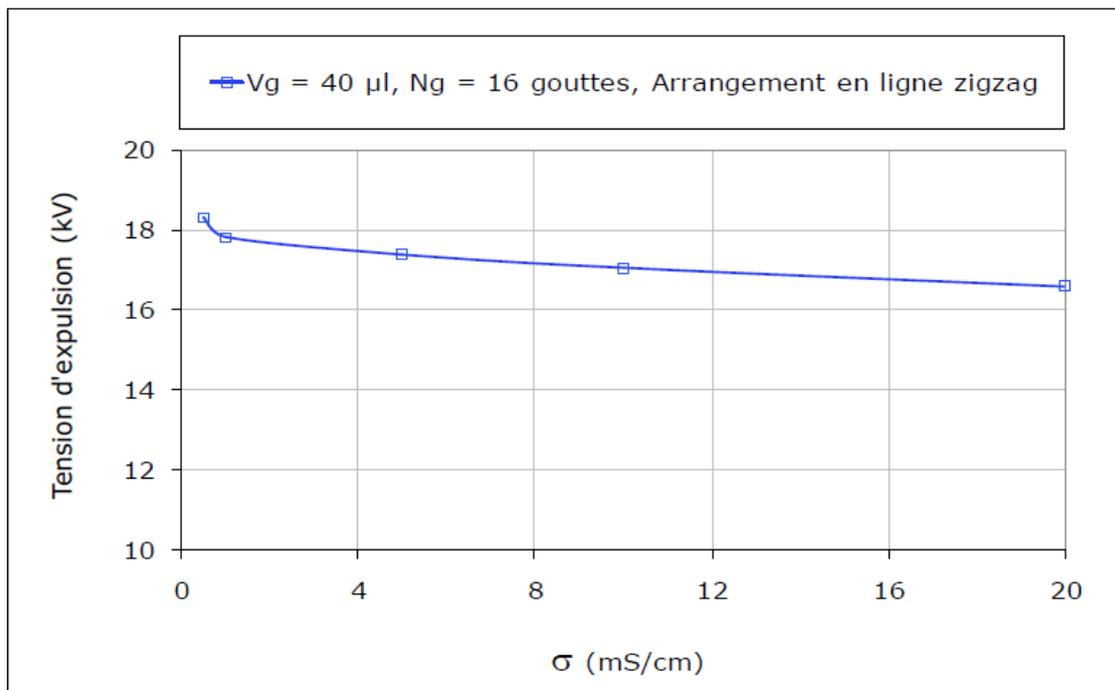
**Fig. I. 11:** Tension continue positive d'expulsion en fonction du volume des gouttes d'eau déposée sur la surface de l'isolation superhydrophobe

Les auteurs ont mis aussi en évidence l'existence de deux modes d'évacuation des gouttes d'eau à savoir grupo-individuel unidirectionnel vers l'une ou l'autre des deux électrodes ou bidirectionnel vers les deux électrodes.

Ils ont constaté que le dernier mode est plus fréquent.

Concernant le volume des gouttes d'eau (Fig. I. 11), les auteurs ont révélé que la tension d'éjection de leur taille à cause de l'effet Cassie qui stipule que plus celle-ci repose plus sur les sommets des aspérités de la surface de l'isolation, ce qui facilite leur évacuation sous une tension plus faible.

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. 12)

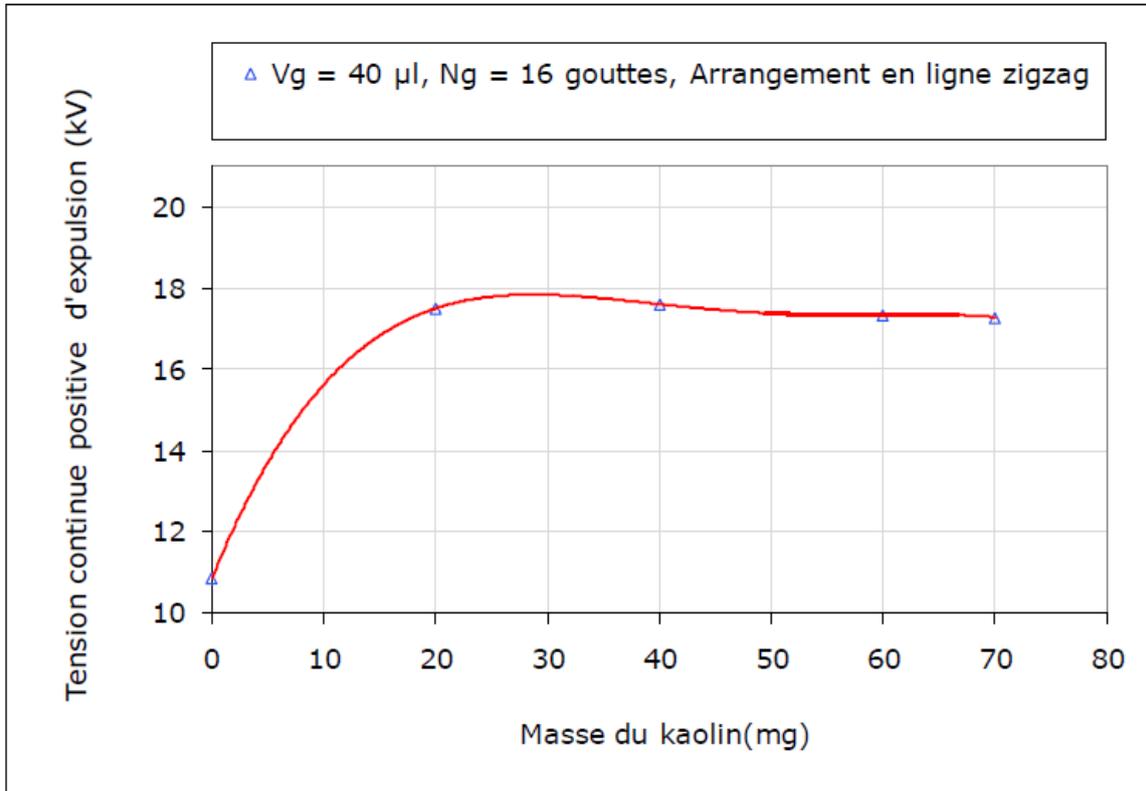


**Fig. I. 12:** Tension continue positive d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

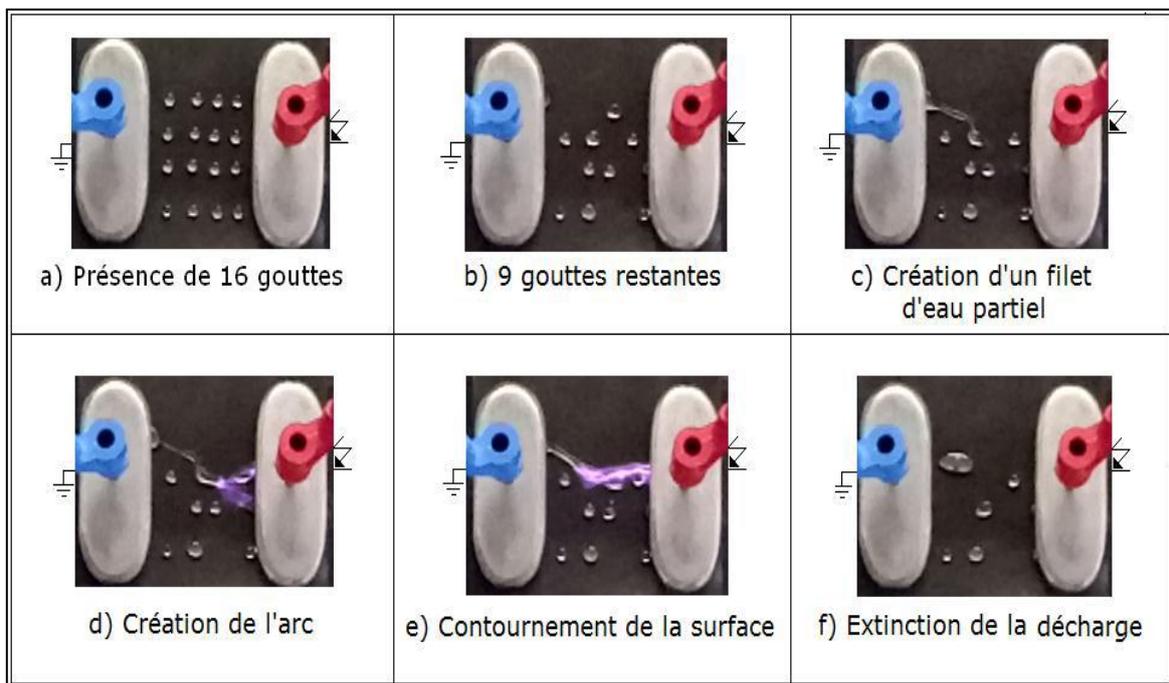
Concernant la viscosité des gouttes d'eau, les auteurs ont remarqué que la tension d'éjection de la dernière goutte augmente en fonction de la masse du kaolin et à partir de 40 g/l, la tension d'évacuation de la dernière goutte reste constante quelle que soit la masse du kaolin ajoutée fig. I. 13.

Enfin, les auteurs ont constaté qu'avec les électrodes pleins ou à dents des décharges électriques partielles et/ou de contournement apparaissent suite à la coalescence, l'effilement des gouttes d'eau ainsi que la persistance de certaines de celles-ci sur la surface de l'isolation malgré l'application d'une tension très proche de celle de contournement de l'isolation (Figs. I. 14 et I. 15). Par contre

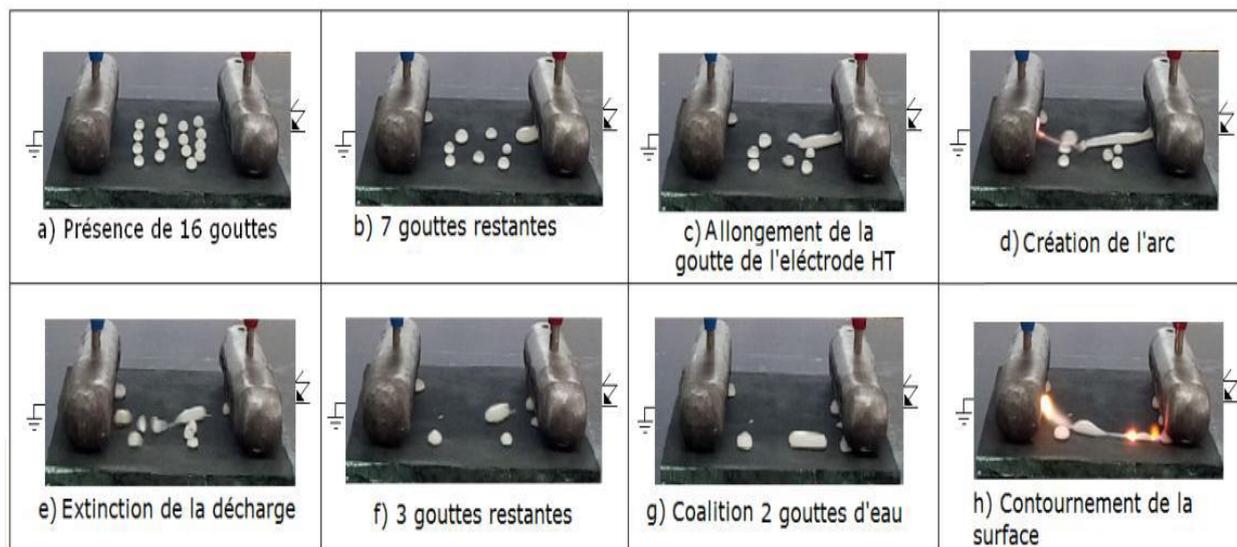
avec les électrodes à pont les décharges électriques se forment très rarement du fait de leur expulsion à l'extérieur de l'isolation via les ouvertures créées sur les électrodes à pont.



**Fig. I. 13:** Tension d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe



**Fig. I. 14:** Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes pleines



**Fig. I. 15:** Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes à dents

## I. 9 Conclusion

Dans ce chapitre un aperçu sur la caractéristique des surfaces superhydrophobes a été donné. Quelques exemples d'animaux, insectes et végétaux, utilisant la propriété de la superhydrophobicité ont été cités. Les domaines d'application de cette caractéristique ont été décrits. La synthèse de travaux de recherche très récents nous a permis de nous situer dans la tâche à accomplir dans le cadre de la réalisation de notre présent projet de fin d'études.

*Chapitre II*  
*Pollution des isolations*  
*électriques*

## II. 1 Introduction

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique.

La pollution de ces isolateurs figure comme un vrai problème néfaste à leur bon fonctionnement. Les dépôts polluants sur la surface isolante peut provoquer la diminution de la résistivité électrique et de leur tension de tenue comme elle peut conduire au contournement de l'isolateur dans certains cas critiques, ce qui constitue la situation la plus grave. La connaissance des différentes sources de pollution et le degré de pollution, est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau des isolements des ouvrages installés en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

## II. 2 Définitions et significations

### II. 2. 1 Pollution

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui lie en général à sous-production de l'activité humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes.

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolatrices hautes tensions. Selon l'emplacement et les zones environnantes, les isolateurs rencontrent différents types de polluants : les grains de sable, des substances métalliques et chimiques et du sel, qui provoquent la formation d'une couche sur la surface des isolateurs, qui incite la diminution de la rigidité diélectrique de l'isolateur.

### II. 2. 2 Salinité

La salinité désigne la quantité de sel dans un liquide. Elle correspond à la masse de sel divisée par volume de la solution, généralement exprimée en  $\text{kg} / \text{m}^3$ .

### II. 2. 3 Couche de pollution

C'est une couche conductrice électrolytique mise sur la surface de l'isolateur. Elle est composée du sel et des matériaux inertes. Cette couche de pollution, quand elle est humidifiée, réduit considérablement la résistivité surfacique des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tenue diélectrique.

#### **II. 2. 4 Degré de pollution**

C'est la valeur qui caractérise la pollution artificielle appliquée sur l'isolateur, telle que la quantité (salinité, conductivité de la couche et densité du dépôt de sel) [27 - 28]

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI 81-5 qui sont: faible, moyenne, forte et très forte.

#### **II. 3 Sources de pollution**

On peut classer les différentes sources de pollution en trois catégories :

- Pollution naturelle (marine, désertique,...);
- Pollution industrielle;
- Pollution mixte

##### **II. 3. 1 Pollution naturelle**

Ce type de pollution est très répandu et affecte un grand nombre d'ouvrages. Cette pollution peut être engendrée par : celle désertique, marine ou autre, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les vents, pluie,...etc.

###### **II. 3. 1. 1 Pollution désertique**

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sable déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts seront humidifiés par la rosée matinale, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sel dans le sable [29], engendrant ainsi une diminution de la résistance superficielle des isolateurs.

###### **II. 3. 1. 2 Pollution marine**

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs. Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite encore plus intense, et des arcs pouvant se développer jusqu'à la provocation de contournement total de l'isolant.

###### **II. 3. 1. 3 Autres types de pollution naturelle [30]**

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage, est favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs.

Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement de la chaîne d'isolateur; c'est le contournement sous pluie.

### II. 3. 2 Pollution industrielle

Ce type de pollution est fréquent dans les zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ...etc. Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport [31].

Les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopiques, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs.

### II. 3. 3 Pollution mixte

Cette pollution est la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. Car elle résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées. La couche électrolytique formée par le processus d'humidification des dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolateurs, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique.

## II. 4 Mesure de la sévérité de pollution d'un site

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de caractériser la sévérité de pollution de ce site. La sévérité est généralement caractérisée par l'intensité de précipitation, ainsi que par la conductivité des dépôts polluants [32]. La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

### II. 4. 1 Conductance superficielle

La conductance superficielle ( $G$ ) des isolateurs, installés sur site, est obtenue à partir du rapport du courant électrique ( $I$ ) qui traverse l'isolateur, à la tension d'alimentation de l'isolateur ( $V$ ), suivant la relation (II.1) [33].

$$G = \frac{I}{V} \quad \text{(II. 1)}$$

La conductivité superficielle est due à l'humidité, à une fine couche de polluants ou à la présence d'ions qui se forment à la surface de l'isolant, que ce soit par réactions chimiques ou par l'effet de rayonnement [34].

Elle est obtenue en multipliant la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur [33]. Ce procédé est donc un paramètre qui définit l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche), laquelle détermine la signification d'une surface isolante. Aussi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode convenable 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 [35-36].

#### II. 4. 2 Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de la 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 dans un site. Les méthodes de mesures adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne le phénomène de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air d'un site donné et la sévérité de la pollution de ce même site [35- 38].

#### II. 4. 3 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 (amplitude, décalage de phase,...etc.), 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 [37-38].

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

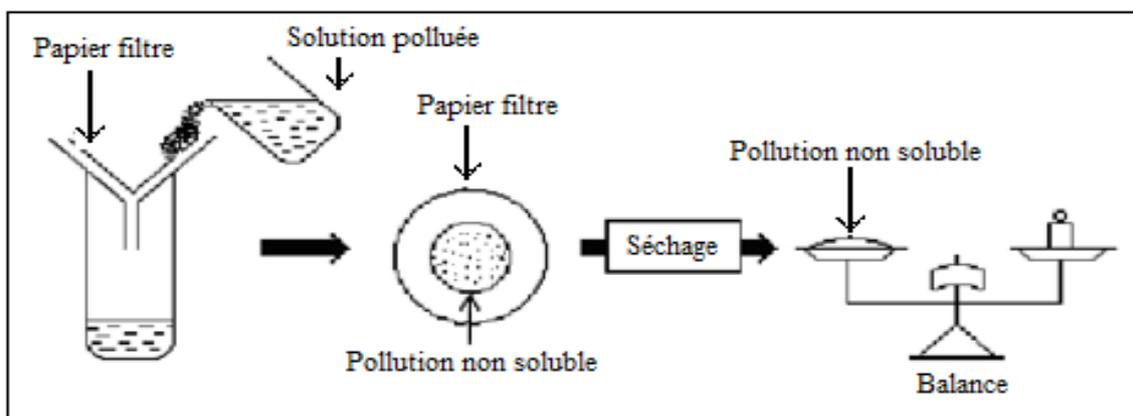


Fig. II.1. Schéma et procédé de mesure de la DDNS

Elle correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution [39]. La détermination de la DDNS (Fig. II.1) s'effectue comme suit :

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

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \quad (\text{II. 2})$$

Où:

DDNS : est la densité de dépôt non soluble en  $\text{mg}/\text{cm}^2$  ;

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

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

A: est la surface lavée de la barrière en  $\text{cm}^2$  ;

#### II. 4. 5 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'un isolateur sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl par  $\text{cm}^3$  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 [39 - 40].

La densité du dépôt de sel équivalent est donnée comme suit :

$$DDSE = S_a \frac{V}{S} \quad (\text{II. 3})$$

Telle que :

V : est le volume de la suspension en  $\text{cm}^3$  ;

S : est la surface nettoyée en  $\text{cm}^2$  ;

$S_a$ : est la salinité exprimé en  $\text{kg} / \text{m}^3$

### II. 5 Conséquence de la pollution sur les équipements électriques

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.

Selon les conditions auxquelles est soumis l'isolateur, trois cas peuvent se présenter :

#### II. 5. 1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Ces arcs peuvent être dus soit à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un courant de fuite, comme ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur, (existence des pics sur la couche de pollution) [41].

### II. 5. 2 Arc fixe

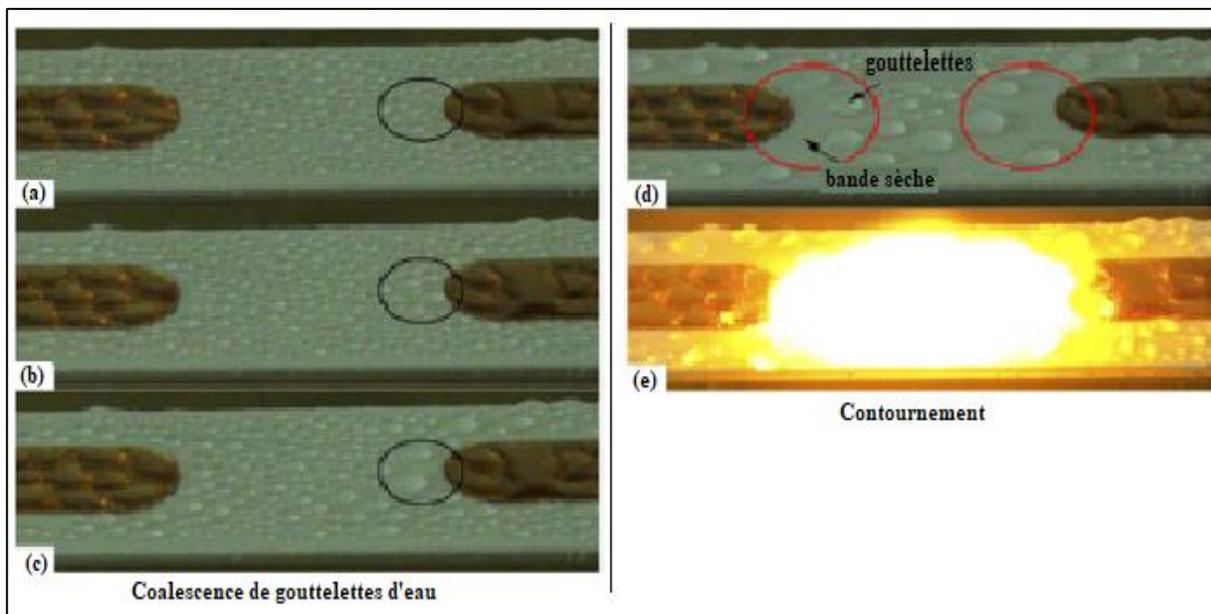
L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [41].

### II. 5. 3 Court-circuit

Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Ainsi, la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorise le passage d'un fort courant, ce cas engendre la rupture totale de l'isolation [37, 42].

### II. 5. 4 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe [43]

#### II. 5. 4. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale

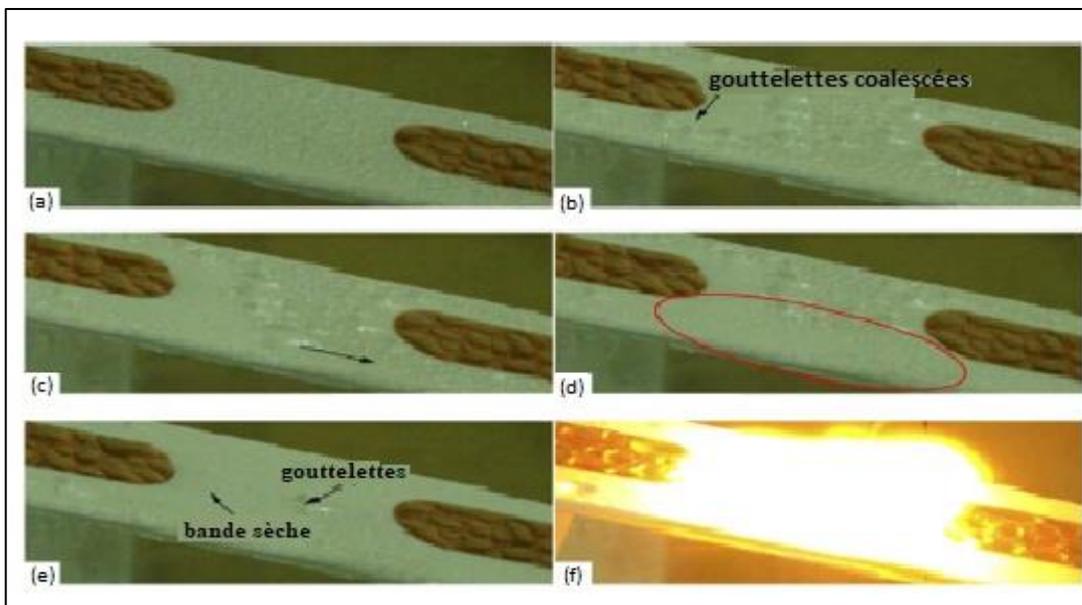


**Fig. II. 2 :** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale et recouverte de gouttes d'eau (a – c: Coalescence de gouttelettes d'eau sous une tension croissante, d: Coalescence de gouttelettes d'eau et formation de multiples zones sèches sur la surface inter électrode, e: contournement de l'isolation)

Le processus de contournement d'une surface en silicone placée horizontalement contient deux étapes: la coalescence de gouttelettes d'eau (Fig. II. 2a, 2b, 2c et 2d) et le contournement (Fig. II. 2e) de l'isolation. Après l'application de la tension, les petites gouttelettes, se coalescent et forment de grosses gouttelettes. L'élévation de la contrainte de tension entraîne l'augmentation du volume de ces grosses gouttelettes d'eau sur sa surface. Le nombre total des gouttelettes d'eau diminue. Par conséquent il en résulte la génération de plusieurs zones sèches réparties sur toute la surface de l'isolation.

#### II. 5. 4. 2 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20°

Le processus d'amorçage d'une surface superhydrophobe inclinée de 20°, possède trois parties: coalescence de gouttelettes d'eau, glissement des gouttelettes d'eau et contournement de l'isolation (Fig. II. 3f). Lors de l'application de la tension, les gouttelettes d'eau coalescent et forment de grosses gouttelettes d'eau (Fig. II. 3b. 3c. 3d et 3e). Cependant, en raison de la faible adhérence de la surface superhydrophobe, les gouttelettes coalescées glissent très facilement sur la surface, et puis survient l'évacuation de la majorité des gouttelettes d'eau. Il reste peu de gouttelettes sur la surface et la bande sèche est plus grande par rapport à la surface hydrophobe (Fig. II. 3d et 3e).



**Fig. II. 3 :** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20° et recouverte de gouttes d'eau (a: Dépôt par pulvérisation de gouttes d'eau sur la surface hors tension, b: Mouvement et coalescence de quelques gouttes d'eau et formation de petites zones sèches, c: Poursuite de la coalescence des gouttes d'eau et augmentation de la surface de zones sèches, d: Formation d'une grande zone sèche (indiquée sur la figure par un cercle rouge), e: Poursuite de l'agrandissement de la zone sèche interélectrode, diminution accrue du nombre de gouttelettes d'eau, f: Contournement de la surface isolante

## **II. 6 Simulation de la pollution au laboratoire**

### **II. 6. 1 Essais sous pollution artificielle**

Les essais au laboratoire sont basés sur la reproduction de la couche de pollution par des solutions réparties une surface isolante et dont la conductivité est différente. Afin de valider les essais sous pollution artificielle, il a été nécessaire de comparer les performances des isolateurs testés au laboratoire à celles des isolateurs en exploitation dans des conditions naturelles. Une première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution, en tenant compte de la répartition non uniforme de la pollution. Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs [44,38].

#### **II. 6. 1. 1 Méthode de la couche solide**

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte par pulvérisation 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 (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante. Certains chercheurs ont utilisé une couche semi-conductrice comme agent polluant [45].

#### **II. 6. 1. 2 Méthode du brouillard salin**

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placée dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité. D'après la classification des sites pollués, les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160  $\text{kg} / \text{m}^3$  [45].

#### **II. 6. 1. 3 Méthode de pollution liquide**

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium. Après

quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire [45].

## **II.7 Techniques de lutte contre La pollution**

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées. Nous allons les résumer comme suit :

### **II. 7. 1 Allongement de la ligne de fuite**

Elle 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) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [33 - 46].

### **II. 7. 2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)**

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [47].

### **II. 7. 3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)**

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [48].

### **II.7. 4 Revêtement à base de silicone**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution [49].

### **II. 7. 5 Les isolateurs composites**

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution

très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service [49].

### **II. 7. 6 Nettoyage des isolateurs**

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

### **II. 8. Conclusion**

Le comportement des isolateurs des lignes aériennes, et l'isolement externe d'une manière générale, est souvent affecté par le phénomène du contournement dû à la pollution. Donc la pollution des isolateurs est un facteur essentiel qu'il faut prendre en considération dans la conception des lignes électriques de haute tension.

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant (degré de pollution) ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante.

***Chapitre III***  
***Partie expérimentale***

### III. 1 Introduction

L'objectif visé à travers ce chapitre consiste en la recherche d'un profil d'électrodes adéquat de telle que son montage sur une surface superhydrophobe préfabriquée auparavant, puisse contribuer efficacement à l'inhibition de toute forme de décharges électriques pouvant engendrer sa dégradation en excluant de sa surface tout genre de dépôt d'humidité sur celle-ci quand elle est mise sous contrainte de tension continue positive. L'effet sur sa performance électrique de quelques paramètres électrogéométriques entre autres, le nombre de gouttes d'eau, leur volume, la conductivité électrique et leur viscosité sera quantifié.

Ces investigations seront appuyées par la visualisation du mode d'éjection des gouttes d'eau en dehors de l'isolation.

### III. 2 Modèle expérimental

Un support en bois 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, par exemple, la position horizontale correspondant à un angle d'inclinaison ( $\alpha = 0^\circ$ ). 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 [56-57].

Dans les travaux antérieurs [26], trois géométries d'électrodes parallélépipédiques pleines à bornes arrondies, cylindriques à dents et cylindriques à pont, ont été fabriquées. Parmi ces profils, seul le dernier contribue facilement l'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation, avec un accrochage très rare des gouttes d'eau aux pieds des électrodes à pont sous tension et terre. Dans le cas de leur persistance, leur effilement engendre généralement la formation de décharges électriques partielles et/ou de contournement du matériau et par conséquent son vieillissement. Afin de contourner ce genre problème, des électrodes adéquates ont été confectionnées dans le cadre de notre étude. Elles sont en acier inoxydable et de forme parallélépipédique avec des extrémités très arrondies. Leur longueur ( $L_e$ ) est de 12 cm (Fig. III. 5), leur largeur ( $l_e$ ) est de 2 cm (Fig. III. 6) et leur épaisseur ( $e_e$ ) est égale à 0,8 cm [26]. La ligne de fuite ( $L_c$ ) de l'isolation est de 4cm (Fig. III. 5). Elles sont suspendues à 10 mm de la surface de l'isolation superhydrophobe à l'aide de deux pitons. L'objectif d'une telle ouverture est de faciliter l'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur

de l'isolation et leur récupération par le bac en couleur rouge en vue de leur réutilisation (Fig. III. 1b6). Le support en bois est peint de plusieurs couches de vernis afin de l'empêcher ultérieurement d'absorber les gouttes d'eau quittant la surface de l'isolation inclinée et atterrissant sur la paroi inférieure de celui-ci à la fin de chaque essai d'éjection des gouttes.

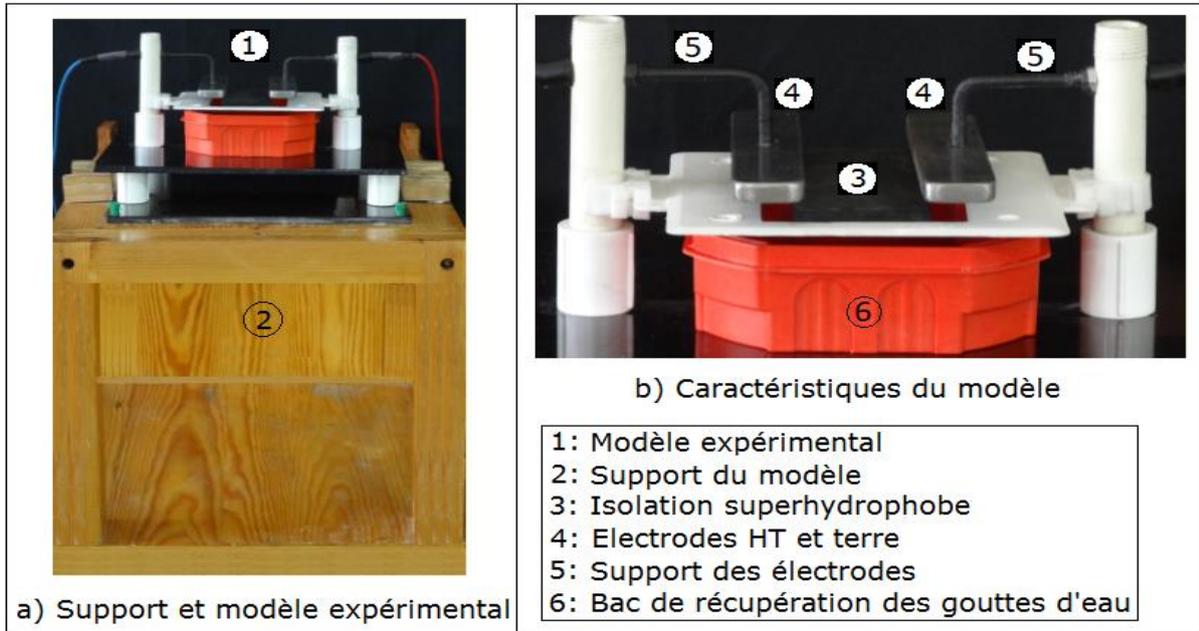


Fig. III. 1: Modèle expérimental utilisé pour la réalisation des essais électriques

### III. 3 Techniques de mesure

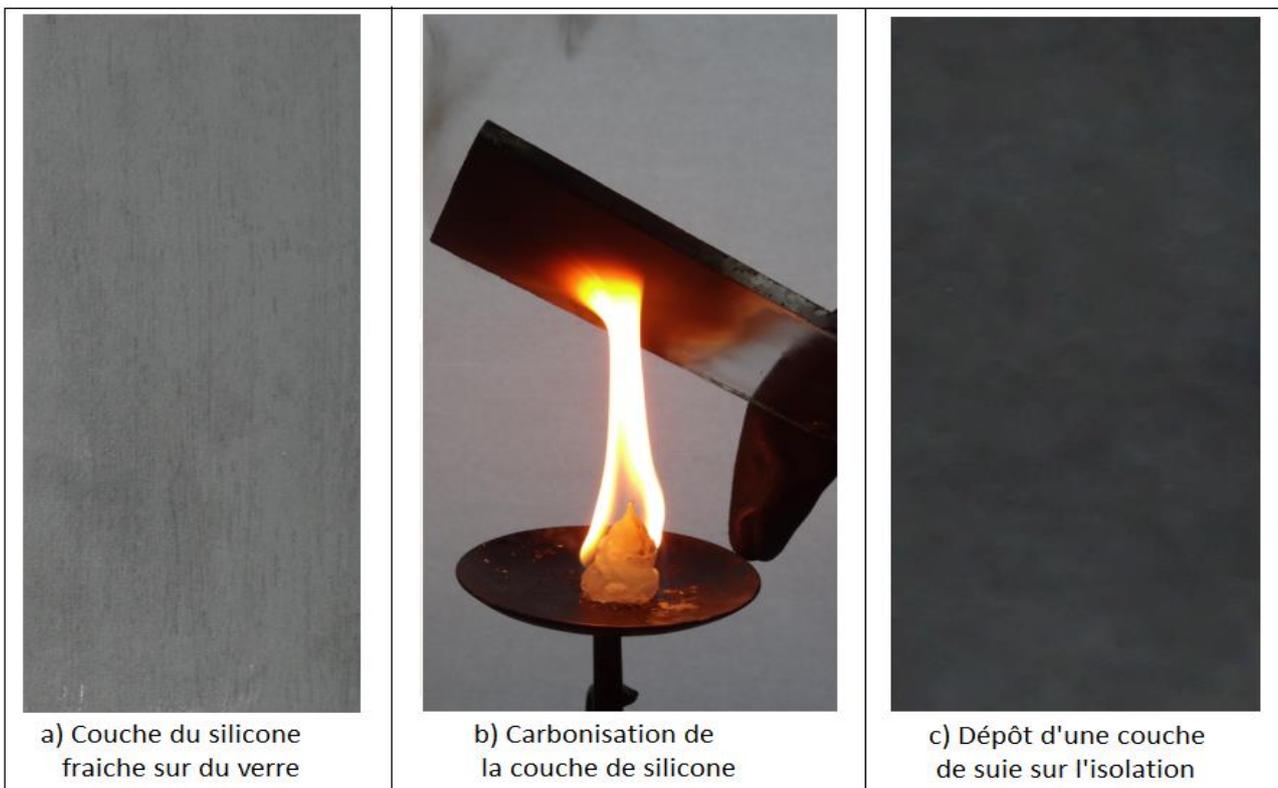
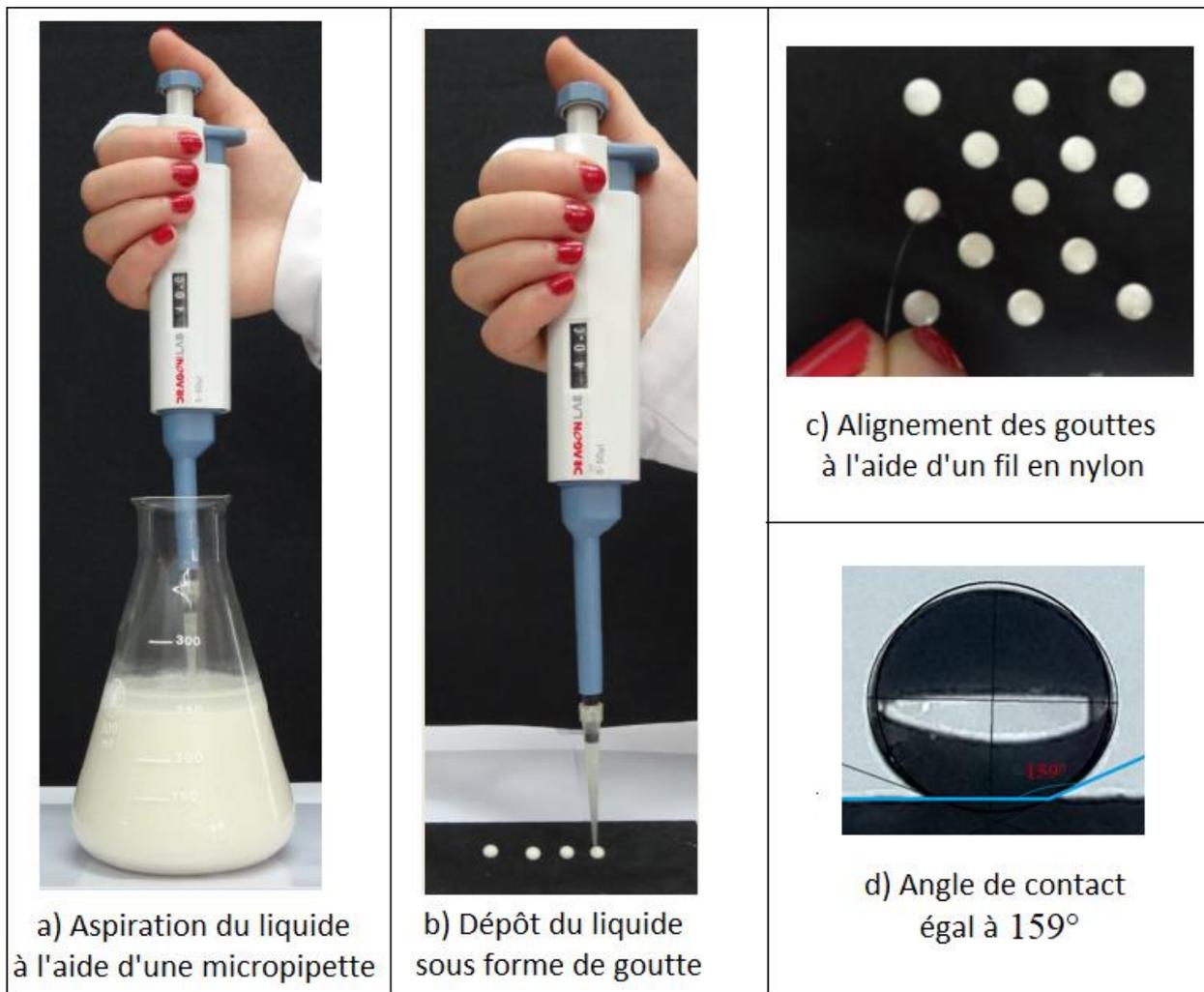


Fig. III. 2: Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe

La figure III. 2 montres les étapes essentielles de la préparation de la plaque superhydrophobe. Nous prenons des plaques en verre neuves sur lesquelles nous déposons une couche fine de silicone III. 2a. Une quantité de silicone est déposée sur un encensoir que nous brûlons (Fig. III. 2b). La plaque recouverte d'une couche de silicone fraîche est approchée de la flamme pour la recouvrir de suie émanant de la carbonisation de la silicone (Fig. III. 2b). La figure III. 2c, illustre une plaque totalement noircie, lavée et rincée à l'eau du robinet. Plusieurs échantillons de ces isolations ont été fabriqués de manière similaire 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 (Fig. III. 4a).

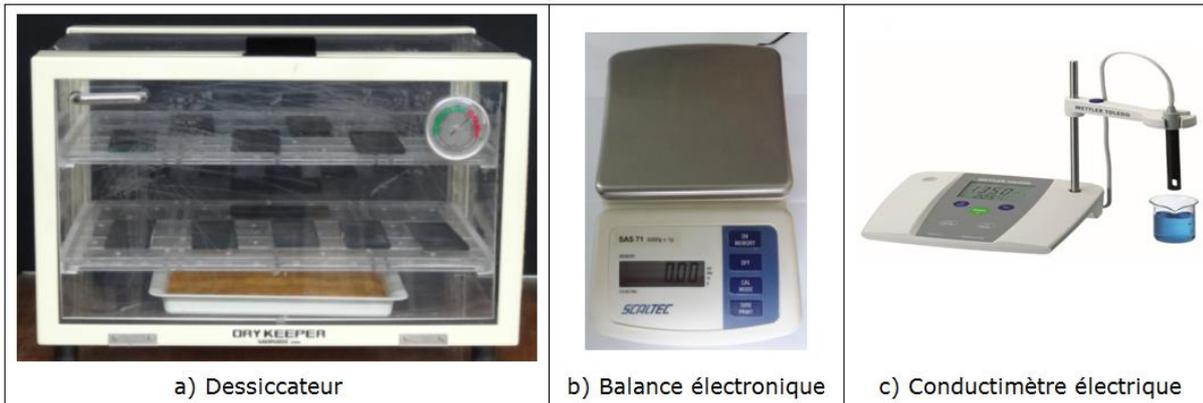


**Fig. III. 3:** Micropipette de mesure de volume de gouttes d'eau graduée de 5 à 50  $\mu\text{l}$

Dans le cadre de cette étude une micropipette graduée de 5 à 50  $\mu\text{l}$  a été utilisée dans le but de varier le volume des gouttes d'eau. Celui-ci est fixé au moyen du compteur de la micropipette. Une quantité d'eau est aspirée de la solution se trouvant dans un bécher (Fig. III. 3a). Celle-ci est déposée sous forme d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe du matériau (Fig. III. 3b).

Les gouttes d'eau paraissent blanches sur les figures III. 3b et III. 3c, car elles proviennent d'une solution, composée d'un mélange d'eau et de kaolin (Fig. III. 3a).

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 40  $\mu$ l de volume, est de l'ordre de 159° (Fig. III. 3d). Son angle de glissement sur la même surface inclinée par rapport à l'horizontale est inférieur à 2°. Ces valeurs sont conformes à celles obtenues par d'autres chercheurs sur une surface de nature différente [56 - 57].



**Fig. III. 4 :** Dessiccateur, balance électronique et conductimètre électrique

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. 4b) et sa conductivité électrique au moyen d'un conductimètre à sonde mobile (Fig. III. 4c).

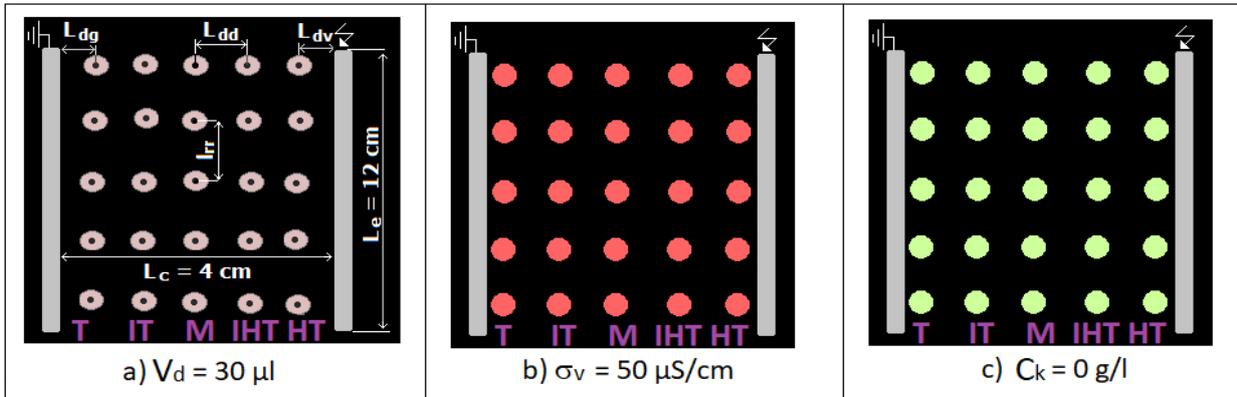
Dans le cadre de cette étude deux types d'arrangements en lignes droite et zigzag de plusieurs rangées de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation ont été exploités. Les rangées disposées en lignes droites le long de la ligne de fuite de l'isolation (Fig. III. 5) sont composées chacune d'elles ensemble de 5 gouttes alignées de telle sorte que les distances entre les centres celles-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 5 gouttes déposées en décalage d'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)

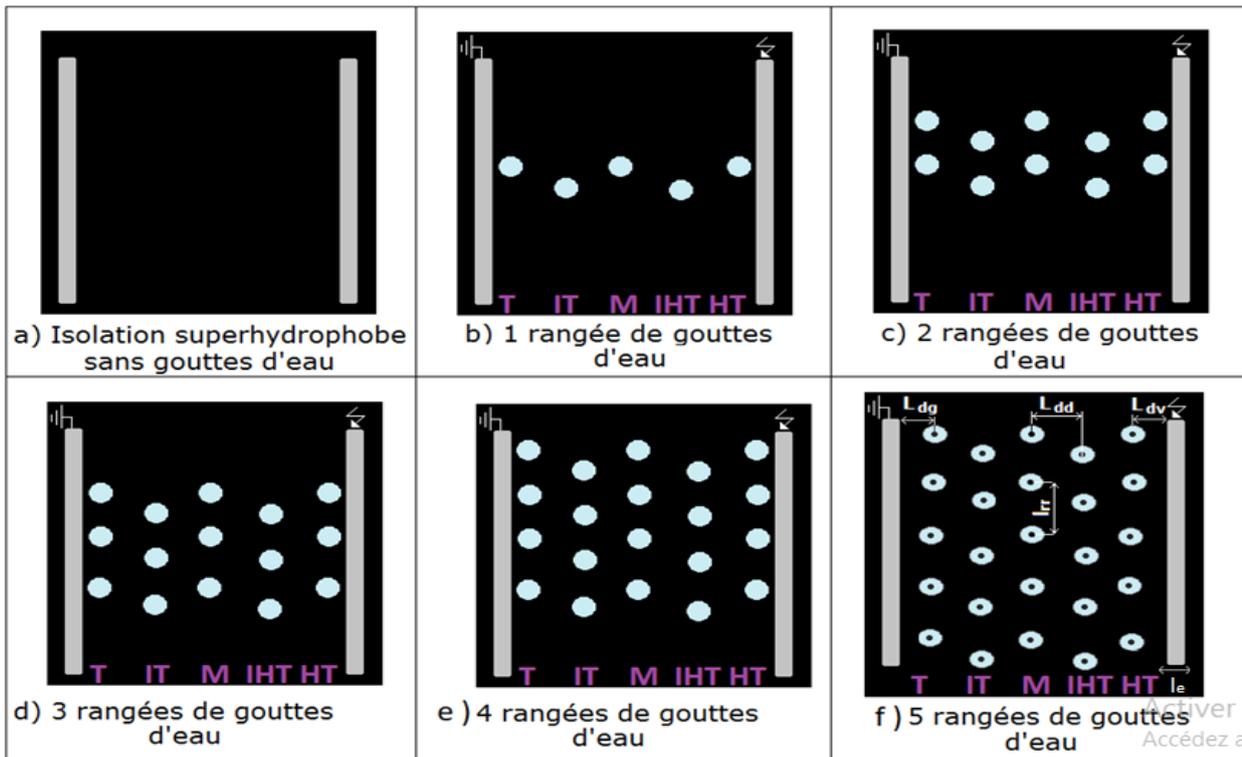
Quel que soit le mode d'arrangement, le nombre de rangées de gouttes d'eau est varié entre 1 et 5 (Figs. III. 5 et III. 6).

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 [54 - 55]. Par contre l'arrangement en lignes droites est chois afin de simuler le phénomène de coalescence de gouttes d'eau lors de leur évacuation de la surface de l'isolation superhydrophobe.



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



**Fig. III. 6:** Emplacement du nombre de rangées en zigzag sur la surface de l'isolation ( $L_{dd}$ : distance entre les centres de deux rangées successives de gouttes d'eau le long de la ligne de fuite  $L_c$ ,  $L_{rr}$ : 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 et  $l_e$ : largeur de l'électrode)

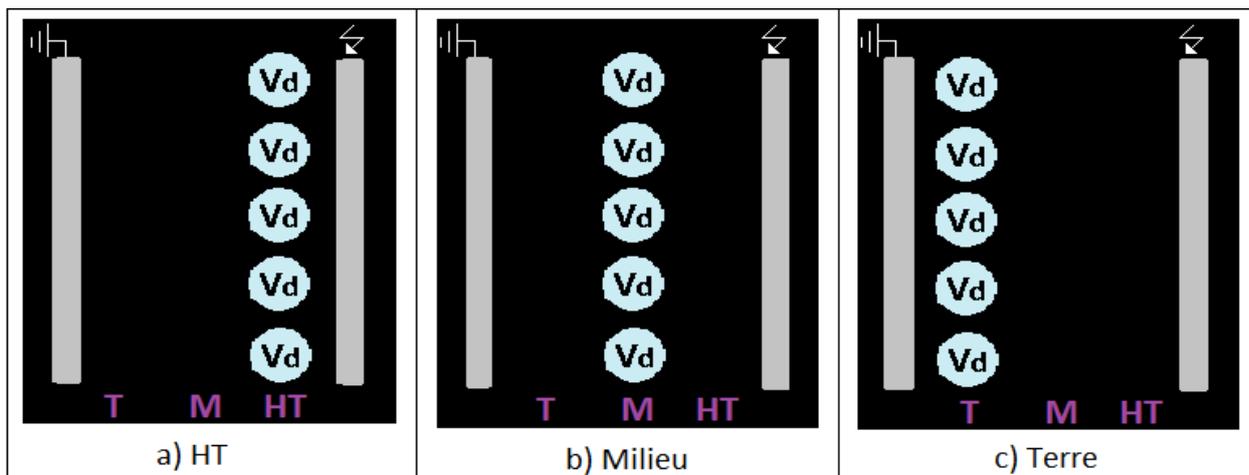
Concernant l'emplacement de la première rangée de gouttes d'eau, il existe plusieurs possibilités. Celle-ci peut être tout d'abord placée parallèlement ou perpendiculairement aux

électrodes sous tension et terre. Dans le premier cas, la rangée peut être déposée au voisinage proche de l'électrode HT ou terre ou bien dans la zone intermédiaire.

Dans le deuxième cas, la première rangée peut être apportée aux extrémités droite ou gauche de l'isolation ou bien dans la zone intermédiaire parallèle à la ligne de fuite de celle-ci. 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

Un arrangement en plusieurs lignes droites des gouttes d'eau parallèles sur la surface de l'isolation superhydrophobe (Fig. III. 5) a été utilisé dans le cadre de cette présente étude. Ce type d'arrangement consiste en un dépôt de cinq gouttes sur une ligne droite.

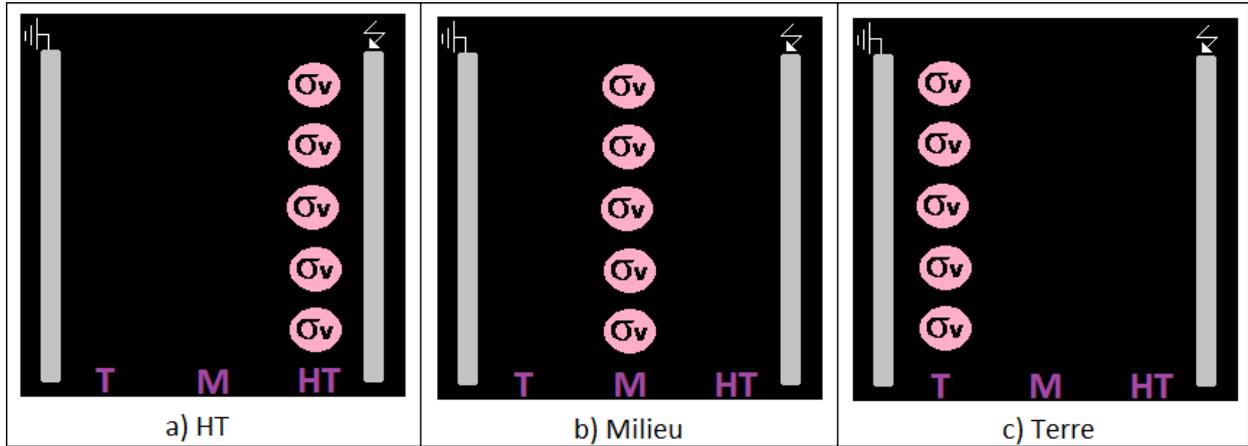
L'étude de l'effet du volume des gouttes d'eau sur la performance électrique de l'isolation superhydrophobe est effectuée en prenant une seule rangée de gouttes d'eau et en choisissant des valeurs de leur volume égales à (10, 20, 30, 40, 60 et 80)  $\mu\text{l}$ . La prise en considération de ces valeurs est justifiée par le fait que la taille des gouttes d'eau 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.



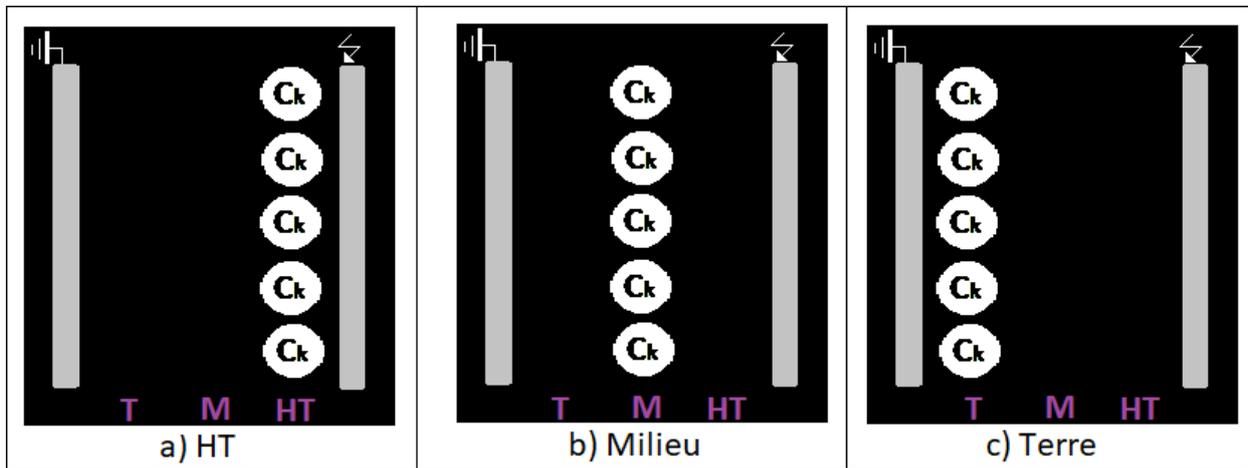
**Fig. III. 7:** Position d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite sur la surface de l'isolation à volume variable

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 kaolin dont la masse est variée entre 0 et 120 g (Fig. III. 9) pour l'épaississement de la couche polluante et du chlorure de sodium de telle sorte à varier la conductivité électrique des gouttes d'eau. L'intervalle de conductivité électrique de la solution polluante est variée entre 0,5 mS/cm et 20 mS/cm (Fig. III. 8) de telle sorte à simuler les niveaux de pollution des sites compris entre un niveau de contamination très léger et un celui très fortement contaminé. La conductivité de

chaque solution polluante préparée est mesurée à l'aide d'un conductimètre électrique à sonde mobile.



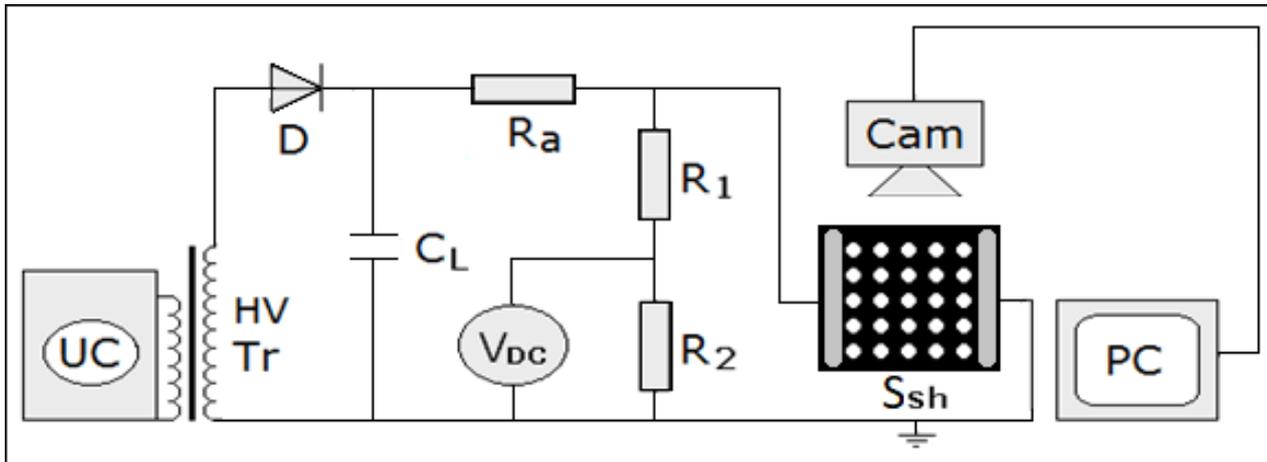
**Fig. III. 8:** Position d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite sur la surface de l'isolation à conductivité variable



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

Le schéma de la figure III. 10 est composé d'un circuit de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau et d'un circuit de visualisation de l'évacuation des gouttes d'eau de la surface d'une telle isolation. La station d'essai est constituée d'un transformateur haute tension (0,08A/135kV), un diviseur de tension résistif ( $R_1/R_2$ ), un voltmètre de crête ( $V_{DC}$ ) à affichage numérique et une surface superhydrophobe isolante ( $S_{Sh}$ ). Le circuit de visualisation comprend une caméra rapide (Cam) pour l'enregistrement des différentes séquences de développement de la décharge électrique évoluant sur la surface hydrophobe recouverte de gouttes d'eau et un PC pour le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Free Vidéo. A l'aide de cette station une série de 20 essais a été réalisée pour chaque paramètre étudié. La valeur de la tension d'expulsion de chaque goutte quittant la surface est déterminée à partir du calcul de la moyenne arithmétique de l'ensemble de tensions trouvées dans tous les essais.

Moyennant la très bonne répétitivité des techniques de mesure exploitées dans cette étude, l'erreur maximale relative obtenue est égale à 5 % de cette valeur moyenne [52- 53].



**Fig.III. 10:** Schéma de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes

### III. 4 Résultats et discussions

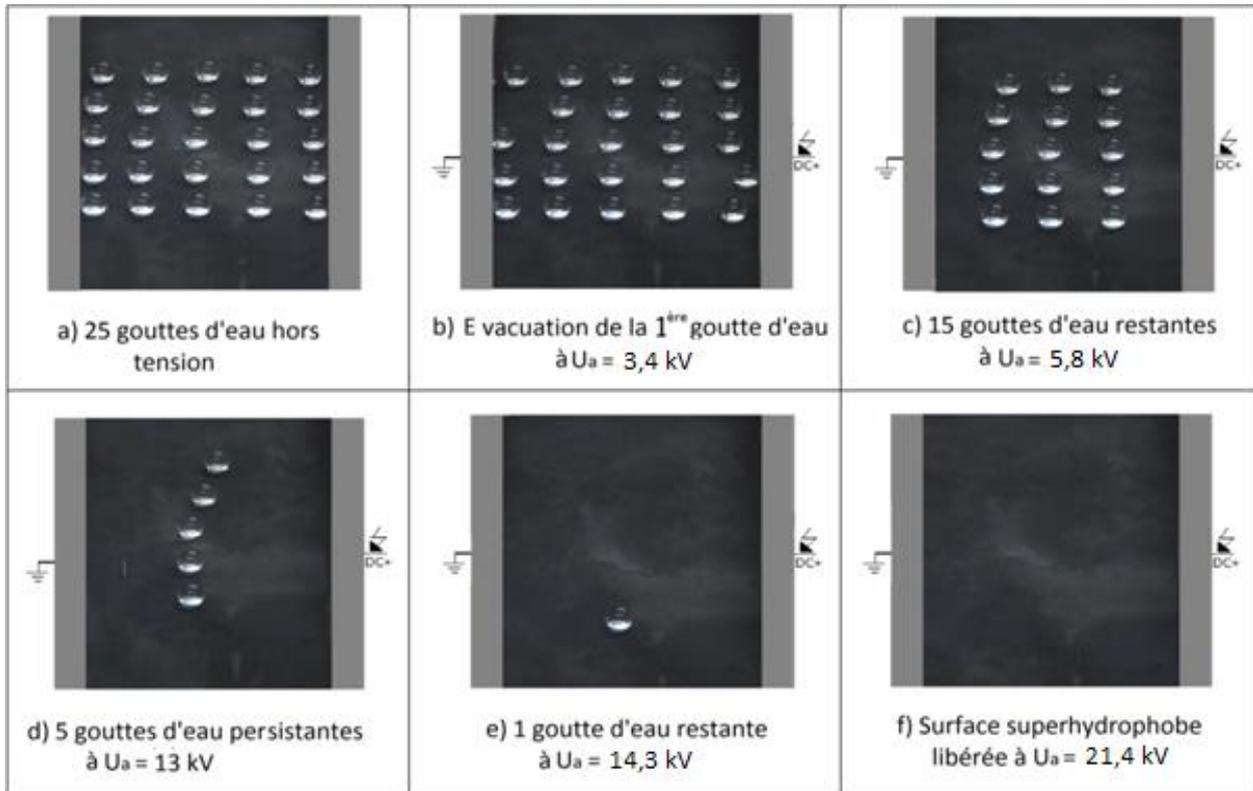
#### III. 4. 1 Mode d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation

Surface superhydrophobe à l'état sec	Nombre d'essais	Tension de contournement de l'isolation à sec	Condition atmosphériques
Plaque n°1	20	40,45 kV	$P_a = 1008 \text{ hPa}$ $H_r = 55 \%$ $T = 22^\circ\text{C}$

**Tab. III. 1 :** Tension de contournement de l'isolation a son état sec

Trois modes différents d'expulsion des gouttes d'eau sous arrangements en lignes droites et en zigzags à l'extérieur de la surface de l'isolation superhydrophobe ont été recensés: expulsion individuelle, par groupes, ou bien grupo-individuelle des gouttes d'eau. Le mode d'évacuation 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'expulsion grupo-individuelle est la combinaison des deux types précédents et consiste en une évacuation 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 mouvement 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'expulsion des gouttes d'eau une apparition plus fréquente du mode d'éjection grupo-individuelle et bidirectionnelle de celles-ci.

La figure III. 11 résume certaines phases importantes du mode d'expulsion grupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau, arrangées en lignes droites sans couvert.

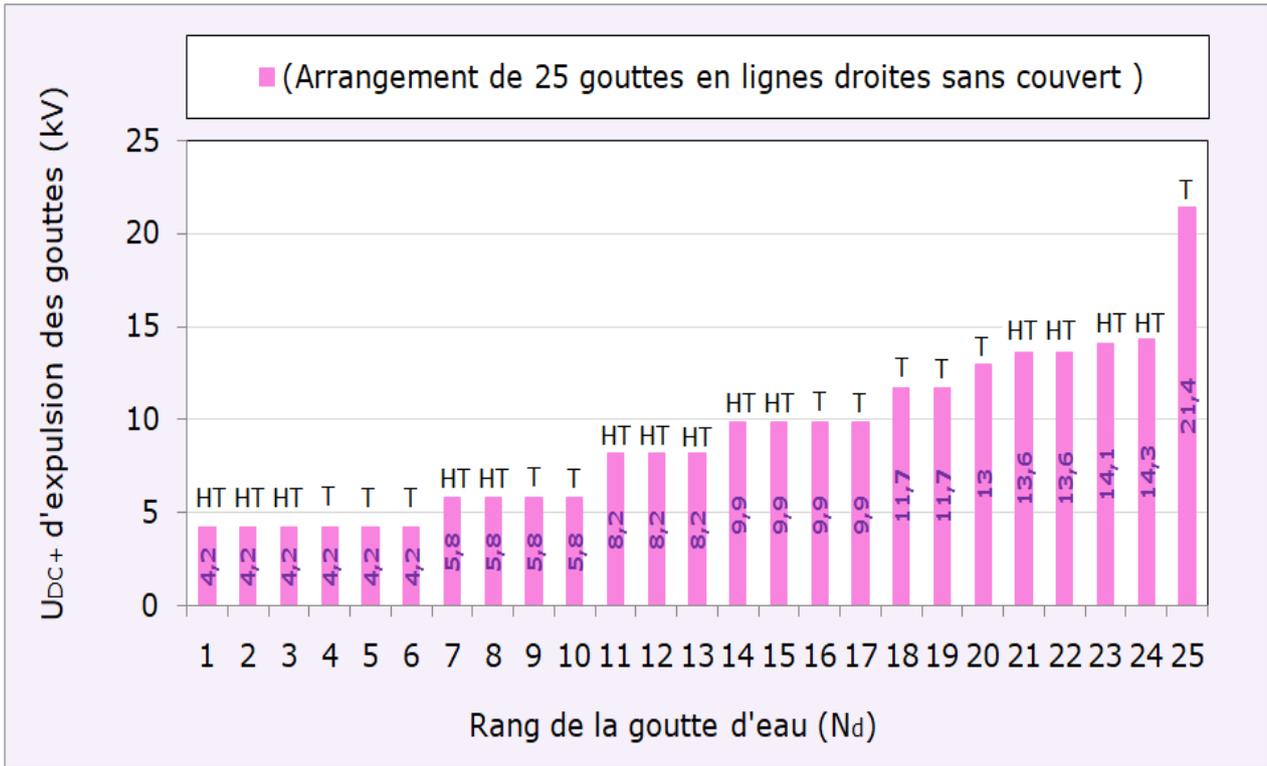


**Fig.III. 11** : Phases essentielles d'expulsion grupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites sans couvert ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

La figure III. 11a 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. 11b correspond à une phase où 1 goutte d'eau de la rangée avoisinant l'électrode terre a été expulsée en dehors de l'isolation sous l'application d'une tension de l'ordre de 3,4 kV. La figure III. 11c montre la disparition de 10 gouttes d'eau des 2 rangées avoisinant les électrodes sous tension et terre sous tension  $U_a = 5,8 \text{ kV}$ . La figure III. 11d illustre la suppression des 10 gouttes des rangées intermédiaires sous tension et terre sous tension  $U_a = 13 \text{ kV}$ . La figure III. 11e montre la persistance d'une goutte d'eau de la rangée du milieu sous tension  $U_a = 14,3 \text{ kV}$ . La figure III. 11f donne l'image d'une surface débarrassée de toutes ses gouttes évacuées équitablement des côtés des électrodes sous tension et terre sous tension  $U_a = 21,4 \text{ kV}$ .

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 leur transit (HT ou terre), est illustrée par la figure III. 12. Cette dernière donne l'histogramme caractérisant la tension d'éjection en fonction du numéro de la goutte d'eau et de l'endroit de son évacuation de la surface de l'isolation.

Cet histogramme reflète un mode d'évacuation groupo-individuelle bidirectionnelle de gouttes d'eau. Celui-ci est subdivisé en 10 séquences.



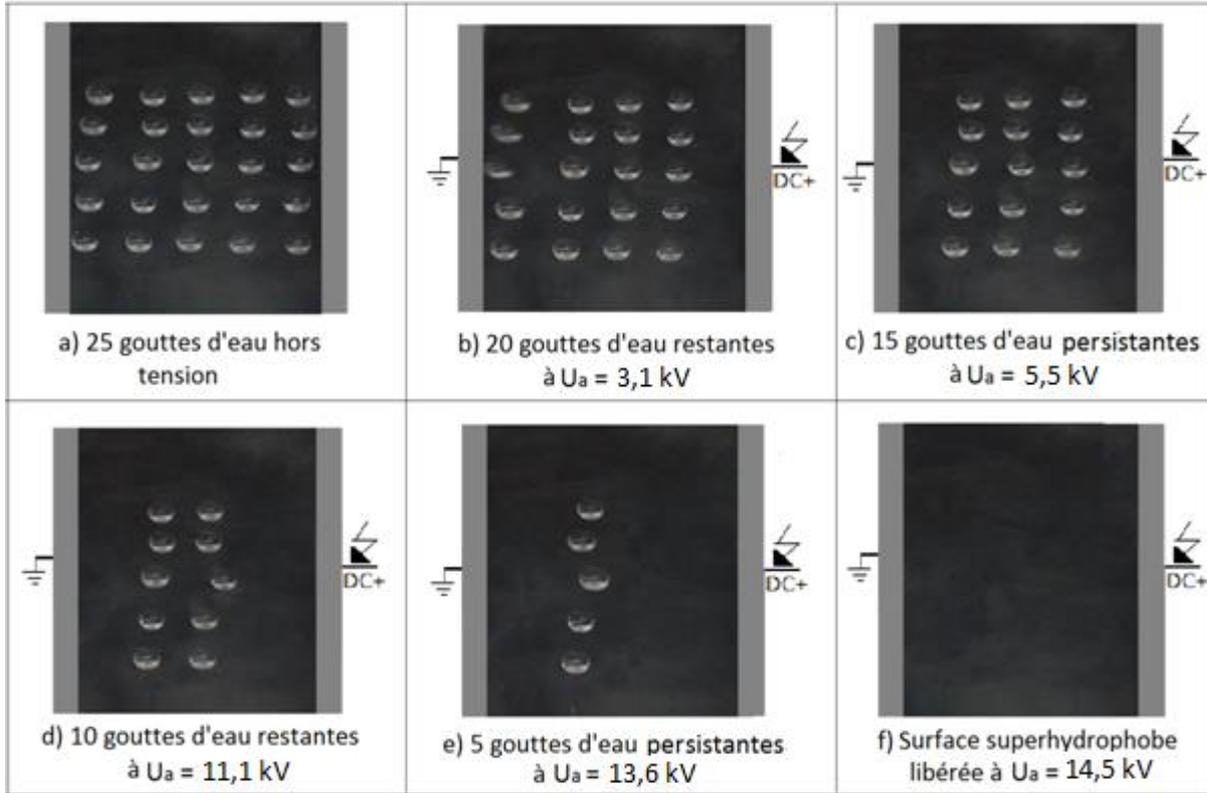
**Fig. III. 12:**  $U_{DC+} = f(N_d)$  pour un arrangement en lignes droites sans couvert de 5 rangées x 5 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

La première est caractérisée par une expulsion d'un groupe de 6 gouttes d'eau de la surface de l'isolation sous l'application d'une tension égale à 4,2 kV. Lors de la deuxième séquence, un ensemble de 4 gouttes d'eau est évacué de la surface de l'isolation de cette dernière sous une tension de l'ordre de 5,8 kV. Ce groupe est suivi par l'évacuation d'un ensemble de 3 gouttes d'eau sous une tension égale à 8,2 kV. Ensuite, 4 gouttes d'eau ont été évacuées sous une tension  $U_a = 9,9$  kV. Lors de la cinquième séquence, 2 gouttes d'eau ont été éjectées de l'isolation sous une tension  $U_a = 11,7$  kV. Celle-ci est suivie d'une expulsion d'une goutte sous tension  $U_a = 13$  kV. Par la suite, 2 gouttes d'eau ont été évincées de l'isolation sous une tension  $U_a = 13,6$  kV.

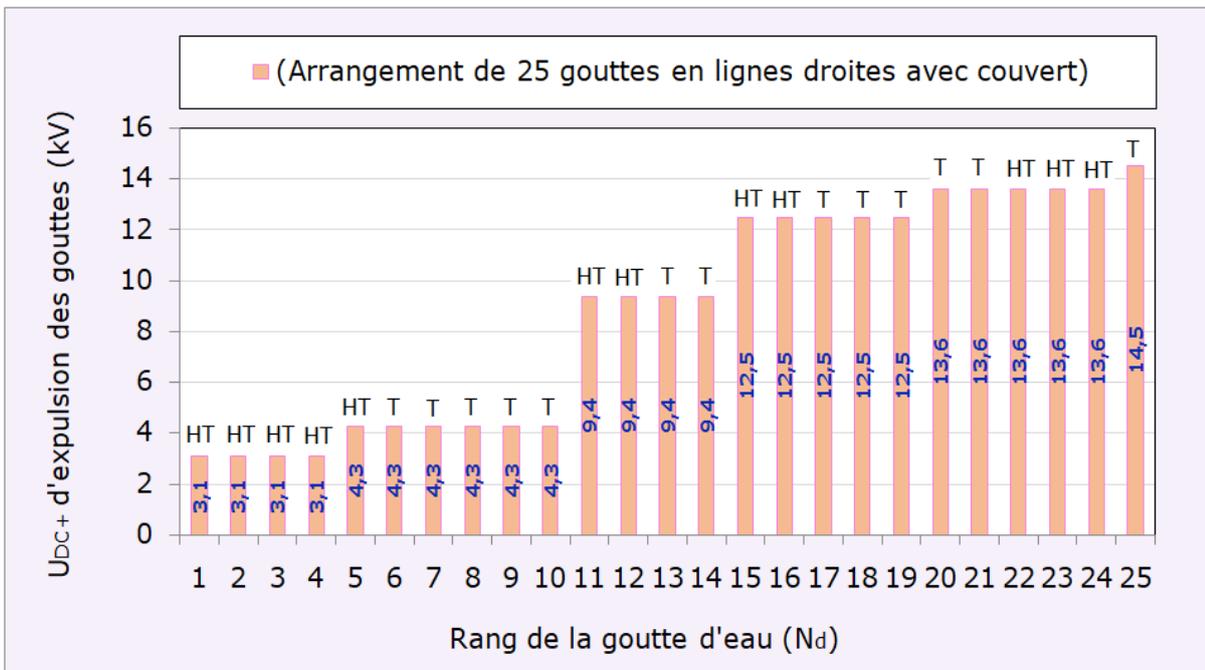
Enfin, les 3 dernières gouttes quittent la surface de l'isolation sous des tensions égales respectivement à 14,1 ; 14,3 ; 21,4 kV.

Sachant que la tension de contournement de l'isolation sans gouttes est égale à 40,45 kV (Tab. III. 1), la figure. III. 13 caractérise une éjection similaire à celle de la l'arrangement en lignes droites sans couvert, ce qui diffère est la valeur de la tension appliquées à l'isolation, qui est plus faible dans ce cas de figure. 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.

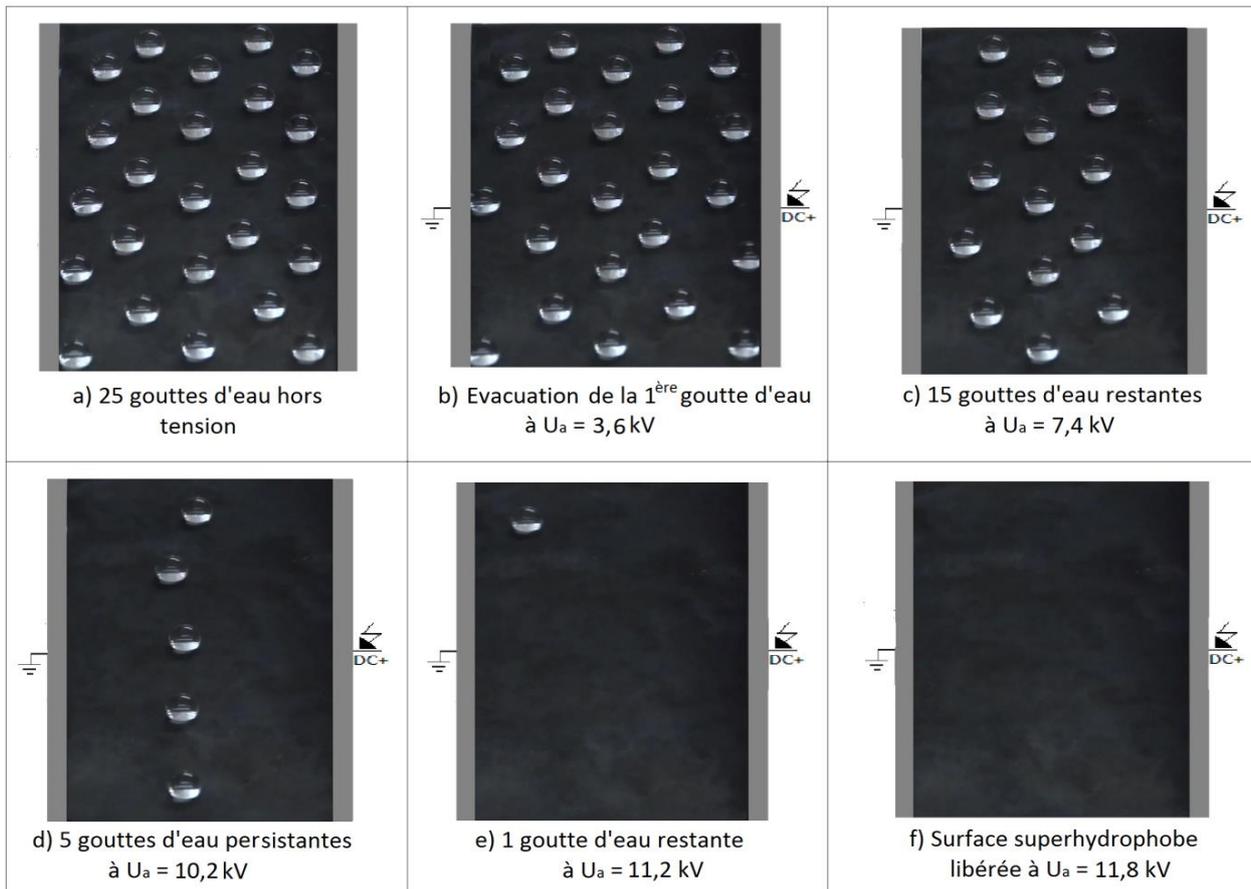


**Fig.III. 13** : Phase essentielles d'expulsion grupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation super hydrophobe sous arrangement en lignes droites avec couvert ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



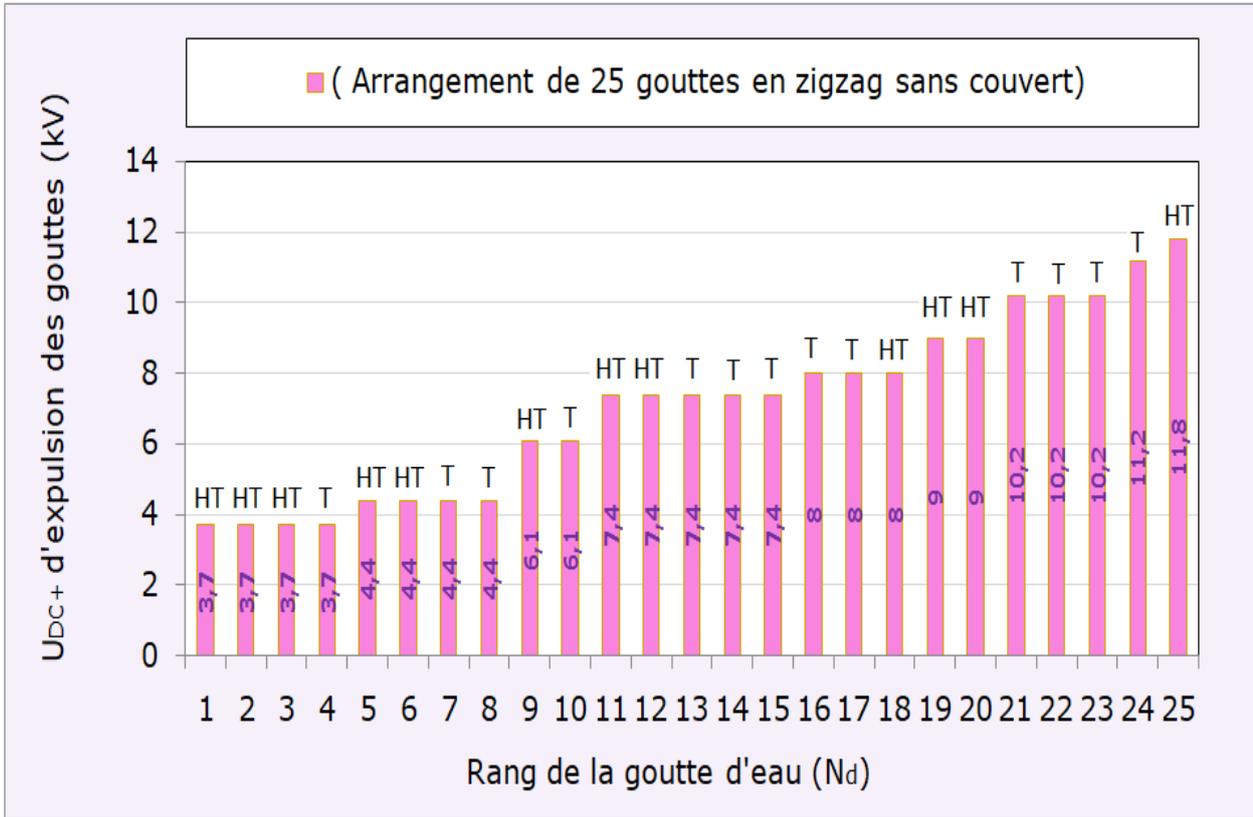
**Fig. III. 14**:  $U_{DC+} = f(N_d)$  pour un arrangement en lignes droites avec couvert de 5 rangées x 5 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

La figure III. 14 illustre l’allure de la tension d’évacuation des gouttes d’eau en fonction de leur rang et le lieu de leur destination. Son histogramme se résume en 6 séquences d’expulsion des gouttes d’eau en dehors de l’isolation. Il est à souligner que le nombre de gouttes d’eau sortant par l’électrode HT, est pratiquement le même que celui transitant par l’électrode terre avec ou sans couverture.



**Fig. III. 15:** Etapes essentielles d’évacuation grupo-individuelle et bidirectionnelle de 25 gouttes d’eau en dehors de l’isolation superhydrophobe sous arrangement en zigzag sans couvert ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

Les figures III.15 et III.16 donnent respectivement les phases essentielles d’évacuation des gouttes d’eau à l’extérieur du matériau et l’histogramme de tension d’éjection des gouttes d’eau en dehors de sa surface. Il existe une similitude entre les images illustrées d’une part par les figures III. 11 et III. 15 et d’autre part par les figures III. 13 et III. 16. La seule différence réside au niveau de la tension d’éviction des gouttes d’eau en dehors de l’isolation. Celui-ci est plus faible dans le cas d’un arrangement des gouttes d’eau en zigzag que celui d’un arrangement en lignes droites. La tension d’évacuation de la dernière goutte sous arrangement zigzag est de 29,17 % de celle de l’isolation à l’état sec (Fig. III. 16). Alors qu’elle est de 53 % sous arrangement en lignes droites (Figs. III. 11 et III. 12).



**Fig. III. 16:**  $U_{DC+} = f(N_d)$  pour un arrangement en zigzag sans couvert de 5 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

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

La figure III. 17 donne l'évolution de la tension d'évacuation de la première goutte, goutte médiane et la dernière goutte en fonction du nombre de rangées en parallèle le long de la ligne de fuite de l'isolation sous arrangement zigzag. Il en résulte que la tension d'éjection en dehors de l'isolation de la première goutte est indépendante du nombre de rangées apportées sur la surface de l'isolation. Sa valeur est de l'ordre de 4 kV, ce qui correspond à 10 % de la tension de contournement de l'isolation à l'état sec. La tension d'expulsion de la goutte médiane est pratiquement constante quel que soit le paramètre suscité. La tension de son éviction est égale à 8 kV ce qui est équivalent à 20 % de la tension de contournement de l'isolation sans gouttes.

Par contre la dernière la tension d'éjection de la dernière goutte à l'extérieur de l'isolation est légèrement décroissante. La tension maximale de son expulsion est de l'ordre de 14 kV ce qui correspond à 34 % de la tension de contournement de l'isolation à l'état sec.

Lors de la variation du nombre de rangée aucune création de décharge électrique partielle et/ou contournement de l'isolation n'a été révélée. Ainsi la superhydrophobie de la surface des isolations testées se trouve conservée, vu la stabilité de l'angle de contact à sa valeur initiale après chaque série de mesures.

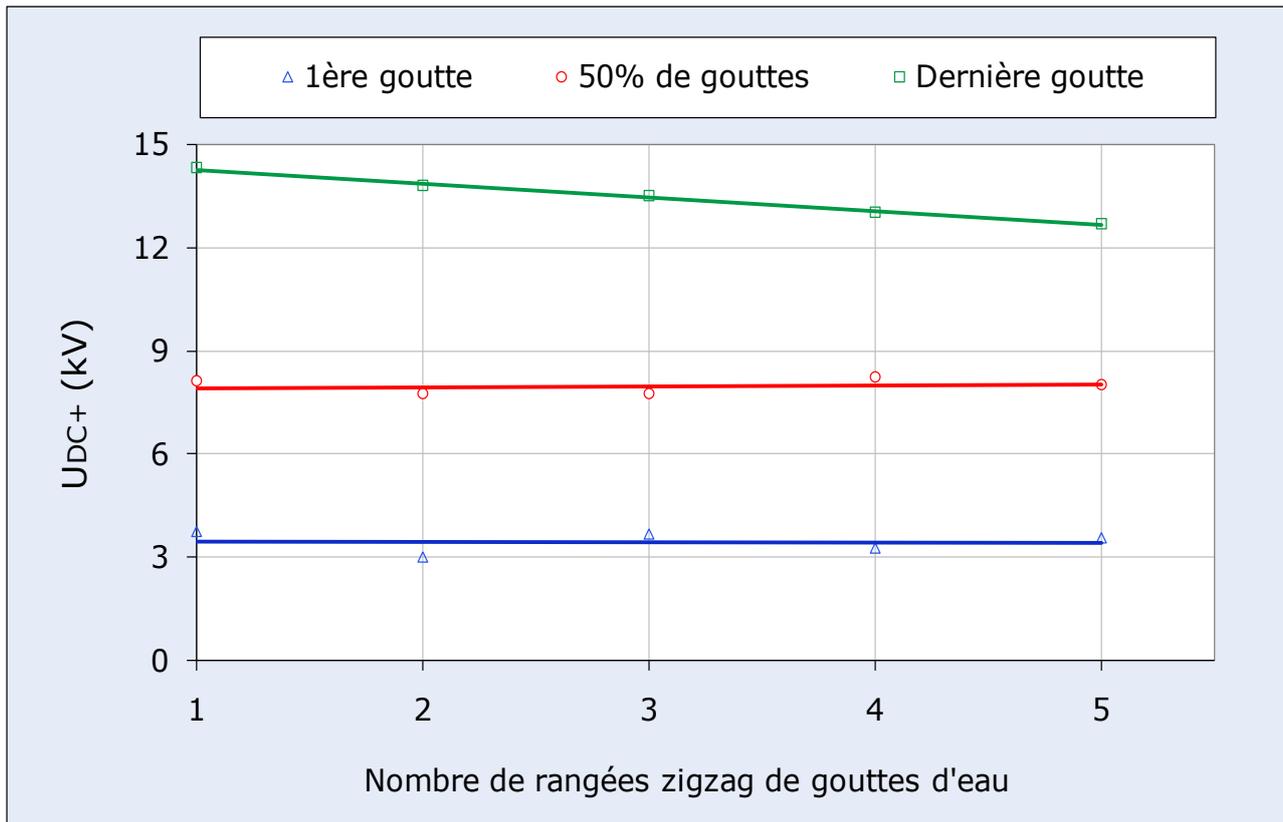


Fig. III. 17: Tension d'expulsion des gouttes d'eau en fonction du nombre de rangées déposées

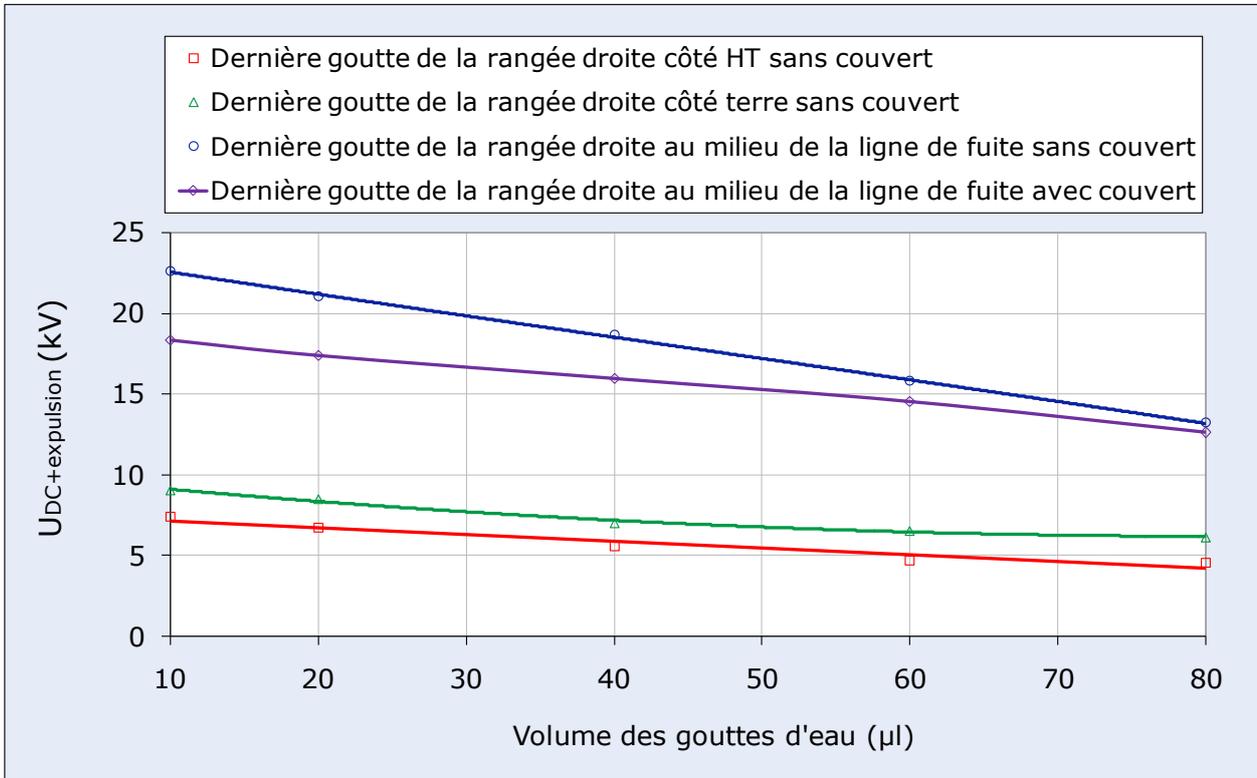
### III. 4. 3 Volume des gouttes d'eau d'une rangée et son emplacement sur la surface de l'isolation

Les figures III. 18 et III. 19 montrent un déclin de la tension d'expulsion de la dernière goutte d'eau en fonction de son volume jusqu'à une valeur limite égale à  $40 \mu\text{l}$ . Au delà de cette limite, celle-ci demeure constante quel que soit le volume varié. Il résulte de ces figures que la tension d'évacuation de la dernière goutte est plus grande lorsque celle-ci se trouve au milieu de l'isolation que de côté terre ou de côté HT. Quel que soit le mode d'arrangement la tension d'éjection de la dernière goutte d'eau en dehors de l'isolation avec couverture est plus faible que celle sans couvert pour les mêmes raisons citées précédemment (Fig. III. 20).

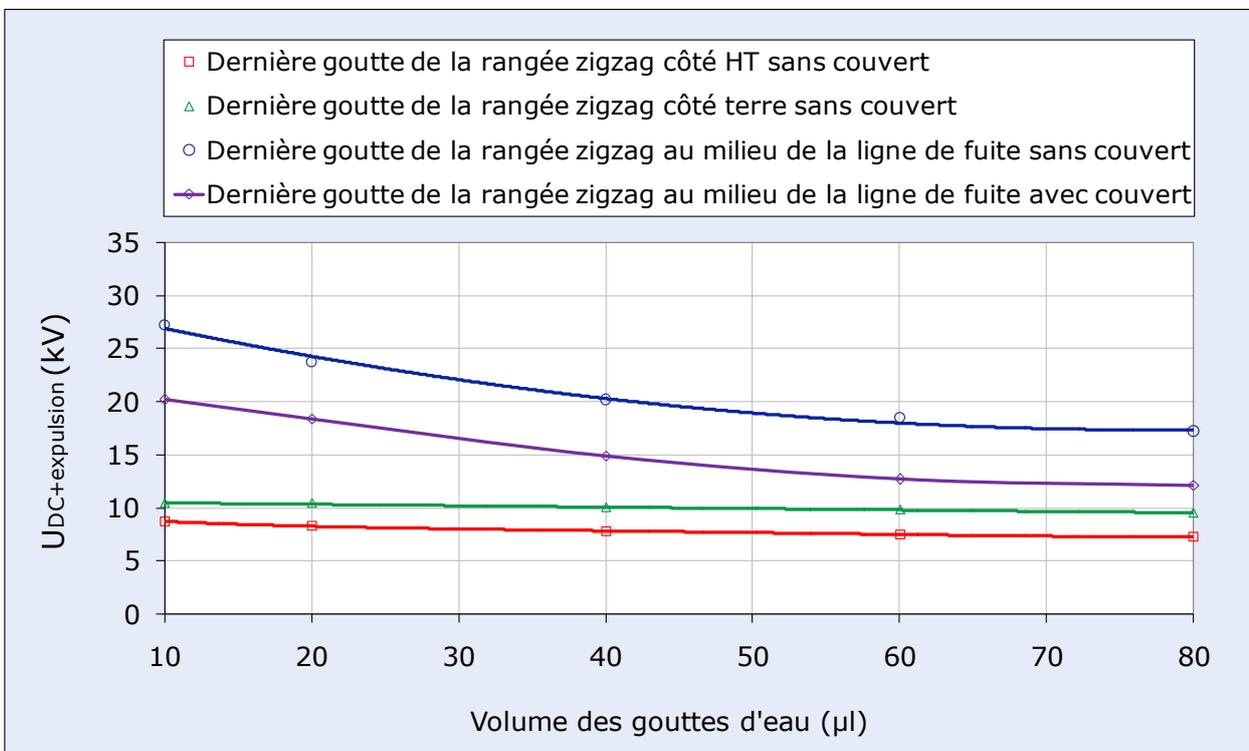
Il découle de ces figures qu'un petit volume nécessite une tension d'expulsion plus grande que lorsque celui-ci est plus élevé (Fig. III. 20). Ceci peut être expliqué par le fait que les gouttes de petit volume s'assemblent entre les aspérités de la surface superhydrophobe par contre, les gouttes de grand volume restent sur les sommets des aspérités ce qui facilite leur évacuation.

Il ressort des figures III. 18 et III. 19 que la tension d'éviction des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag est un peu plus élevée que pour celle en ligne droite. Ceci trouve sa justification dans le fait que contrairement si une rangée droite, celle en zigzag est subdivisée en deux sous-rangées contenant à respectivement trois et 2 gouttes d'eau. La sous rangée à deux gouttes est décalée par

rapport à celle composée de trois gouttes. Son éloignement des électrodes HT et terre entraine l'élévation de leur tension d'expulsion de l'isolation (Fig. III. 21).



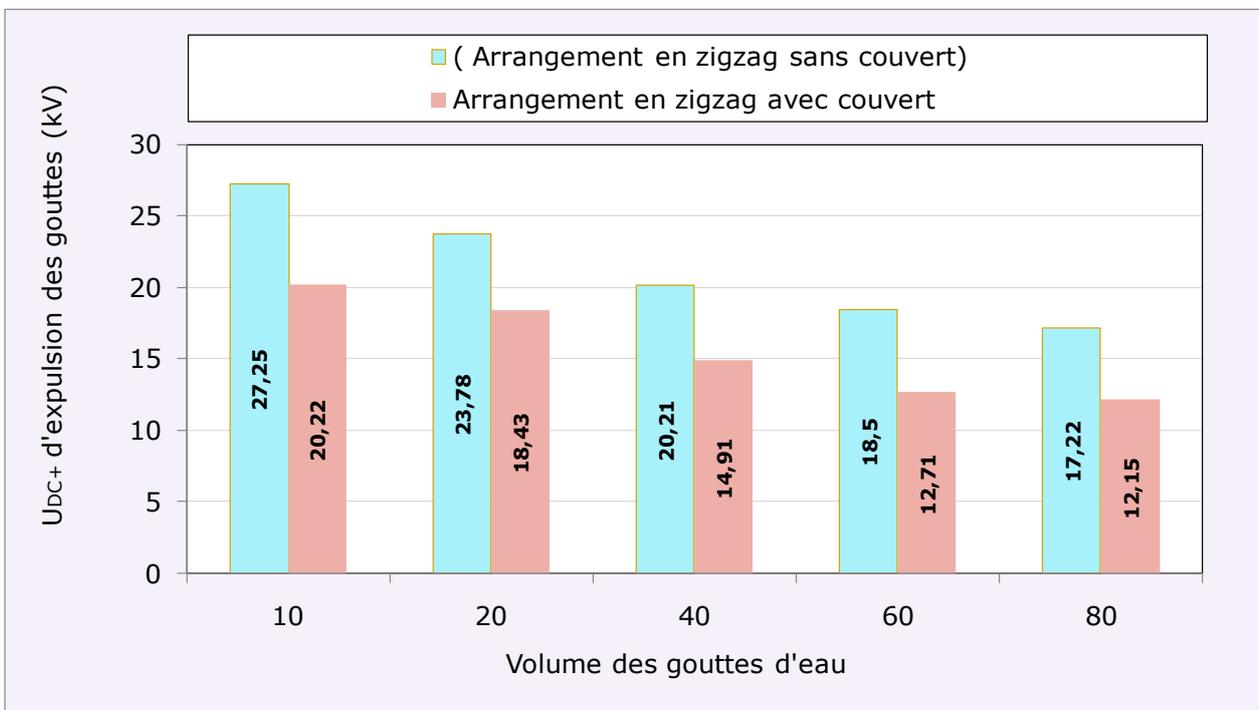
**Fig. III. 18** Tension d'éviction de la dernière goutte d'eau d'une rangée droite en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation



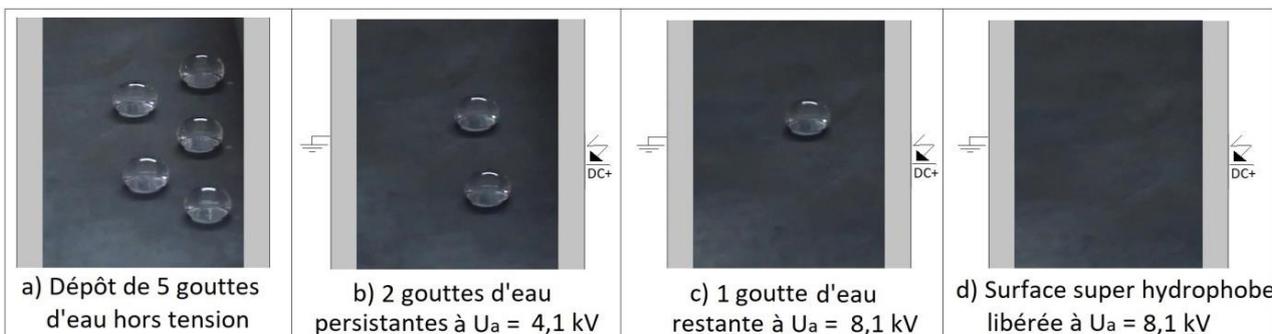
**Fig. III. 19** Tension d'éviction de la dernière goutte d'eau d'une rangée en zigzag en fonction de son volume et degré de couverture de l'isolation

Les figures III. 21, III. 22, III. 23, III. 24, III. 25 et III. 26 montrent les différentes phases d'évacuation des gouttes d'eau à volume égal à 10 et 80  $\mu\text{l}$  d'une rangée à position interélectrode variable. Il est à remarquer, l'éjection d'abord des gouttes extrêmes de la rangée (III. 21b, III. 22b, III. 23b, III. 24b, III. 25b et III. 26b), ensuite vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de celle-ci indépendamment de degré de couverture (III. 21c, III. 22c, III. 23c, III. 24c, III. 25c et III. 26c).

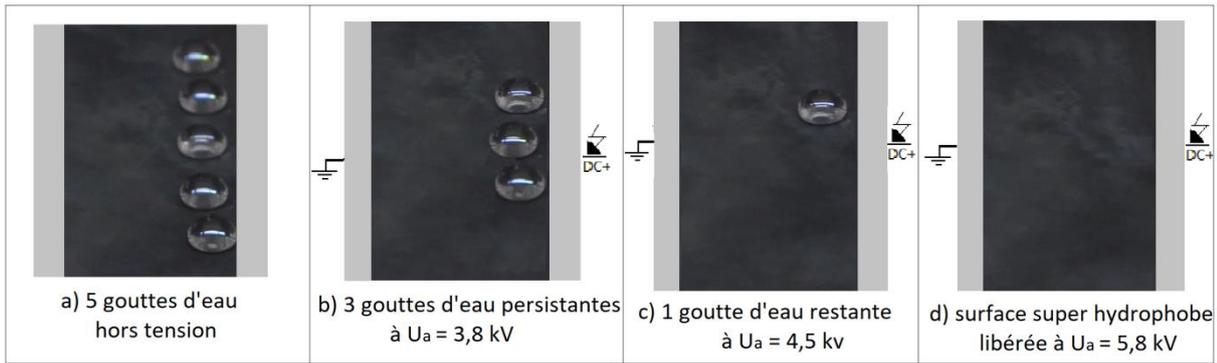
Ce phénomène d'expulsion des gouttes d'eau en variant leur volume n'est accompagné d'aucune création de décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation et aucun signe d'altération apparente de la surface de l'isolation n'a été décelé. La non diminution de l'angle de contact de l'isolation, mesuré en fin de chaque série d'essais, dénote la rétention de la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude.



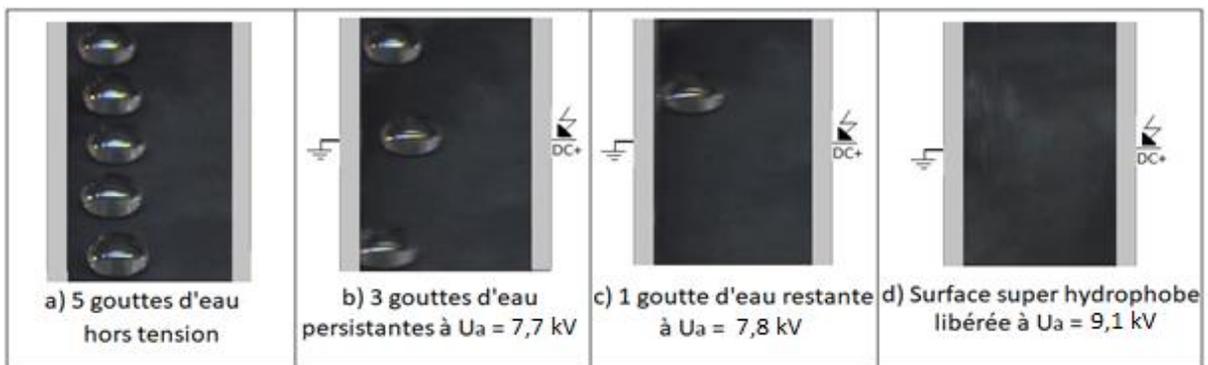
**Fig. III. 20:** Tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction de leur volume sur la surface de l'isolation



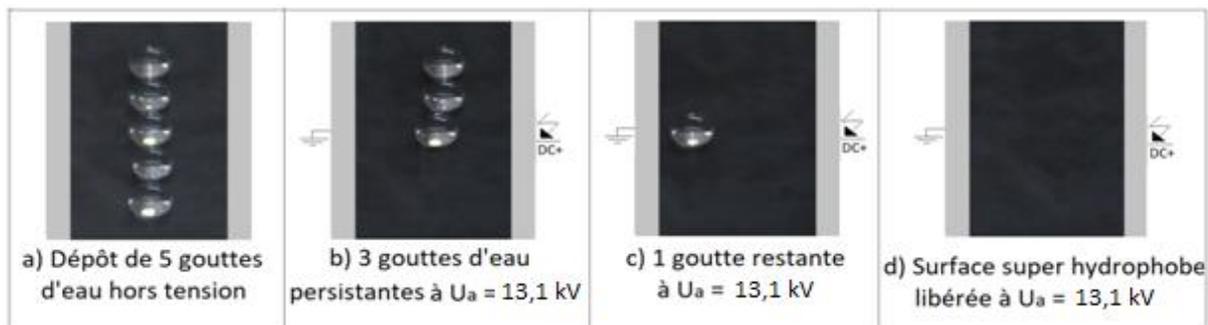
**Fig. III. 21:** Phases essentielles d'éjection d'une rangée de 5 gouttes d'eau en zigzag côté HT en fonction de la tension de leur éviction ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )



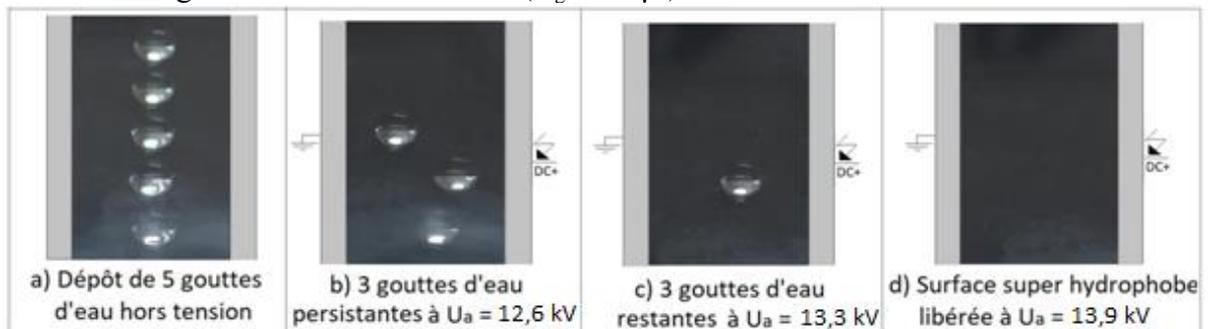
**Fig. III. 22:** Phases essentielles d'éjection de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite côté HT ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )



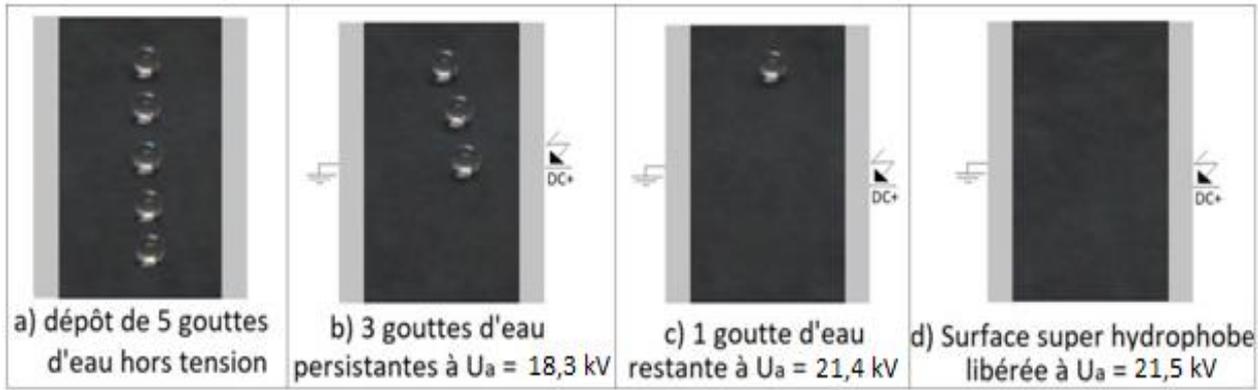
**Fig. III. 23:** Principales étapes d'éjection de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite côté terre ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )



**Fig. III. 24:** Principales étapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite sans couvert au milieu de la ligne de fuite de l'isolation ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )



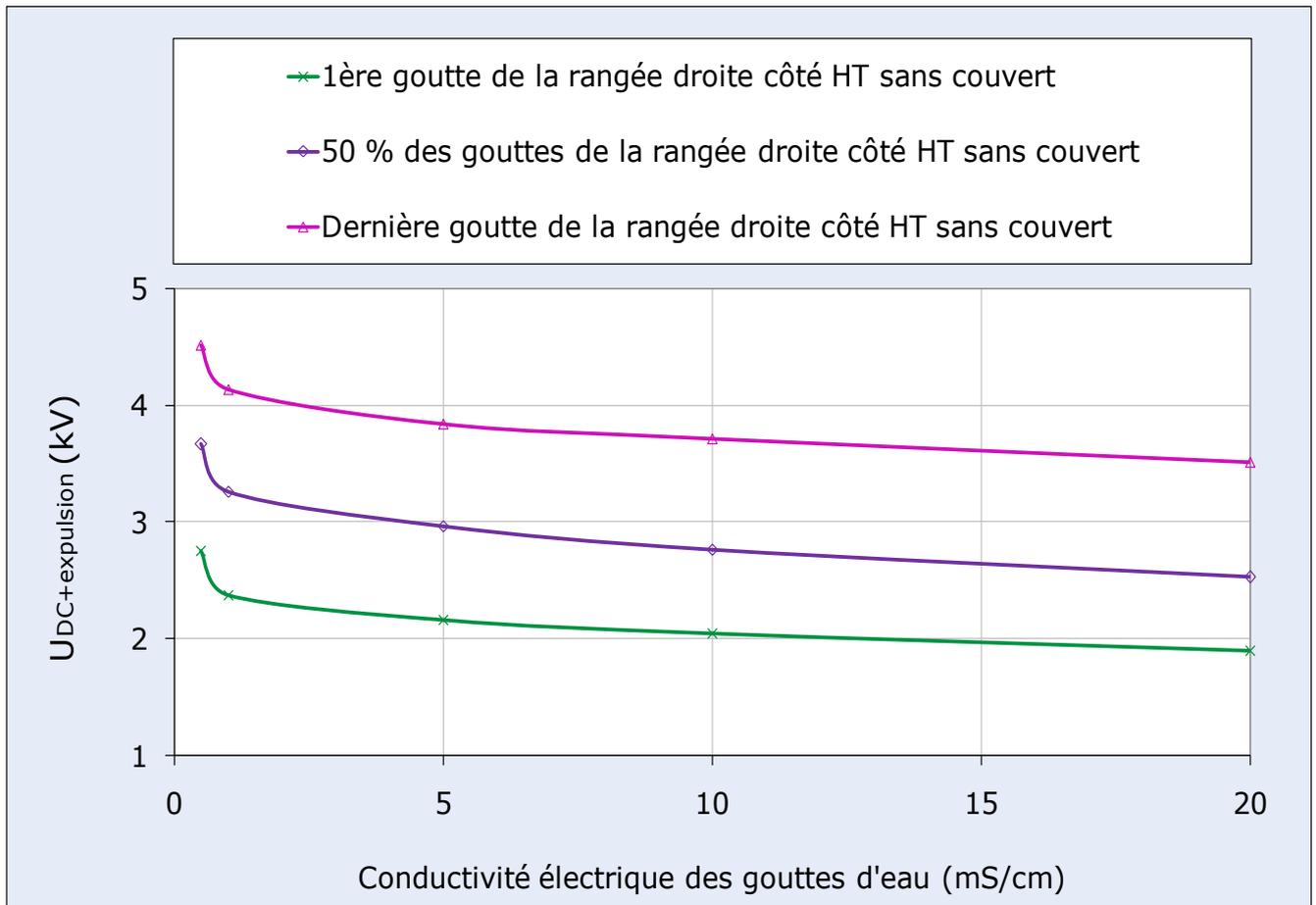
**Fig. III. 25:** Principales étapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite avec couvert au milieu de la ligne de fuite de l'isolation ( $V_g = 80 \mu\text{l}$ )



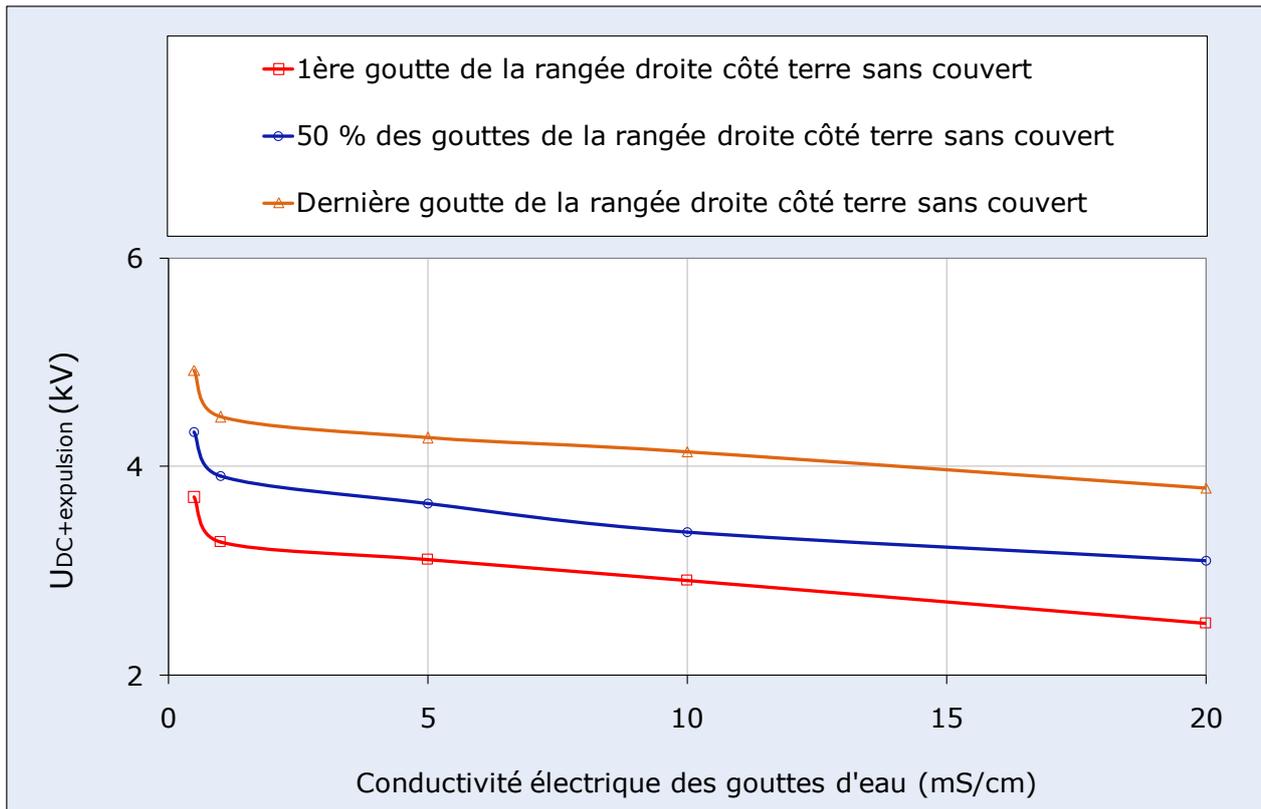
**Fig. III. 26:** Principales étapes de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite sans couvert au milieu de la ligne de fuite de l'isolation ( $V_g = 10 \mu\text{l}$ )

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

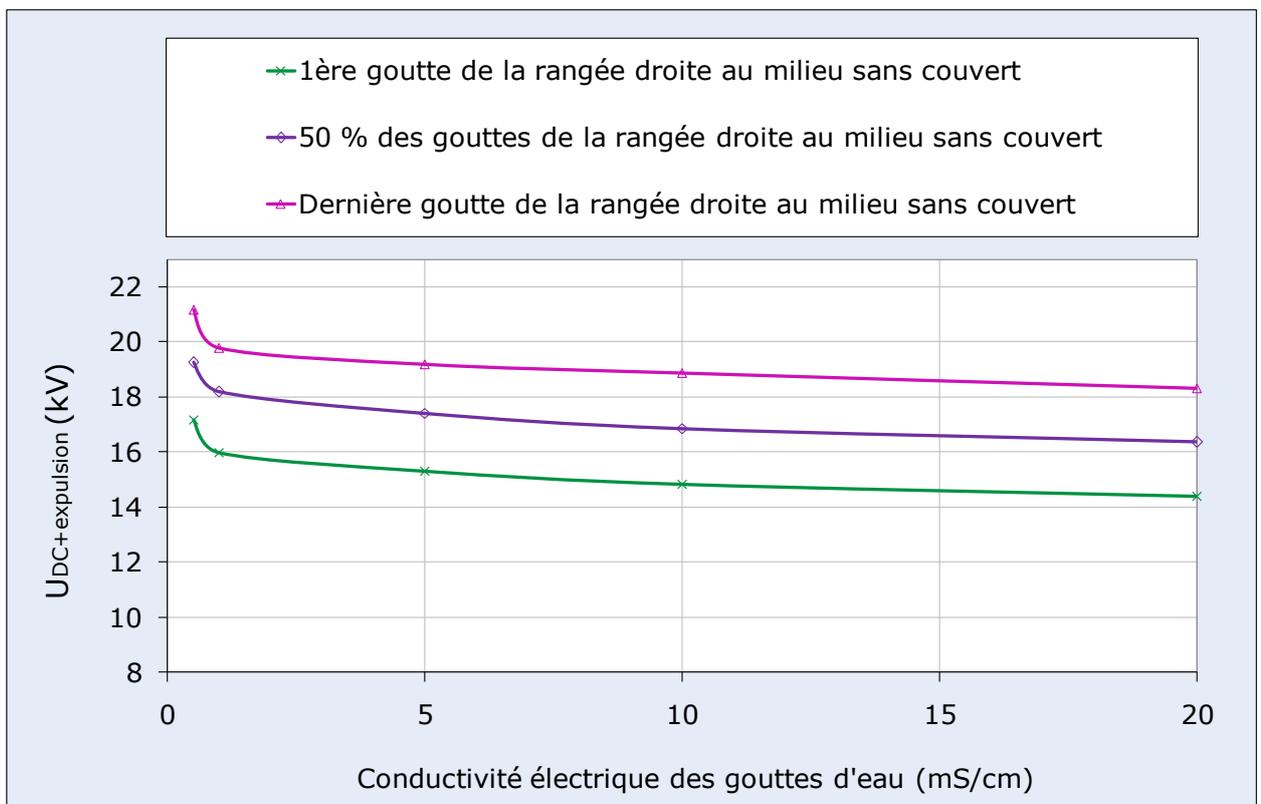
Les figures III. 27 III.28 III.29 et III.30 donnent l'allure des tensions d'éjection de la première, la médiane et la dernière goutte d'eau d'une rangée droite en fonction de sa conductivité électrique, sa position sur la surface de l'isolation et le degré de couverture de cette dernière (HT, terre, milieu sans ou avec couvert).



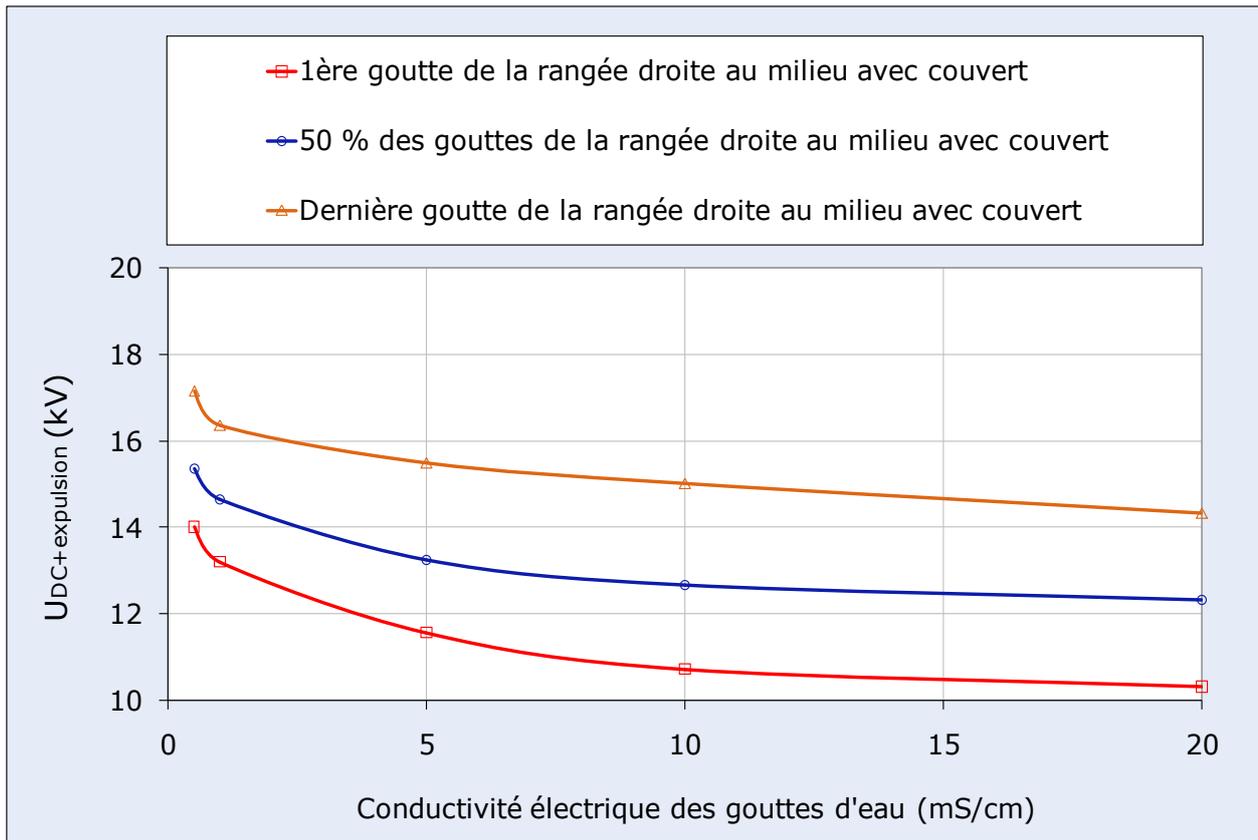
**Fig. III. 27:** Tension d'éviction des gouttes d'eau d'une rangée droite côté HT en fonction de leur conductivité



**Fig. III. 28:** Tension d'éviction des gouttes d'eau sous arrangement en ligne droite côté terre en fonction de leur conductivité



**Fig. III. 29:** Tension d'éviction des gouttes d'eau sous arrangement en ligne droite du milieu sans couvert en fonction de leur conductivité



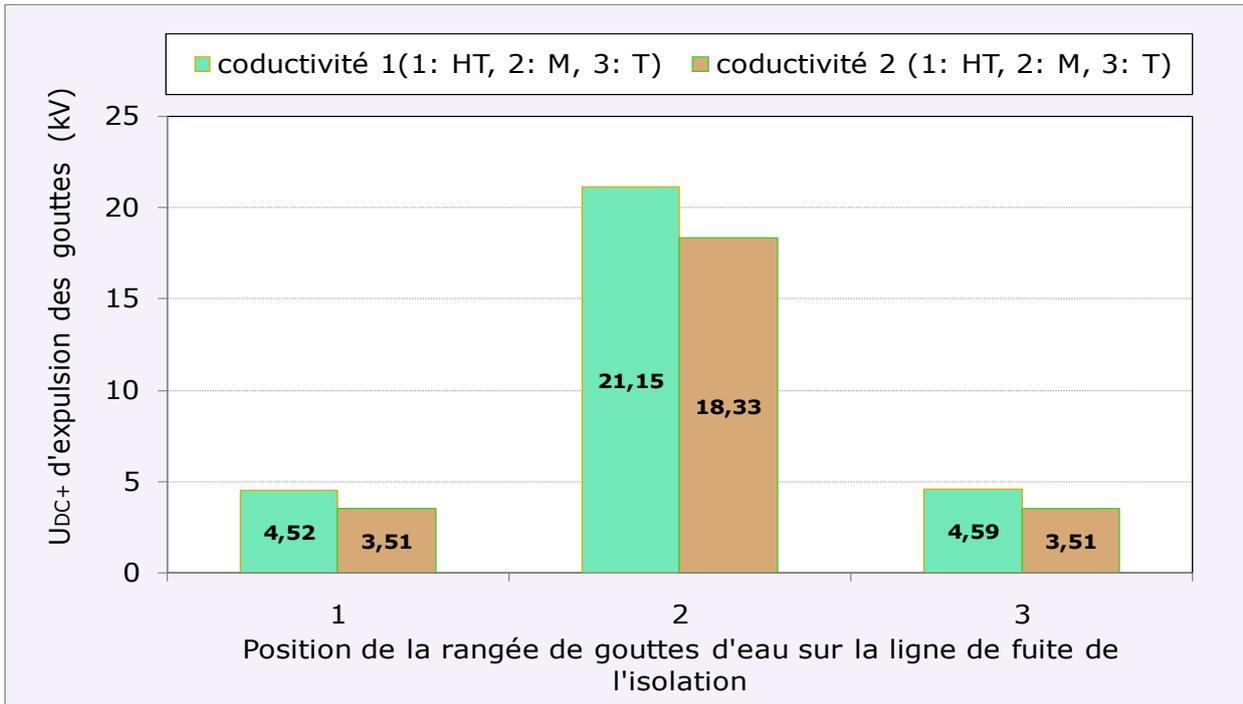
**Fig. III. 30:** Tension d'éviction des gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu de l'isolation avec couvert en fonction de leur conductivité électrique

Il en résulte un déclin de la tension d'éjection jusqu'à une valeur limite de la conductivité électrique, de l'ordre de 1 mS/cm, au-delà de laquelle celle-ci demeure pratiquement constante. Cette évolution est indépendante de l'emplacement de la rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation ainsi que du degré de couverture de cette dernière. Quand la conductivité électrique des gouttes d'eau est faible, les lignes du champ ne traversent pas ces dernières mais plutôt éloignées de celle-ci, ce qui nécessite une tension d'évacuation plus élevée pour libérer l'isolation.

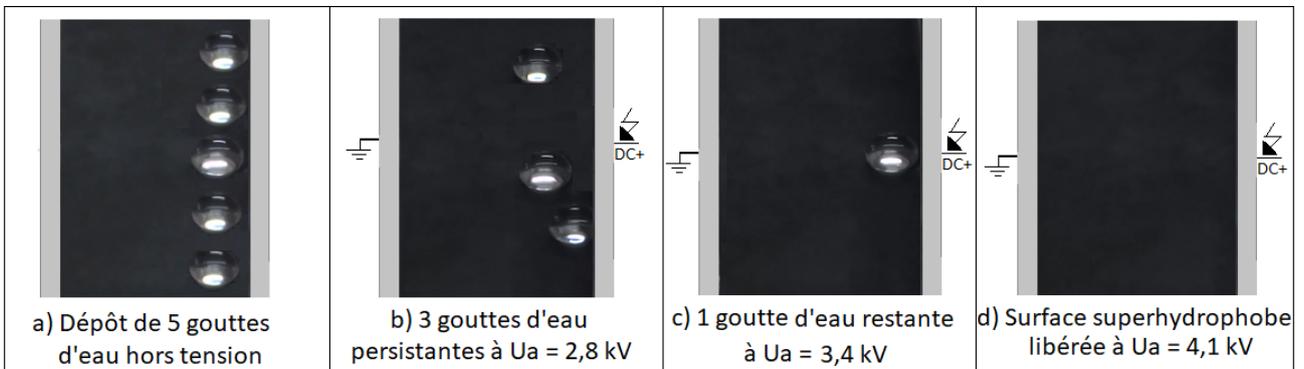
Ces mêmes figures montrent aussi que la tension d'éviction des gouttes d'eau de la rangée avoisinant l'électrode terre est comprise entre celle des gouttes de la rangée, située au voisinage proche de l'électrode HT et celle se trouvant au milieu de l'isolation. De même, la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la rangée du milieu est plus petite en présence de couverture de l'isolation que sans celle-ci, pour les mêmes raisons citées précédemment.

La figure III. 31 donne un histogramme de comparaison de la tension d'expulsion en dehors de l'isolation des gouttes d'eau d'une rangée droite à emplacement variable et pour deux conductivités électriques faible ( $\sigma_{v1} = 0,5$  mS/cm) et forte ( $\sigma_{v2} = 20$  mS/cm). Il en découle que la tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus petite pour une conductivité électrique élevée quel que soit

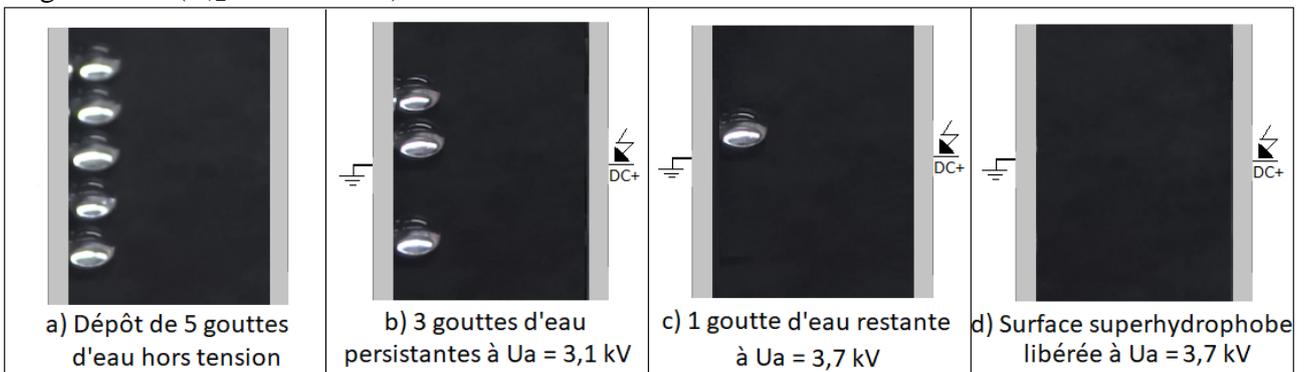
l'emplacement de la rangée sur la surface de l'isolation. De plus celle-ci est plus élevée pour une rangée positionnée au milieu de l'isolation qu'au voisinage des électrodes HT et terre.



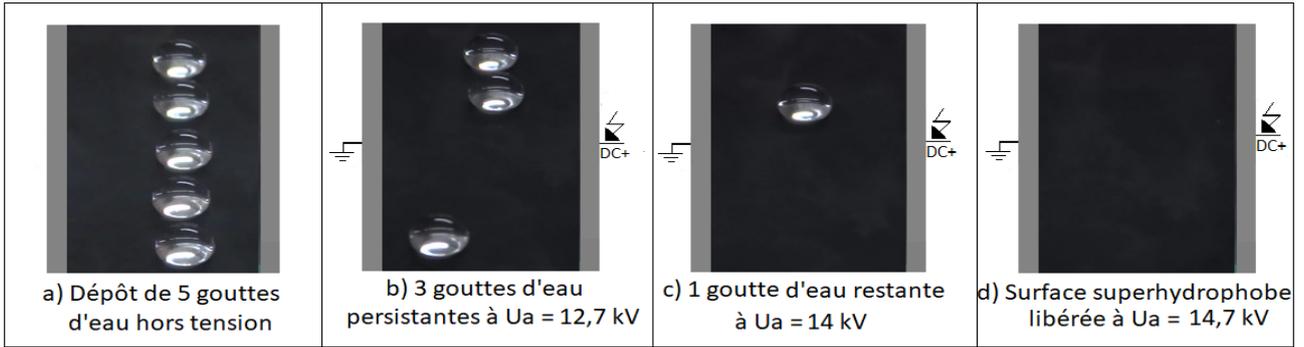
**Fig. III. 31:** Tension d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée droite en fonction de sa position sur la surface de l'isolation pour deux conductivités électriques différentes des perles d'eau



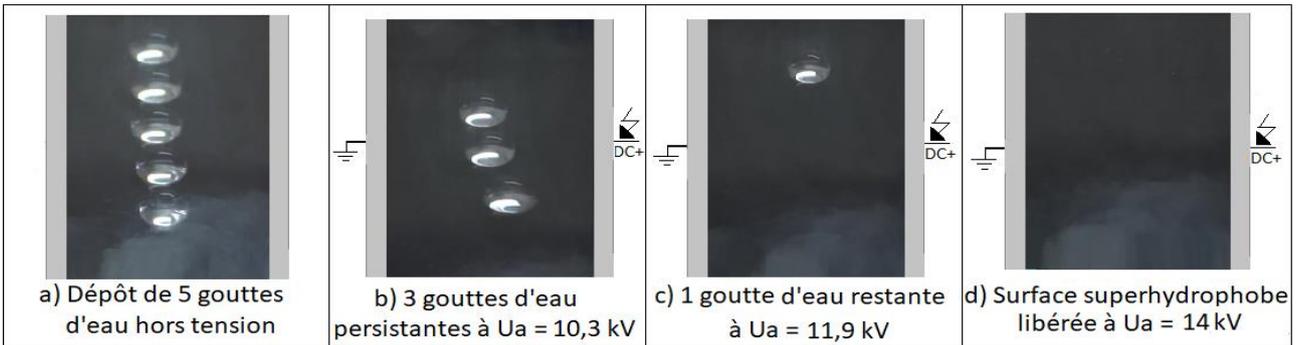
**Fig. III. 32:** Phases essentielles d'éjection unidirectionnelle via HT de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite ( $\sigma_{v2} = 20$  mS/cm)



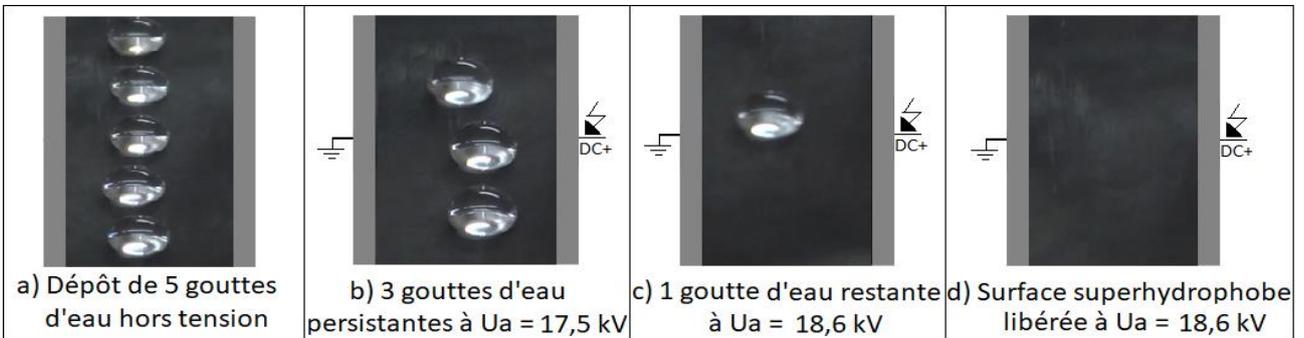
**Fig. III. 33:** Phases essentielles d'éjection unidirectionnelle via terre de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite ( $\sigma_{v2} = 20$  mS/cm)



**Fig. III. 34:** Phases essentielles d'éjection bidirectionnelle de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu sans couvert en ( $\sigma_{v2} = 20 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. III. 35:** Phases essentielles d'éjection bidirectionnelle de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu avec couvert ( $\sigma_{v2} = 20 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. III. 36:** Phases essentielles d'éjection bidirectionnel de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu sans couvert ( $\sigma_{v1} = 0,5 \text{ mS/cm}$ )

Les figures III. 32 III. 33 III. 34 III. 35 et III. 36 illustrent les phases essentielles d'éjection uni- ou bidirectionnelle en dehors de l'isolation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite pour deux conductivités électriques 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 elles sont suivi par celles se trouvant à l'intérieur de la rangée, indépendamment de la valeur de la conductivité électrique considérée, la position de la rangée sur la surface de l'isolation et le degré de couverture de celle-ci. De plus la valeur de la tension d'expulsion des gouttes est plus élevée pour une faible conductivité électrique pour des raisons similaires que celles déjà suscitées.

Il est à constater que la rétention de la superhydrophobie des échantillons utilisés durant cette expérience après avoir mesuré l'angle de contact à la fin des essais est remarquée, ainsi que l'absence de toute forme de décharge électrique de surface partielle ou de contournement de l'isolation.

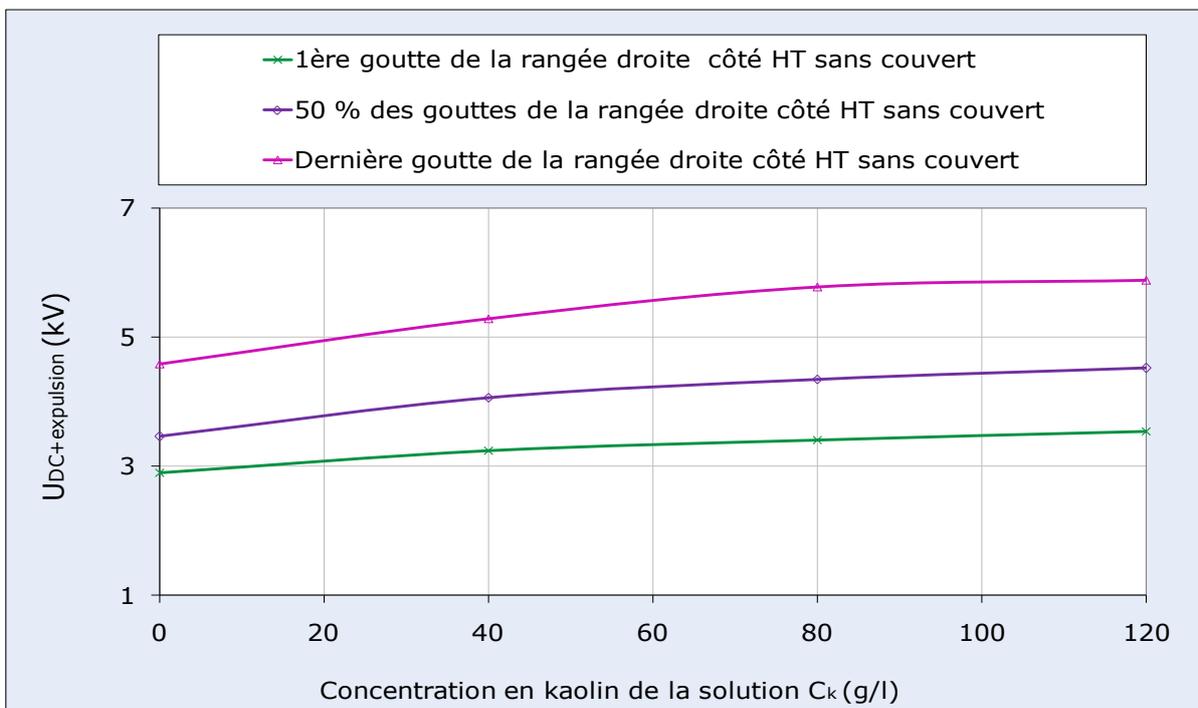
### III. 4. 3 Concentration en kaolin de la solution polluante

Les figures III. 37 III. 38 III. 39 et III. 40 donnent l'évolution de la tension d'éjection de la première, la médiane et la dernière goutte d'eau en fonction de degré de concentration en kaolin de la solution utilisée et la position de la rangée sur la surface isolante superhydrophobe. Il en résulte une allure strictement croissante jusqu'à une valeur limite de  $C_k = 80$  g/l et au-delà de laquelle celle-ci demeure pratiquement constante quels que soient la position de la rangée et le degré de couverture de l'isolation.

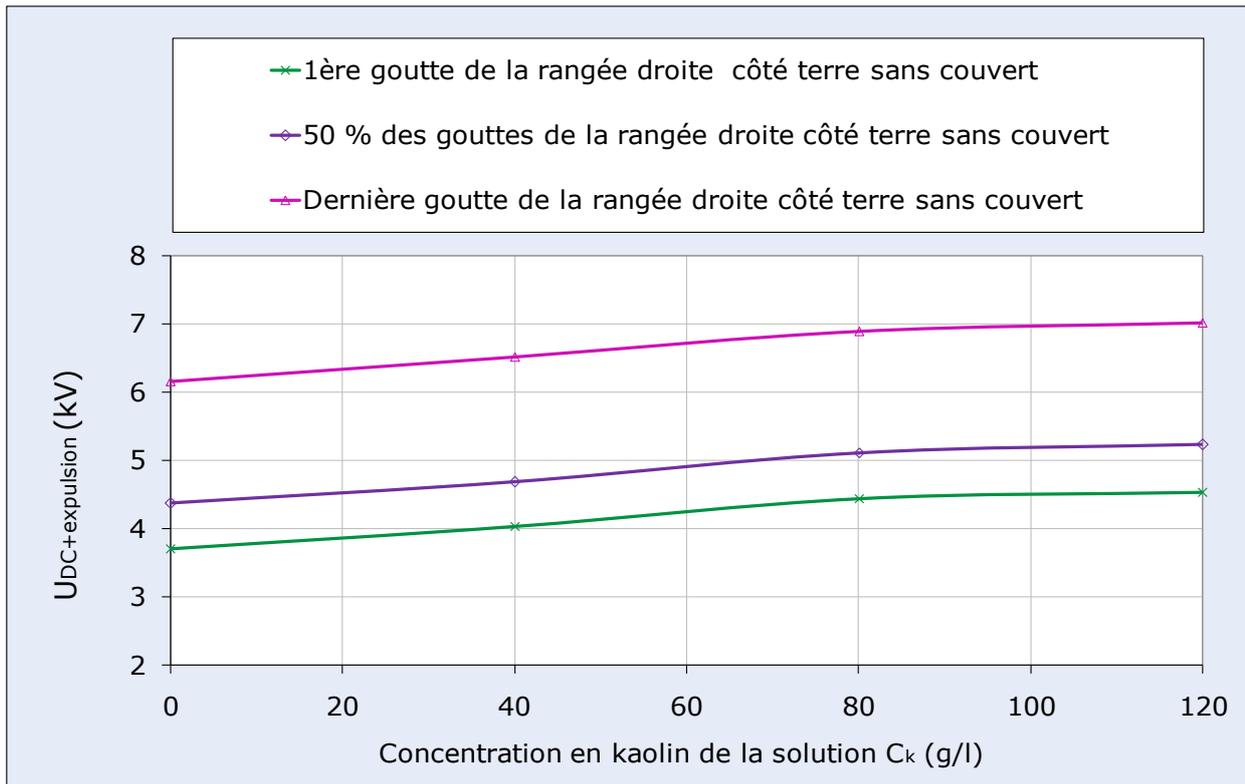
La tension d'éjection des gouttes d'eau augmente au fur à mesure du déplacement de la rangée du voisinage des électrodes sous tension et terre vers le milieu de l'isolation superhydrophobe.

L'élévation de la tension d'évacuation 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 plus lourdes, cèdent partiellement une certaine quantité du kaolin insoluble 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.

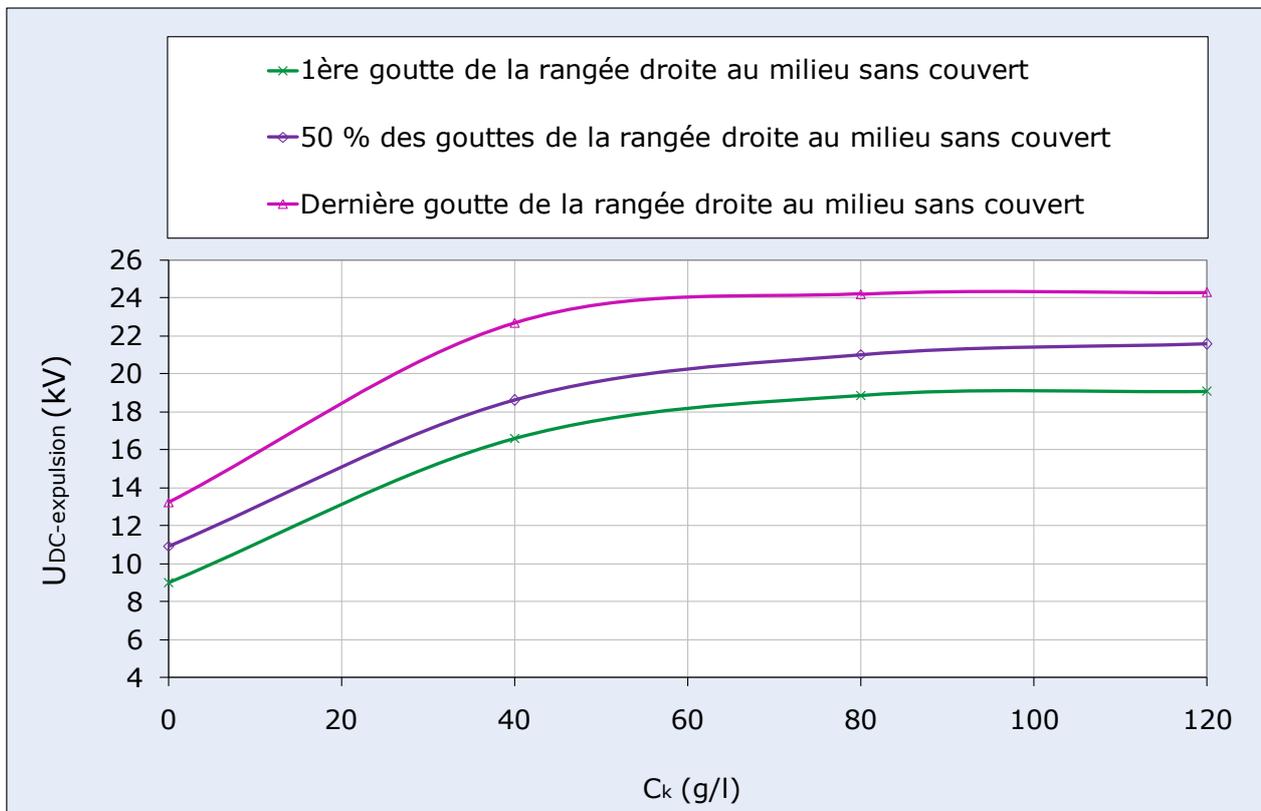
sans ces gouttes.



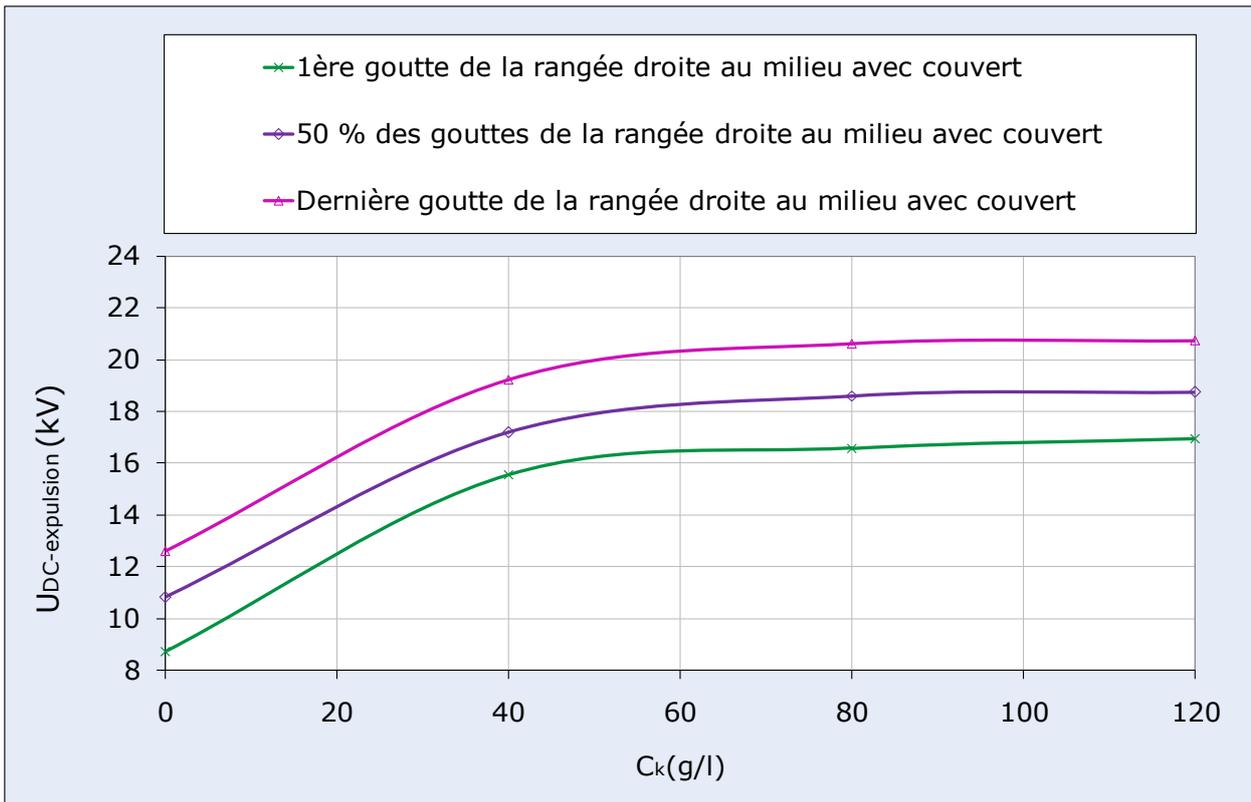
**Fig. III. 37:** Tension d'expulsion en fonction de concentration en kaolin des gouttes d'eau déposées au voisinage très proche de l'électrode HT



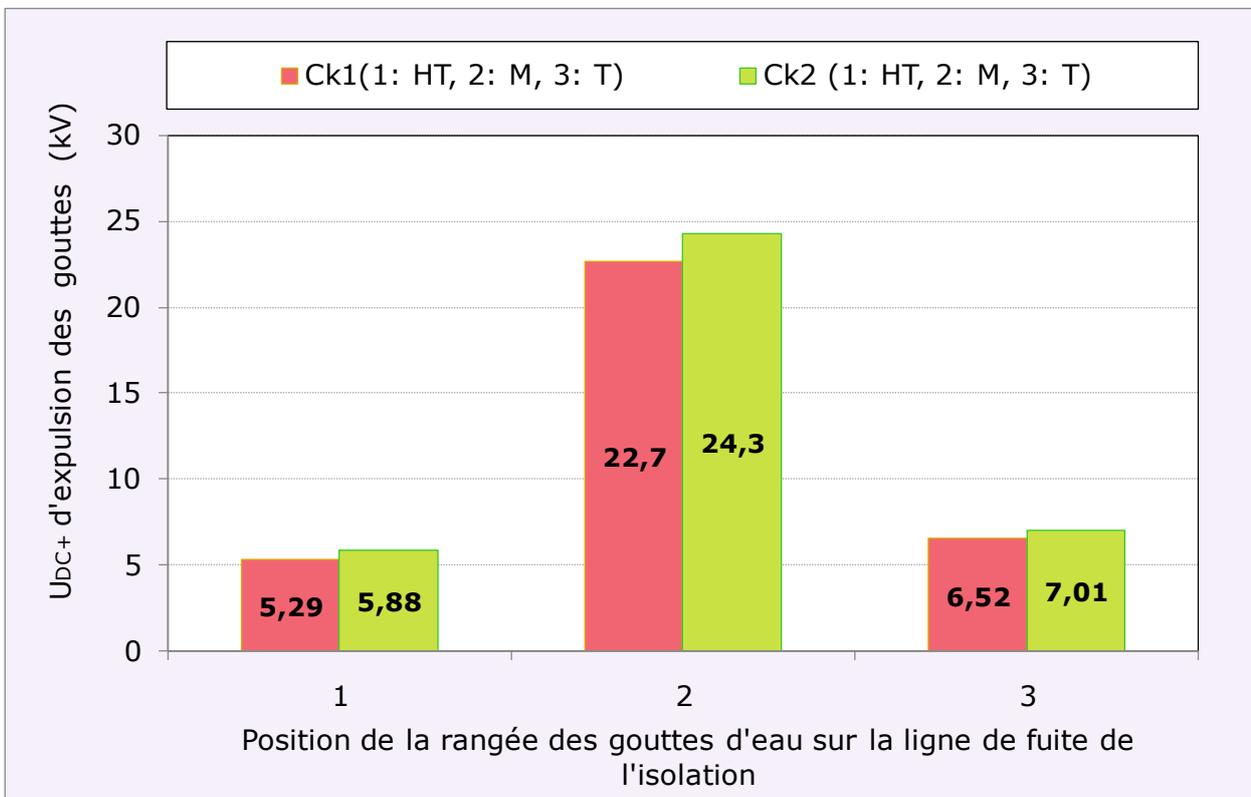
**Fig. III. 38:** Tension d'expulsion en fonction de  $C_k$  des gouttes d'eau déposées du côté terre sur la surface de l'isolation superhydrophobe



**Fig. III. 39:** Tension d'expulsion en fonction de  $C_k$  des gouttes d'eau déposées au milieu de la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert



**Fig. III. 40:** Tension d'expulsion en fonction de  $C_k$  des gouttes d'eau déposées au milieu de la surface isolante superhydrophobe avec couvert

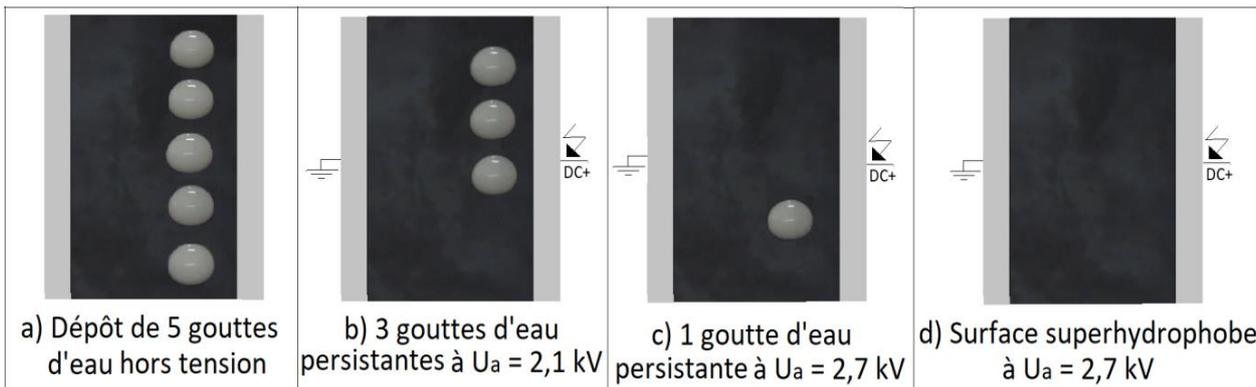


**Fig. III. 41 :** Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée droite en fonction de sa position sur la surface isolante superhydrophobe

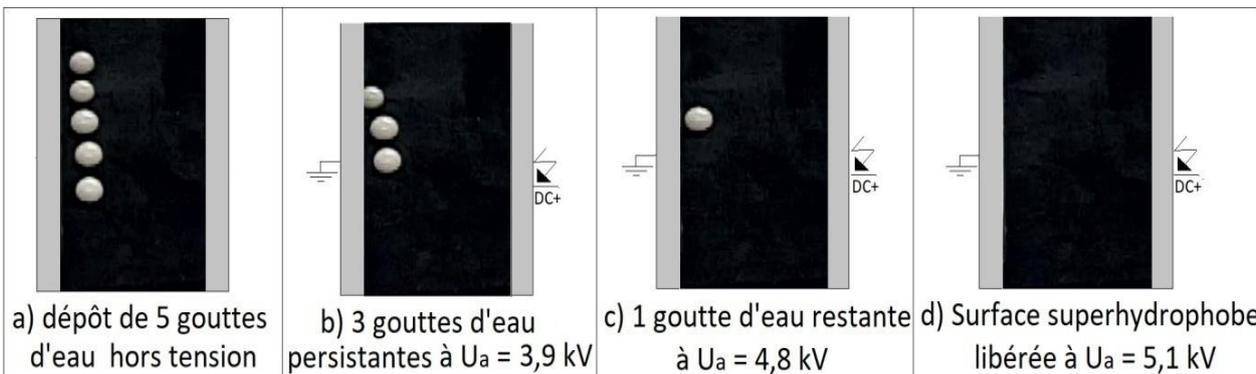
La figure III. 41 donne un histogramme de comparaison de la tension d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation, pour deux concentrations différentes en kaolin de la solution:  $C_{k1} = 0 \text{ g/l}$  et  $C_{k2} = 120 \text{ g/l}$ . Il en résulte une tension d'évacuation des gouttes d'eau plus importante pour une concentration plus élevée quel que soit l'emplacement de la rangée sur la surface de l'isolation. Sa valeur est de l'ordre de 60 % de celle de contournement de l'isolation

Les figures III. 42, III. 43, III. 44, III. 45 et III. 46 représentent les phases essentielles d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation en fonction de la concentration du kaolin et de leur position. Il en résulte une similitude entre les images illustrées par ces figures. La seule différence réside au niveau de la tension d'éviction des gouttes d'eau en dehors de l'isolation. La tension d'éjection des gouttes d'eau est plus grande pour une concentration élevée en kaolin que faible.

La variation de la concentration en kaolin n'exerce aucune influence sur l'hydrophobicité de la surface du matériau expérimenté et aucune décharge partielle et/ou de son contournement n'a été remarquée.



**Fig. III. 42 :** Phases essentielles d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite du côté terre de l'isolation sans couvert ( $C_k = 120 \text{ g/l}$ )



**Fig. III. 43 :** Principales étapes d'évacuation de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite du côté HT de l'isolation sans couvert ( $C_k = 120 \text{ g/l}$ )

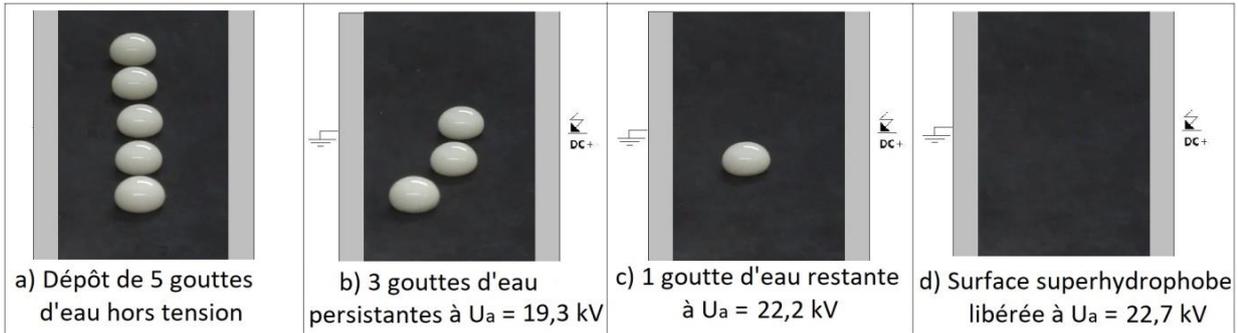
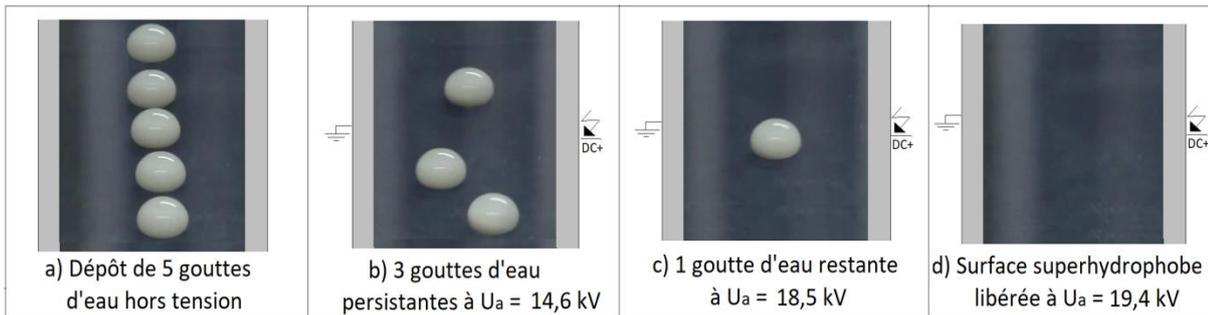
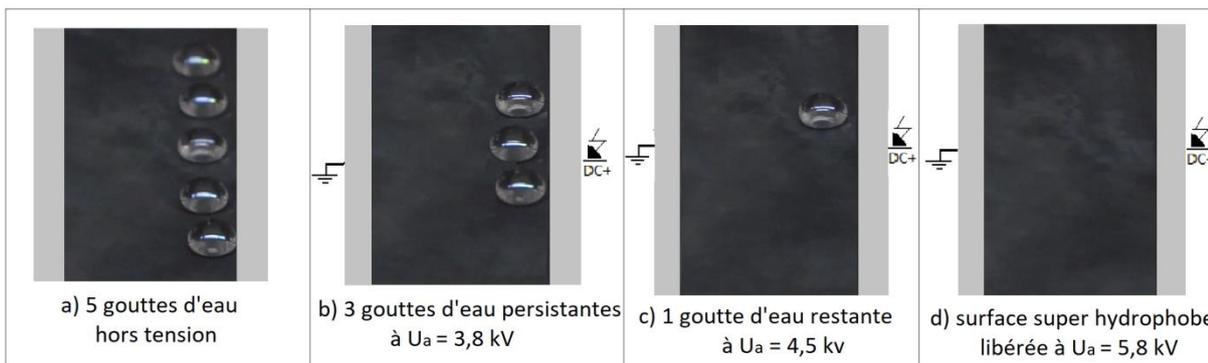


Fig.

**III. 44:** Principales étapes d'expulsion de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu de la surface de l'isolation superhydrophobe sans couvert ( $C_k = 120$  g/l)



**Fig. III. 45 :** Phases essentielles d'éjection de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite au milieu de la surface isolante avec couvert ( $C_k = 120$  g/l)



**Fig. III. 46 :** Phases essentielles d'expulsion de 5 gouttes d'eau d'une rangée droite du côté HT de l'isolation sans couvert ( $C_k = 0$  g/l)

Ce mode d'évacuation des gouttes d'eau, malgré collantes et alourdies par une forte concentration en kaolin de la solution n'est accompagné d'aucune formation 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 décelé. La non diminution de l'angle de contact de l'isolation, mesuré en fin de chaque série d'essais, dénote la conservation de la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude.

### III. 5 Conclusion

Ce travail nous a permis tout d'abord de fabriquer nous même notre propre surface superhydrophobe à base de silicone avec un angle de contact égal à  $159^\circ$ .

Les résultats obtenus sur la performance électrique d'une isolation superhydrophobe après avoir testé plusieurs échantillons de ce matériau suivant certaines grandeurs d'influence peuvent être résumés comme suit :

- La tension d'évacuation des gouttes d'eau sous un arrangement en lignes droites est plus grande qu'en zigzag;
- Pour une goutte de rang quelconque (première, médiane, dernière), sa tension d'éjection augmente en fonction de sa position allant du voisinage très proche des électrodes vers le milieu de la surface de l'isolation. 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 est plus élevée lorsque celle-ci est placée au niveau de l'électrode terre que sous tension;
- 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;
- La tension d'évacuation des gouttes d'eau est de loin plus importante pour une concentration plus élevée en kaolin de la solution polluante, mais sans toute fois dépasser les 60 % de la tension de contournement de l'isolation à l'état sec.
- La tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface de l'isolation est plus faible avec couverture que sans celle-ci;

La non diminution de l'angle de contact de l'isolation, mesuré en fin de chaque série d'essais, dénote la conservation de la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude, et aucune décharge partielle et /ou de contournement n'a été produite. Ces résultats militent bien pour une éventuelle intégration de cette isolation dans le domaine de l'énergie électrique.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'étude de la performance électrique d'une isolation superhydrophobe avec gouttes d'eau sous tension continue positive a mené aux résultats essentiels suivants :

- Nous avons réalisée manuellement des surfaces superhydrophobes à base de la silicone dont l'angle de contact est égal à  $159^\circ$ . La tension de contournement devient importante quand la plaque est à son état sec;
- Quel que soit le nombre de gouttes d'eau déposées sur la surface superhydrophobe considérée, le nombre de rangées, le mode de leur arrangement, leur conductivité électrique et la concentration en kaolin de la solution d'eau, ces perles d'eau quittent la surface de l'isolation de manière grupo-individuelle et le nombre de gouttes transitant par les électrodes HT et terre est quasiment le même;

Concernant le nombre de gouttes d'eau, celui-ci fait croître la tension de leur 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.

- Les gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites sont difficilement évacuées qu'en zigzag;
- La tension d'éjection des gouttes d'eau de faible volume est supérieure à celle obtenue pour un grand volume;
- Une faible conductivité électrique des gouttes d'eau nécessite une tension de leur éviction plus importante;
- Il existe une valeur limite au-delà de laquelle elle demeure constante quelle que soit la concentration en kaolin de la solution d'eau;
- La tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface de l'isolation est plus grande sans couverture que avec celle-ci;

La stabilisation de l'angle de contact, mesuré en fin de chaque série d'essais, dénote la conservation de la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude, et aucune décharge partielle et/ou de contournement n'a été provoquée. Ces résultats militent bien pour une éventuelle utilisation de cette isolation dans le domaine de l'énergie électrique.

***Références  
bibliographiques***

## Références bibliographiques

- [1] Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces», Neinhuis, C. Barthlott, W., *Ann. Botan.* (1997), 79, 667-677.
- [2] D. Quéré, "Physique statistique: Les surfaces super hydrophobes", pp. 239-244, david.quere@college-de-france.fr, 2005.
- [3] <https://tpesuperhydrophobiemgs.wordpress.com/>.
- [4] Futura-Science 2001-2019 consulté le 24/2/2019 10/49
- [5] Elina moncada-potignon, Emmanuelle guerret, professeur encadrant : M.Merilhou, «olympiades de physique» 2014-2015.
- [6] «Les surfaces naturelles super hydrophobes», document word.
- [7] Xue Yanpeng, «Voie innovante pour la nano micro texturation de surfaces métalliques à base d'assemblage de nanoparticules d'Au : application superhydrophobe», mémoire, 26 juin 2014.
- [8] Saleema, N.; Sarkar, D.K.; Gallant, D.; Paynter, R.W. ; Chen, X.G., "Chemical nature of Superhydrophobic aluminum alloy surfaces produced via a one-step process using fluoroalkylsilane in a base medium", *ACS Appl. Mater. Interfaces* (2011), 3, 4775-4781
- [9] Sarkar, D.K.; Saleema, N., "One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings", *Surf.Coat. Technol.* (2010), 204, 2483-2486.
- [10] 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.
- [11] Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Mater. Lett.*, "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces", (2010), 64, 2722-2724.
- [12] Sarkar, D.K.; Farzaneh, M.; Paynter, R.W., *Mater.*, "Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces", *Lett* (2008), 62, 1226-1229.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] A. Kuechler, "Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen", 3<sup>ème</sup> édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Ger

- [16] David Quéré, «Les surfaces super-hydrophobes», Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, CNRS/Collège de France, pp [1-244].
- [17] R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water”, *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no. 8, pp. 988-994, 1936.
- [18] A. Cassie and S. Baxter, “Wettability of porous surfaces”, *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, pp. 546-551, 1944.
- [19] A. Tuteja et al., “Robust omniphobic surfaces”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 47, pp. 18200-18205, 2008.
- [20] B. He; J. Lee; N. A. Patankar, “Contact angle hysteresis on rough hydrophobic surfaces”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 248, no. 1, pp. 101-104, 2004.
- [21] M. Zhou, X. Pang, and K. Gao, “Fabrication of a Superhydrophobic Film with Self-Cleaning Property on Magnesium Alloy and Its Corrosion Resistance Properties,” *Magnesium Technology 2016*, pp. 279-283, 2016.
- [23] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, and Z. Wang, “Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application”, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 18, no. 6, pp. 621-633, 2008.
- [24] S. Shin, J. Seo, H. Han, S. Kang, H. Kim, and T. Lee, “Bio-Inspired Extreme Wetting Surfaces for Biomedical Applications”, *Materials*, vol. 9, no. 2, p. 116, 2016.
- [25] K. Chang, T. Chuang, W. Ji, C. Chang, Y. Peng, and H. Shih, “UV-curable nanocasting technique to prepare bioinspired superhydrophobic organic-inorganic composite anticorrosion coatings”, *Express Polymer Letters*, vol. 9, no. 2, 2015.
- [26] :A. Belguendouz et R. Kaouane «Etude du comportement électrique d’une isolation superhydrophobe sous l’impact de gouttes d’eau et tension continue positive» PFE 2017-2018 université de Bejaïa
- [27] G. Talal, «Comportement d’un modèle d’isolateur sous tension impulsionnelle», *Mémoire de magister en génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d’Alger 2007.*
- [28] CEI 507, « Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés à courant alternatif », Deuxième édition ,1991.
- [29] S. Lotfi, S. Djafri, « Contribution à l’Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l’Arbaa », *Université des et de la Technologie Houari Boumediene d’Alger*, Juin 1982.

- [30] A. Mekhaldi, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [31] M. Tegar, « Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres Electro géométriques », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avril 2003.
- [32] T. Guia, « Comportement d'un modèle Isolateur sous à une Tension Impulsionnelle », Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, Mai 2010.
- [33] K. Amriche, S. Benayad, « Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue », PFE Ingénieur, Génie Electrique, USTHB Alger, 2004.
- [34] Robert Fournié, « Les isolants en électrotechnique » – Concepts et théorie (1986).
- [35] S. Guerfi, « Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue », Thèse de Magister, Génie Electrique, Université de Bejaia.
- [36] D. Namane, « Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz », Thèse de magister, ENP Alger, 1998.
- [37] P. J. Lambeth, H. Auxel et M. P. Verma, « Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension », Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [38] M. Tegar, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Juillet 1993.
- [39] N. Khairoun, E. Abderrahmane, D. Zellouta « Essais sur isolateurs pollues et Modélisation », Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2007/2008.
- [40] M. Slama « contribution a l'étude de l'influence de la non uniformité de la pollution Basée sur la méthode de la D.D.S.E pour le dimensionnement des isolateurs des lignes THT a courant alternatif », mémoire de magister ; promotion 2002, université Mohamed Boudiaf, Oran.
- [41] F. Taleb, A. Bouleghlem « Comportement de l'Isolateur capôt et tige 15121 Pollué sous Tension Alternative 50 Hz » Ecole Nationale polytechnique d'Alger 2010.
- [42] W. Heise, G.F. Luxa, G. Revrery, M. P. Verma, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, rapport 33-09 1972.

- [43] Y. Li et al. « Effect of superhydrophobicity on flashover characteristics of siliconed Rubber under wet conditions », AIP ADVANCES 8,015313 (2018), pp.1-12.
- [46] M. Soufi, M. Zemirline, « Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP Alger, 2004.
- [47] CEI 60-1. « Technique des Essais à Haute tension », Définitions et prescriptions générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1987.
- [48] Z. Sahli, « Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu », Thèse de Magister, Génie Electrique, Université de Bejaia, 2003.
- [49] A. Mekhaldi, « Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique », Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.
- [50] Meraghni Tahar, Guia Issam, « effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension », mémoire de master, 2015.
- [51] Fatiha Aouabed, « Contribution A L'étude D'un Circuit Equivalent Des Isolateur Synthétiques Sous Pollution En Utilisant L'emtp », Mémoire De Magister, Setif.
- [52] IEC 62271-304, "Technical Specification of design classes of indoor enclosed Switchgear and controlgear from 1 kV and up to and including 52 kV to be used in severe climatic condition", High Voltage Switchgear and Controlgear-PART 304.
- [53] IEC (60060-1), "High Voltage test technique ", part 1 : General definition and test requirement, 1991.
- [54] T. Braunsberger, M. Kurrat, "Cyclic Water Drop Corona on Silicone Rubber Samples", 15<sup>th</sup> International Symposium on High voltage Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, August 27-31, T4-280, pp 1-5, 2007.
- [55] 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.
- [56] R. Boudissa, F. Bouchelga, T. Beloul, 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.

[57] T. Belhouli, R. Boudissa, K.D. Him, "Comparison of the Performance of Silicone and Glass Barriers under Direct Current and very Severe Condition of Pollution", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, Issue 1, pp. 471- 482, February 2017.

## Résumé

L'objectif recherché à travers notre présent travail consiste en la confection de surfaces isolantes superhydrophobes à base de silicone et d'un dispositif semi-automatique de dépôt de gouttes d'eau sur de telles isolations afin d'étudier leur comportement électrique sous tension continue positive. A cet effet, l'influence de certains paramètres géométriques (volume, nombre de rangées, type d'arrangement, concentration en kaolin dans l'eau) et électriques (conductivité électrique) de gouttes d'eau sur la tension de leur expulsion hors du système composé de la surface superhydrophobe et électrodes. Les résultats essentiels émanant de cette étude expérimentale peuvent être résumés comme suit:

- Quel que soit le nombre de gouttes d'eau déposées sur la surface superhydrophobe considérée, le nombre de rangées, le mode de leur arrangement, leur conductivité électrique et la concentration en kaolin de la solution d'eau, ces perles d'eau quittent la surface de l'isolation de manière groupo-individuelle et le nombre de gouttes transitant par les électrodes HT et terre est quasiment le même;
- Les gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites sont difficilement évacuées qu'en zigzag;
- La tension d'éjection des gouttes d'eau de faible volume est supérieure à celle obtenue pour un grand volume;
- Une faible conductivité électrique des gouttes d'eau nécessite une tension de leur éviction plus importante;
- Il existe une valeur limite au-delà de laquelle elle demeure constante quelle que soit la concentration en kaolin de la solution d'eau;
- La tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface de l'isolation est plus grande sans couverture que avec celle-ci;
- La non diminution de l'angle de contact de l'isolation, mesuré en fin de chaque série d'essais, dénote la conservation de la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude, et aucune décharge partielle et /ou de contournement n'a été produite. Ces résultats militent bien pour une éventuelle intégration de cette isolation dans le domaine de l'énergie électrique.

**Mots clés :** Superhydrophobe, isolation, tension d'expulsion.