



**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**

En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique

**Options : Réseau électrique**

**Automatisme industriel**

## **Thème**

**ETUDE DU COMPORTEMENT ELECTRIQUE D'UNE ISOLATION  
SUPERHYDROPHOBE SOUS L'IMPACT DE GOUTTES D'EAU ET TENSION  
CONTINU POSITIVE**

**Réalisé par :**

**M<sup>elle</sup> BELGUENDOZ Asma**

**M<sup>elle</sup> KAOUANE Roumaïssa**

**Encadré par:**

**M<sup>r</sup>. R. BOUDISSA : Promoteur**

**M<sup>r</sup>. N.TAIB : Co-promoteur**

---

**Promotion 2017/2018**



# *Remerciement*

*Avant tout, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.*

*Nous remercions nos familles respectives qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.*

*Nos plus grands remerciements vont à notre promoteur Mr. Boudissa pour avoir accepté de nous guider sur le bon chemin tout au long de ce travail.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger ce travail.*

*Nous tenons à remercier également l'ensemble des enseignants de département GENIE ELECTRIQUE pour leurs rôles importants dans notre formation*

*Notre sincère gratitude va vers tous ce qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



***Merci***

# Dédicaces

## *Au bon dieu*

*Tout puissant Qui m'a inspiré Qui m'a guidé dans le bon chemin je vous dois ce que je suis devenue Louanges et remerciements Pour votre clémence et miséricorde.*

## **A MES CHÈRES PARENTS**

*(Rachid et Khoukha)*

*Je ne trouverai jamais de mots pour vous exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour, la tendresse et surtout pour votre présence dans mes moments les plus difficiles, et si j'en suis arrivé là ce n'est que grâce à vous. Vous m'avez toujours conseillé et orienté dans la voie du travail et de l'honneur, Ce modeste travail paraît bien dérisoire pour traduire une reconnaissance infinie. Puisse ce jour être la récompense de tous les efforts et l'exaucement de vos prières tant formulées*

## **A mes grands parents maternels et paternels**

*Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte*

*Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour*

## **A MES CHÈRES SŒURS**

*(SARA, SIRINA, ABIR, MAYA)*

*Vous avez Toujours été là pour moi, à partager les moments les plus difficiles, mais aussi les plus joyeux. Je vous dédie ce travail, en guise de reconnaissance de votre amour, votre affection, votre tendresse,*

*Votre compréhension et votre générosité avec tous mes vœux de bonheur, santé, succès et de réussite. Je prie Dieu le tout puissant pour nous garder, à jamais, unis en pleine amour, joie et prospérité, J'espère que vous soyez aujourd'hui fiers de moi. Moi je suis très fière de vous.*

*A MES TRÈS CHÈRES TANTES ET ONCLE MÂTERELLES ET LEURS  
CHALEUREUSE FAMILLE*

*(Nassir, Abdelali, Mounira, seddik, Hakima, ferroudja)*

*Trouvez en ce travail l'expression de mon profond amour et mon  
grand respect.*

*A mes tantes et mes oncles paternels*

*MES TRÈS CHÈRES COUSINES ET COUSINS*

*En particulier (Houda, Souma, Lila, Lilia)*

*A MES TRÈS CHÈRES AMIES :*

*(Rosa, widdad, lamia, Hanane, sylouh, myassa, kamy, Nina, salwa,  
kamilia, kenza, Celia, Amina, Lydia)*

*(Ali, Fafa, bibouh, fafy, okba, lamine, bagui, akli, Hamza, Younes,  
Yanis mignon, Mounir, halim, loucif, idir, Alilou, Allaoua, lounis,  
bichemane, hani, chakib)*

*Merci pour toutes ces années où nous avons partagé aussi bien les bons  
que les mauvais moments, vous avez toujours été là pour moi, je vous  
dédie ce travail, en guise de reconnaissance de votre amour*

*A tous ceux qui je n'ai pas mentionné mais qui sont dans mon cœur*

*A tous les étudiants de ma section*

## Dédicaces

### *Au bon dieu*

*Tout puissant qui m'a inspiré Qui m'a guidé dans le bon chemin je vous dois ce que je suis devenue. Louanges et remerciements pour votre clémence et miséricorde*

### **A MES CHÈRES PARENTS**

*(Farid, Fazia)*

*Je ne trouverai jamais de mots pour vous exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour, la tendresse et surtout pour votre présence dans mes moments les plus difficiles, et si j'en suis arrivé là ce n'est que grâce à vous. Vous m'avez toujours conseillé et orienté dans la voie du travail et de l'honneur, Ce modeste travail paraît bien dérisoire pour traduire une reconnaissance infinie. Puisse ce jour être la récompense de tous les efforts et l'exaucement de vos prières tant formulées*

### **A mes grands-parents maternels et paternels**

*Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour*

### **A Mon chers frère Achour et sœur Feriel**

*Vous avez Toujours été là pour moi, à partager les moments les plus difficiles, mais aussi les plus joyeux. Je vous dédie ce travail, en guise de reconnaissance de votre amour, votre affection, votre tendresse,*

*Votre compréhension et votre générosité avec tous mes vœux de bonheur, santé, succès et de réussite. Je prie Dieu le tout puissant pour nous garder, à jamais, unis en plein amour, joie et prospérité, J'espère que vous soyez aujourd'hui fiers de moi. Moi je suis très fière de vous.*

### **MES TRÈS CHÈRES COUSINES ET COUSINS**

*Trouvez en ce travail l'expression de mon profond amour et mon grand respect.*

*En particulier (Bilal, Souad, makakache)*

*A tous ceux qui je n'ai pas mentionné mais qui sont dans mon cœur A tous les étudiants de ma section*

## Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Matériaux hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobe</b>	
I. 1 Introduction.....	02
I. 2 Définitions et significations.....	02
I. 2. 1 Hydrophilité.....	02
I. 2. 2 Hydrophobicité.....	02
I. 2. 3 Superhydrophobicité.....	03
I. 2. 4 Mouillabilité.....	03
I. 2. 5 Force de Van der Waals.....	04
I. 2. 6 Tension superficielle.....	04
I. 3 Différents types de matériaux.....	05
I. 3. 1 Matériaux naturels.....	05
I. 3. 2 Matériaux artificiels.....	06
I. 3. 2. 1 Dépôt par bain chimique.....	06
I. 3. 2. 2 Dépôt par vapeur chimique.....	07
I. 3. 2. 3 Dépôt électrochimique.....	07
I. 3. 2. 4 Gravure chimique.....	07
I. 3. 2. 5 Photolithographie.....	07
I. 3. 2. 6 Techniques utilisant le plasma.....	08
I. 4 Propriétés électriques et particulières.....	08
I. 4. 1 Propriétés électriques.....	08

---

I. 4. 1. 1 Rigidité diélectrique longitudinale (RDL).....	08
I. 4. 1. 2 Résistivité superficielle.....	09
I. 4. 1. 3 Facteur de pertes ( $\text{tg}\delta$ ).....	09
I. 4. 2 Propriétés particulières.....	10
I. 4. 2. 1 Angle de contact.....	10
I. 4. 2. 1. 1 Définition.....	10
I. 4. 2. 1. 2 Modèles de Wenzel et de Cassie-Baxter.....	11
I. 5 Paramètres d'influence.....	12
I. 5. 1 Rigidité superficielle.....	12
I. 5. 1. 1 Géométrie des électrodes.....	12
I. 5. 1. 2 Géométrie des éprouvettes.....	12
I. 5. 1. 3 Température.....	13
I. 5. 1. 4 Nature de la tension.....	13
I. 5. 1. 5 Durée d'application de la tension.....	13
I. 5. 2 Résistivité superficielle.....	13
I. 5. 2. 1 Champ appliqué.....	13
I. 6 Applications.....	14
I. 7 Avantages et inconvénients.....	15
I. 7. 2 Avantages.....	15
I. 8 Conclusion.....	15

**Chapitre II:** Etat d'art sur la performance des surfaces isolantes superhydrophiles à superhydrophobes sous tension continue positive

II. 1 Introduction.....	16
II. 2 Performance électrique d'une surface isolante hydrophobe.....	16
II. 2. 1 Constellation des gouttes d'eau en lignes droites.....	16
II. 2. 2 Constellation des gouttes d'eau en lignes zigzagüée.....	21
II. 3 Performance électrique d'une surface isolante superhydrophobe.....	25
II. 4 Conclusion.....	27

**Chapitre III :** pollution des isolations électriques

III. 1 Introduction.....	28
III. 2 Définitions et significations.....	28
III. 2. 1 Pollution.....	28
III. 2. 2 Salinité (Sa).....	28
III. 2. 3 Couche de pollution.....	28
III. 2. 4 Degré de pollution.....	28
III. 3 Sources de pollution.....	28
III. 3. 1 Pollution naturelle.....	29
III. 3. 1. 1 Pollution désertique.....	29
III. 3. 1. 2 Pollution marine.....	29
III. 3. 1. 3 Autres types de pollution naturelle.....	29
III. 3. 2 Pollution industrielle.....	29
III. 3. 3 Pollution mixte.....	30

---

III. 4 Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	30
III. 4. 1 Conductance superficielle.....	30
III. 4. 2 Mesure de la pollution de l'air.....	31
III. 4. 3 Densité du dépôt non soluble (DDNS).....	31
III. 4. 4 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	32
III. 5 Conséquences de la pollution sur les équipements électriques.....	32
III. 5. 1 Contournement d'une surface isolante hydrophile.....	32
III. 5. 1. 1 Pollution uniforme.....	32
III. 5. 1. 2 Pollution non uniforme.....	33
III. 5. 2 Contournement d'une surface isolante hydrophobe sous arrangement en ligne droite .....	35
III. 5. 3 Contournement d'une surface isolante hydrophobe sous arrangement zigzag...	36
III. 5. 4 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe.....	37
III. 6 Simulation de la pollution au laboratoire.....	37
III. 6. 1 Essais sous pollution artificielle.....	37
III. 6. 1 .1 Méthode de la couche solide.....	37
III. 6 .1. 2 Méthode du brouillard salin.....	37
III. 6. 1. 3 Méthode de pollution liquide.....	38
III. 7 Techniques de lutte contre la pollution.....	38
III. 8 Conclusion.....	39
 <b>Chapitre IV : L'automatisation de la disposition des gouttes</b>	
IV. 1 Introduction.....	40
IV. 2 Cahier de charge.....	40

IV. 3 Elaboration du GRAFCET.....	41
IV. 3. 1 Présentation du logiciel de programmation (AUTOMGEN).....	41
IV. 4 GRAFCET de fonctionnement.....	43
IV. 5 Exemple d'application.....	45
IV. 5. 1Analyseur de la forme de la goutte.....	45
IV. 5. 1. 1 Tâches et applications.....	45
IV. 5. 2 Système de dosage.....	46
IV. 5. 2. 1 Système de dosage piloter.....	46
IV. 5. 2. 2 Système de dosage manuel à jet direct DS3202.....	46
IV. 5. 2. 3 Système multi-dosage avec contrôle logiciel DS3228.....	47
IV. 5. 2. 4 Système de dosage direct avec contrôle logiciel DS3210.....	47
IV. 5. 2. 5 Système de dosage à haute température DO3241.....	47
IV. 6 Avantages.....	48
IV. 7 Conclusion.....	48

## Chapitre V : Partie expérimentale

V. 1 Introduction.....	49
V. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure.....	49
V. 2. 1 Préparation de la surface superhydrophobe.....	49
V. 2. 2 Choix et fixation du volume des gouttes d'eau.....	50
V. 2. 3 Mesure de l'angle de contact.....	50
V. 2. 4 Confection des électrodes haute tension et terre.....	51
V. 3 Résultats et discussions.....	53

---

V. 3. 1 Tension de contournement de l'isolation superhydrophobe sèche.....	53
V. 3. 2 Nombre de gouttes et leur position par rapport aux électrodes.....	54
V. 3. 3 Type d'arrangement de gouttes d'eau.....	56
V. 3. 4 Volume des gouttes d'eau.....	61
V. 3. 5 Conductivité électrique des gouttes d'eau.....	63
V. 3. 6 Masse du kaolin mélangé aux gouttes d'eau.....	66
V. 3. 7 Géométrie des électrodes haute tension et terre.....	68
V. 4 Conclusion.....	69
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>70</b>

**I. Liste des figures**

Fig. I. 1: Feuille de lotus	03
Fig. I. 2: Force d'attraction	04
Fig. I. 3: circuit électrique	10
Fig. I. 4: Représentation de l'angle de contact à l'équilibre	10
Fig. I. 5: 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)	12
Fig. II. 1: Plaque en silicone recouverte de gouttes d'eau en lignes droites et dispositif de variation de l'angle de son inclinaison par rapport à l'horizontale	17
Fig. II. 2: Schémas de mesure de tension continue positive de contournement de l'isolation et de visualisation de la décharge électrique se développant sur celle-ci	17
Fig. II. 3: $U_{DC+} = f(N_r, L_{dd}, L_{de}, l_{rr})$ pour une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ( $V_d = 45 \mu\text{l}$ , $\alpha = 0^\circ$ )	18
Fig. II. 4: $U_{DC+} = f(\alpha, V_d)$ pour une isolation en silicone hydrophobe ( $N_r = 5$ rangées, $l_{rr} = L_{de} = L_{dd} = 10 \text{ mm}$ , $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ )	19
Fig. II. 5: Contournement d'une isolation en silicone hydrophobe sous inclinaison critique	20
Fig. II. 6: Modèle expérimental et Arrangement en zigzag d'un multiple de rangées de gouttes d'eau sur l'isolation en silicone	21
Fig. II. 7: Dispositif permettant la variation de l'angle de l'inclinaison de l'isolation en silicone	22
Fig. II. 8: Schémas de mesure de la tension continue de contournement de l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface	22
Fig. II. 9: $U_{DC+} = f(N_r)$ de gouttes d'eau recouvrant une isolation en silicone ( $\alpha = 0^\circ$ , $V_d = 45 \mu\text{l}$ )	23
Fig. II. 10: Chemin emprunté par la décharge de contournement en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface en silicone (Arrangement en zigzag, $N_r = 5$ , $\alpha = 0^\circ$ )	23
Fig. II. 11: Dispositif permettant l'accumulation d'eau sur la surface de l'isolation en silicone située au voisinage de l'électrode terre	24
Fig. II. 12: $U_{DC+} = f(\alpha)$ d'une isolation en silicone avec ou sans accumulation de gouttes d'eau au niveau de sa surface proche de l'électrode à la terre	24
Fig. II. 13: l'image de microscopie électronique à balayage et hydrophobie des surfaces de caoutchouc de silicone : a) commune b) superhydrophobe c) vue	25
Fig. II. 14: Tension de contournement sur chaque surface pour différents liquides	26

Fig. II. 15: le comportement dynamique d'une gouttelette et phénomène d'embrassent associé sur différents surfaces	26
Fig. III. 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS	31
Fig. III. 2: Phases de contournement d'une surface hydrophile plan-plan polluée sous tension continue positive	33
Fig. III. 3: Phases de contournement d'une surface non uniformément contaminée de l'isolation ( $L_p = 12$ cm, $L_l = 6$ cm avec $\sigma_l = 100$ $\mu$ S/cm et $L_h = 6$ cm avec $\sigma_h = 30$ $\sigma_l = 3000$ $\mu$ S/cm)	34
Fig. III. 4: Phases de développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante sous pollution non uniforme ( $L_p = 24$ cm, $L_l = 8$ cm avec $\sigma_l = 50$ $\mu$ S/cm et $L_h = 16$ cm avec $\sigma_h = 100$ $\sigma_l = 5\ 000$ $\mu$ S/cm)	35
Fig. III. 3: Phases de contournement d'une surface non uniformément contaminée de l'isolation ( $L_p = 12$ cm, $L_l = 6$ cm avec $\sigma_l = 100$ $\mu$ S/cm et $L_h = 6$ cm avec $\sigma_h = 30$ $\sigma_l = 3000$ $\mu$ S/cm)	35
Fig. III. 6: Chemin emprunté par la décharge de contournement en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface en silicone (Arrangement en zigzag, $N_r = 5$ , $\alpha = 0^\circ$ )	36
Fig. III. 7: le comportement dynamique d'une gouttelette et phénomène d'embrassent associé sur différents surfaces	37
Fig. IV. 1: Vue générale du dispositif	41
Fig. IV. 2 : Icône de l'AUTOMGEN 8	42
Fig. IV. 3: image sur model de programme	42
Fig. IV. 4 : page d'accueil de logiciel automgène	43
Fig. IV. 5 : Drop Shape Analyzer – DSA100	45
Fig. IV. 6: The picoliter dosing systems	46
Fig. IV. 7: DS3202	46
Fig. IV.8: DS3228	47
Fig.IV.9: DS3210	47
Fig.IV.10: DO3241	47
Fig. V.1: Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe	49
Fig. V.2: Micropipette de mesure de volume de gouttes d'eau graduée de 0 à 50 $\mu$ l	50
Fig. V.3: Angle de contact en fonction du volume d'une goutte d'eau	51
Fig.V.4 : Angle de contact d'une goutte d'eau posé sur une surface superhydrophobe	51
Fig. V. 5: Systèmes d'électrodes utilisées	52
Fig. V. 6: Types d'arrangements de gouttes d'eau ligne droite et zigzag	53

Fig. V. 7: Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes	53
Fig. V. 8: Etat neuf et dégradé de la surface superhydrophobe délimité par les électrodes pleines et à dents	54
Fig. V. 9: Tension d'expulsion de la goutte d'eau en fonction de sa position sur la surface interélectrode	54
Fig. V. 10: Différentes étapes de déplacement d'une goutte d'eau sur la surface interélectrode	55
Fig. V. 11: Tension d'expulsion séparément des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la surface interélectrode	56
Fig. V. 12: Tension d'expulsion simultanément des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la surface interélectrode	56
Fig. V. 13: Tension d'expulsion de trois gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation	57
Fig. V. 14: Tension d'expulsion de quatre gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation	57
Fig. V. 15 : Phases essentielles de déplacement de quatre gouttes d'eau sur la ligne de fuite d'une isolation superhydrophobe	58
Fig. IV. 16: 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	59
Fig. V. 17: Tension continue positive d'expulsion de gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites déposées sur l'isolation superhydrophobe	59
Fig. V. 18: Etape essentielle d'expulsion des gouttes d'eau déposées en ligne droite sur l'isolation superhydrophobe	60
Fig. V. 19: Tension continue positive d'expulsion de gouttes d'eau sous arrangement en lignes zigzags déposées sur l'isolation superhydrophobe	60
Fig. V. 20 : Etape essentielle d'expulsion des gouttes d'eau déposées en ligne zigzag sur l'isolation superhydrophobe	61
Fig. V. 21: Tension continue positive d'expulsion en fonction du volume des gouttes d'eau déposée sur la surface de l'isolation superhydrophobe	61
Fig. V. 22: Tension d'expulsion des gouttes en fonction du nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_g=40\mu\text{l}$ )	62
Fig. V. 23: Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau de $40\mu\text{l}$ déposées sur l'isolation superhydrophobe	62
Fig. V. 24: Tension d'expulsion en fonction du nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_g=60\mu\text{l}$ )	63
Fig. IV. 25: Tension continue positive d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe	64
Fig. V. 26: Tension d'expulsion des gouttes en fonction du nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $C=0.5\text{mS/cm}$ , $V_g=40\mu\text{l}$ )	64

Fig. V. 27: Etape essentielle d'expulsion des gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe	65
Fig. V. 28: Tension d'expulsion en fonction de nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $C=10\text{mS/cm}$ , $V_g=40\mu\text{l}$ )	65
Fig. IV. 29: Tension d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe	66
Fig. V. 30: Tension continue positive d'expulsion des gouttes de la masse du kaolin d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe	66
Fig. V. 31: Tension continue positive d'expulsion en fonction des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe	67
Fig. V. 32: Etape essentielle d'expulsion des gouttes d'eau de la masse du kaolin déposées sur l'isolation superhydrophobe	67
Fig. V. 33: Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes pleines	68
Fig. V. 34: Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes à dents	68

## II. liste des tableaux

<b>Tableau. I. 1:</b> Matériaux naturels (Animaux, oiseaux et autres)	05
<b>Tableau. I. 2:</b> Exemples d'applications	13
<b>Tableau. IV. 1:</b> Variables utilisées	43
<b>Tableau. V. 1:</b> Valeurs de la tension de contournement de la surface superhydrophobe isolant sèche en fonction de la nature des électrodes HT et terre	54

## Introduction générale

La superhydrophobie est un terrain très prometteur qui mérite d'être approfondi afin de créer de nouvelles applications qui pourront améliorer notre sécurité. Son intégration dans le domaine du transport d'énergie électrique est fortement souhaitable suite aux conséquences négatives apparues sur des isolations de protection hydrophiles et hydrophobes, dues à la pollution atmosphérique. Or, à notre connaissance, il existe très peu de recherche sur la performance électrique des isolations superhydrophobes sous tension continue positive. Suite à cette constatation le but recherché à travers ce présent travail consiste en étude expérimental 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 cinq 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 fabrications de matériaux superhydrophobes ainsi que les domaines essentiels d'applications de ces types de matériaux.

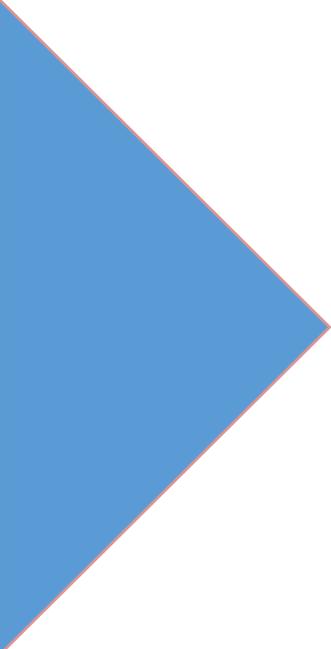
Dans le deuxième chapitre nous ferons l'analyse des travaux de recherches réalisés sur la performance électrique des surfaces superhydrophobes sous tension continue positive.

Nous évoquons dans le troisième chapitre le phénomène de pollution, sa caractérisation, sa simulation, ses effets néfastes sur les équipements électriques ainsi que les diverses méthodes de lutte contre celle-ci.

Dans le quatrième chapitre nous ferons une proposition d'un dispositif automatique de dépôt de goutte d'eau sur une surface superhydrophobe et nous donnerons les avantages et les inconvénients de son application.

Dans le dernier chapitre nous présenterons dans un premier temps la technique et le type de surface superhydrophobe conçue et réalisée par nos propres soins. Dans un seconde temps nous exploitons les surfaces confectionnées pour la quantification de l'effet de quelque paramètre géométrique et électrique de gouttes d'eau sur l'allure de la tension continue positive de leur expulsion de telles surfaces et la visualisation du mode de leur évacuation.

Enfin nous terminons par une conclusion générale.



# CHAPITRE I

**Matériaux hydrophiles, hydrophobes  
et superhydrophobes**

## I. 1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une étude du phénomène superhydrophobe. Cette étude commence tout d'abord par les différents types de surfaces (hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe). Pour définir ces surfaces il faut connaître la force de Vander Waals et la tension superficielle. Il fallait étudier les propriétés électriques pour qu'on puisse connaître le degré de la superhydrophobicité en utilisant l'angle de contact. Par la suite nous citerons les paramètres qui exercent une influence sur la surface considérée (la rigidité longitudinale, la résistivité superficielle et le facteur de pertes). Ce type de surface est appliquée dans le domaine industriel ou en dehors. La superhydrophobie offre beaucoup d'avantages à exploiter à court ou à long terme. Donc en final nous pouvons dire que l'étude des matériaux est un travail qui nécessite une bonne connaissance des surfaces isolantes afin de bien prédire son comportement.

## I. 2 Définitions et significations

### I. 2. 1 Hydrophilie [1]

L'Hydrophilie 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. La cellulose (coton), très hydrophile, est insoluble dans la plupart des solvants du fait de sa forte cohésion. Le savon, amphiphile, se dissout à la fois dans l'eau et l'huile, ce qui explique son pouvoir détergent. Un composé hydrophile est typiquement polaire. Cela lui permet de créer des liaisons hydrogène avec l'eau ou un solvant polaire. Il renferme au moins un groupe fonctionnel tel une amine, un alcool ou une cétone, Certaines molécules hydrophiles ne se dissolvent pas, elles peuvent former un colloïde.

### I. 2. 2 Hydrophobicité [1]

L'Hydrophobicité caractérise les surfaces qui repoussent l'eau, plus généralement, c'est une propriété d'un objet moléculaire de ne pas être soluble dans l'eau ni dans les produits polaires, menant à une ségrégation de l'objet vis-à-vis du solvant (ou inversement). Des molécules comme les alcanes. À l'échelle des atomes, une molécule hydrophobe ne fait pas de liaison avec l'eau, molécule polaire. Elle n'est donc pas soluble dans l'eau, ce qui fait que les deux composés se repoussent. Une goutte d'eau posée sur une surface hydrophile n'est pas bombée, c'est-à-dire qu'elle a un angle de contact inférieur à l'angle droit. Plus la goutte est repoussée par la surface et prend la forme d'une sphère, plus cette surface est hydrophobe.

### I. 2. 3 Superhydrophobicité [1]

La Superhydrophobicité est une surface extrêmement difficile à mouiller (avec l'eau, et a priori avec n'importe quel liquide). Elle est décrite par la loi de Cassie, selon laquelle un angle de contact supérieur à  $150^\circ$  ne permet pas à l'eau d'accrocher. C'est la nature qui offre des exemples remarquables de surfaces superhydrophobes, notamment les feuilles de lotus sur lesquelles l'eau ruisselle sans jamais les mouiller.

Les surfaces superhydrophobes sont en fait des surfaces à revêtement nanométrique comme celles du Lotus (Fig.I.1). Un revêtement nanométrique est caractérisé par sa rugosité, on dit que c'est une rugosité nanométrique.



**Fig. I. 1:** Feuille de lotus

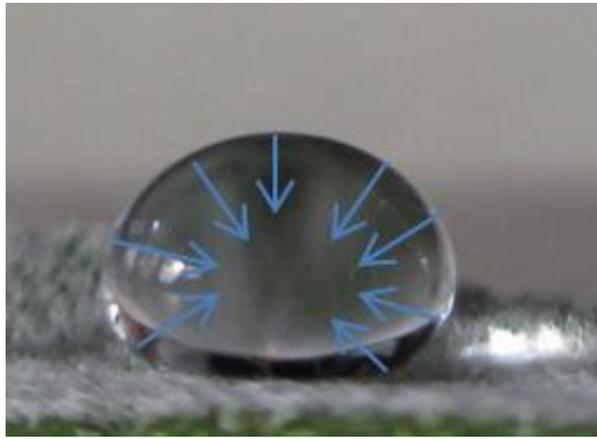
### I. 2. 4 Mouillabilité [2]

Les propriétés de mouillabilité avec l'eau des surfaces (métaux, alliages, oxydes, etc.) sont évaluées par les mesures d'angle de contact que fait une goutte d'eau sur la surface. Lorsque l'angle de contact est inférieur à  $90^\circ$  la surface est appelée hydrophile (aimant l'eau) et pour un angle supérieur à  $90^\circ$  la surface est dite hydrophobe (repoussant l'eau).

Récemment, deux nouveaux termes ont été proposés afin de décrire les surfaces : superhydrophiles et superhydrophobes. Lorsque l'angle de contact est près de  $0^\circ$  et que le mouillage est presque parfait, où l'eau s'étend complètement formant une mince couche, la surface est décrite comme étant superhydrophile. Inversement, lorsque l'angle de contact sur la surface est plus grand que  $150^\circ$  et que le mouillage est faible ou nul, elle est appelée superhydrophobe. Les propriétés de non-mouillabilité ou superhydrophobes sont couramment observées sur les surfaces des corps de la nature, comme les plantes ou les insectes. Un des exemples communément cités est la feuille de lotus.

### I. 2. 5 Force de Van der Waals [3]

Les liquides sont caractérisés par des forces d'attraction de courte portée entre molécules appelées forces de Van der Waals. À 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'attraction 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 forme demi-sphérique, voir sphérique d'une goutte sur une surface, comme le montre la Fig.I.2.



**Fig. I. 2:** Force de Van der Waals

### I. 2. 6 Tension superficielle [1]

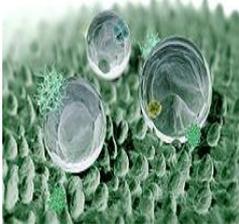
La tension superficielle est une force qui s'exerce à la limite entre deux milieux différents en raison des forces d'attraction et de répulsion des molécules. Au sein du liquide, ces forces s'annulent mais à la surface de celui-ci, ce n'est plus le cas. Elles créent alors la forme bombée que l'on peut observer à la surface de l'eau. C'est également elle qui donne la forme d'une goutte à l'eau lorsqu'elle est dans un milieu gazeux, cette force contraint l'eau à n'avoir qu'une petite surface de contact, la forme d'une sphère est alors privilégiée car c'est la forme qui possède la plus petite surface de contact.

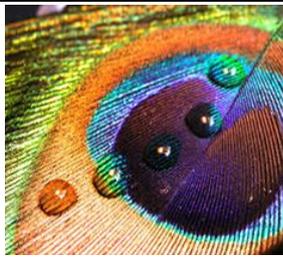
La forte tension superficielle de l'eau fait que l'angle de contact dépasse pratiquement toujours les  $90^\circ$  lorsqu'aucune force de cohésion n'intervient entre l'eau et son milieu.

## I. 3 Différents types de matériaux [1], [2]

## 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	Photos	Caractéristique	Photos Microscope
Plantes	<math>150^\circ</math>	Super hydrophobe	Lotus		L'effet lotus est dû à la présence de micro et nano-structures rugueuses	
	79°	Hydrophobe	Plante grasse, Crassula		Pas de trichome Pellicule, probablement de la cire	
	41°	Hydrophobe	Geranium		Trichomes très espacés couleur terne	

Type de matériau	Valeur de l'angle	Type de surface	Exemple	Photos
animaux	$<150^\circ$	Super hydrophobe	Canard	
	$58^\circ$	Hydrophile	Ecaille de poisson	
	$170^\circ$	Hydrophobe	Plume de paon	

**Tableau 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 micrométriques 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. Toutefois, 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.

#### I. 3. 2. 1 Dépôt par bain chimique

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**

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**

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, certains composés sont déposés sur les 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**

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**

Le procédé de photolithographie est un procédé 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, toute fois il permet d'obtenir des topographies continues.

### **I. 3. 2. 6 Techniques utilisant le plasma**

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 [3,4]**

### **I. 4. 1 Propriétés électriques**

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.

La propriété de conduction de l'électricité, ou son contraire, est essentielle pour de très nombreuses réalisations industrielles. Les applications sont bien connues : transport de l'énergie électrique, chauffage, mais aussi phénomènes variés dans les circuits « électroniques ».

Les caractéristiques électriques essentielles des matériaux isolants sont :

Rigidité diélectrique, permittivité relative, facteur de pertes diélectriques, résistivité électrique, décharges partielles ou claquage.

Mais les propriétés diélectriques importantes concernant le matériau utilisé dans notre étude se rapportent à la rigidité diélectrique longitudinale, résistivité superficielle, et facteur de pertes.

#### **I. 4. 1. 1 Rigidité diélectrique longitudinale (RDL)**

La rigidité longitudinale dépend peu de la nature de l'isolant, mais beaucoup plus de son état de sécheresse et de propreté. En effet, dans la plupart des cas, l'amorçage de l'espace entre les deux conducteurs se produit d'abord dans le milieu ambiant au voisinage de la surface du solide. Ce n'est que dans certains cas, par exemple celui de matériaux ayant subi une immersion

prolongée dans l'eau que l'amorçage intéresse réellement l'isolant et provoque une destruction réelle de sa surface le rendant inapte à supporter de nouvelles contraintes.

#### **I. 4. 1. 2 Résistivité superficielle**

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

Dans les matériaux électroniques l'isolement principal entre deux conducteurs est assuré par la surface de l'isolant, d'où l'importance pratique de la détermination de la résistance longitudinale, cette résistance comporte d'une part la résistance purement superficielle, mais aussi une certaine fraction de la résistance interne du matériau. Les valeurs relatives de ces deux composantes de la résistance sont fonction de divers paramètres et notamment de la largeur et de l'écartement entre conducteurs ainsi que de l'état d'humidification respectif des couches superficielles et internes du matériau.

Par définition, la résistance superficielle est le quotient de la tension continue appliqué entre les deux électrodes disposées à la surface de l'isolant par le courant qui en résulte. La résistivité superficielle est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

#### **I. 4. 1. 3 Facteur de pertes ( $\text{tg}\delta$ )**

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Fig. I. 3). Le courant total traversant l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle  $\varphi < \pi/2$ . Son complément  $\delta$  est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle  $\text{tg}\delta$  est appelée facteur de dissipation (ou de pertes).

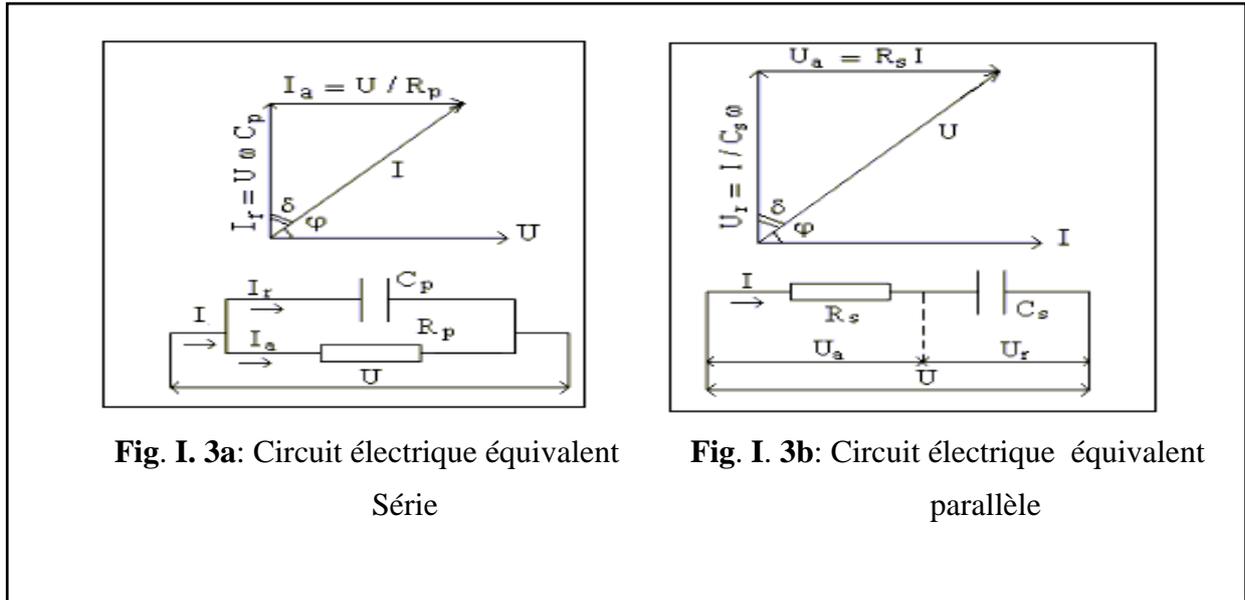


Fig. I.3: circuit électrique

**I. 4. 2 Propriétés particulières [5]**

**I. 4. 2. 1 Angle de contact**

**I. 4. 2. 1. 1 Définition**

l'angle de contact 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. 4). Sa valeur d'équilibre se calcule par la loi de Young-Dupré reliant les énergies de surface.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \tag{I. 1}$$

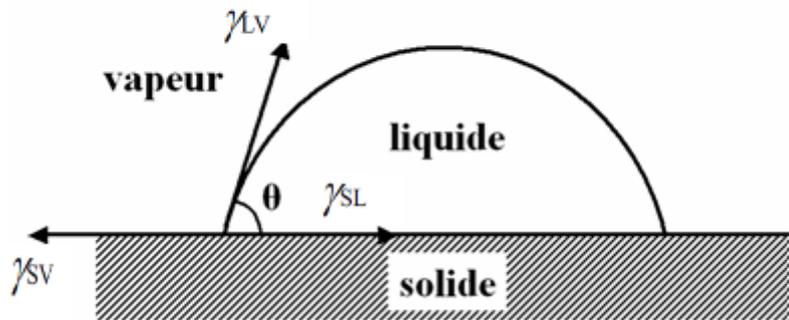


Fig. I. 4: Représentation de l'angle de contact à l'équilibre

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

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

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

#### I. 4. 2. 1. 2 Modèles de Wenzel et de Cassie-Baxter

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.

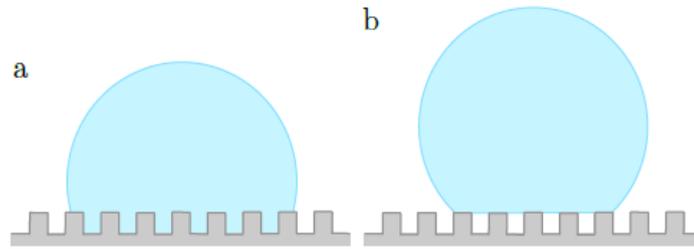
**Selon Wenzel (1936)** : suppose que la goutte posée épouse la rugosité du solide Fig. I.5(a), Cela revient à considérer que les énergies en jeu pour les surfaces solide/vapeur et solide/liquide sont  $r\gamma_{SV}$  et  $r\gamma_{SL}$ , en notant  $r$  la rugosité, rapport de la surface réelle du matériau 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  $\theta$ .

La relation de Wenzel est la suivante:

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

**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.5(b), 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  $\phi_s$  de surface occupée par le sommet des créneaux, et l'air sur la fraction  $(1 - \phi_s)$ , 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 :

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



**Fig. I. 5 :** 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. 5 Paramètres d'influence [3]

### I. 5. 1 Rigidité superficielle

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

Si les électrodes ne déterminent pas dans le solide un champ uniforme, le champ moyen de rupture sera inférieur au champ uniforme que pourrait supporter ce solide (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 disruptives est liée au rôle des décharges dans le milieu ambiant. C'est également au voisinage des bords des électrodes que celle-ci ont la plus grande probabilité de se produire. D'où la nécessité de préciser les rayons de courbure des électrodes.

Par ailleurs, une augmentation de la surface des électrodes conduit généralement à une diminution de la tension disruptive compte tenu de la probabilité accrue, qu'un défaut de la matière se trouve dans la zone intéressée par le champ.

#### I. 5. 1. 2 Géométrie des éprouvettes

La tension disruptive en fonction de l'épaisseur 'd' du matériau.

En conséquence, une valeur de rigidité diélectrique ne peut caractériser un matériau que si sa mention est faite de l'épaisseur sous laquelle a été effectuée la mesure.

La surface de l'éprouvette n'est pas un paramètre affectant la rigidité diélectrique, mais il convient qu'elle soit suffisamment grande pour éviter les contournements qui nécessitent de reprendre les mesures, ce qui conduit à une fatigue supplémentaire du matériau.

### **I. 5. 1. 3 Température**

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, La température de transition délimite en fait deux zones dans lesquelles les mécanismes de perforation sont différents :

- Au-dessus de cette transition, la diminution brusque est attribuée à l'augmentation rapide de la conduction par suite des collisions des électrons.

- En dessous de la température de transition, le comportement est différent suivant que les matériaux sont polaires ou apolaires :

- pour une structure polaire, la décroissance de la température due à la diminution du libre parcours moyen des électrons entraîne l'augmentation de la rigidité diélectrique.
- la rigidité diélectrique des matériaux apolaires est indépendante de la température.

### **I. 5. 1. 4 Nature de la tension**

Généralement la tension disruptive décroît, lorsque l'on passe de l'impulsion au continu et du continu à l'alternatif.

### **I. 5. 1. 5 Durée d'application de la tension**

La tension de rupture 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 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 inférieur 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 [1]

Domaine d'application	Photo	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 marin pour les langoustes
		Les verres autonettoyants	Grâce à celle-ci, la surface de contact, et avec elle la force d'adhérence entre surface et eau ou particules de saleté, est si réduite que cela aboutit à un autonettoyage
		Sprays	Permet de rendre superhydrophobes des surfaces, tel du béton, du bois, ou encore du métal, des tissus, et même des composants électroniques, le spray permettant de rendre étanche des smartphones par exemple

Tab. I. 2: Exemples d'applications

## **I. 7 Avantages et inconvénients [1]**

### **I. 7. 1 Inconvénients**

Comme nous venons de le voir, dans la plupart des produits utilisant le phénomène hydrophobe, les nanotechnologies sont au cœur de l'innovation. Les sprays hydrophobes, les peintures autonettoyantes (qui utilisent le  $\text{TiO}_2$ ), 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.

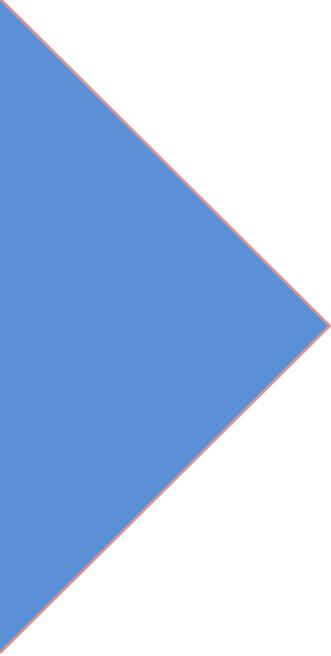
### **I. 7. 2 Avantages**

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 Conclusion**

L'objectif de ce chapitre est de présenter un aperçu sur les surfaces isolantes utilisées dans le domaine électrique d'où en a choisis de travailler sur la surface superhydrophobe.

Vue l'importance de la surface superhydrophobe on s'intéressera dans les chapitres suivants à l'application de cette dernière.



# CHAPITRE II

**Etat d'art sur la performance des surfaces  
isolantes superhydrophiles à  
superhydrophobes sous tension continue  
positive**

## II. 1 Introduction

L'influence des types de surfaces hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe dans le domaine électrique, se développe de jour en jour avec plusieurs méthodes qui sont de plus en plus aboutis et proposent un ensemble d'outils pour les prendre en charge.

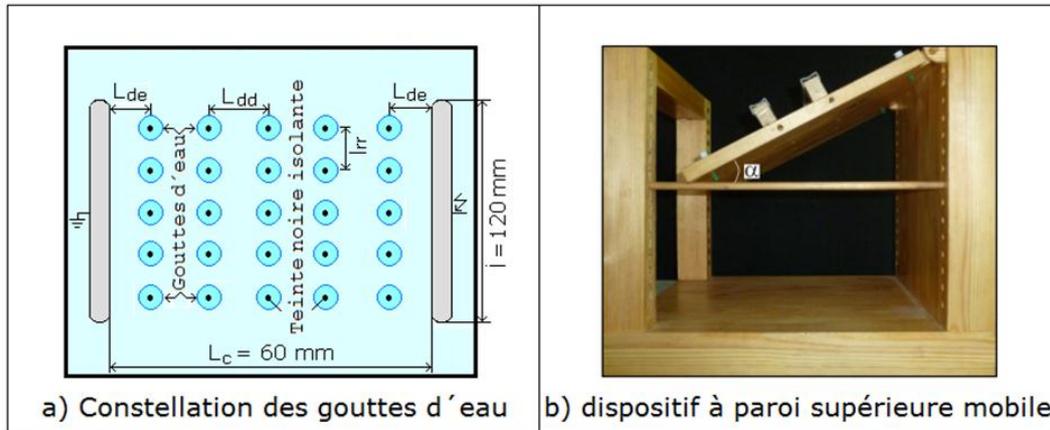
Plusieurs investigations ont été menées pour l'étude du comportement électrique d'une isolation superhydrophobe sous l'impact de goutte d'eau et tension continu positive. Nous présenterons par ordre de types de surfaces certaines d'entre elles suivant les noms des chercheurs.

## II. 2 Performance électrique d'une surface isolante hydrophobe

### II. 2. 1 Constellation des gouttes d'eau en lignes droites [6]

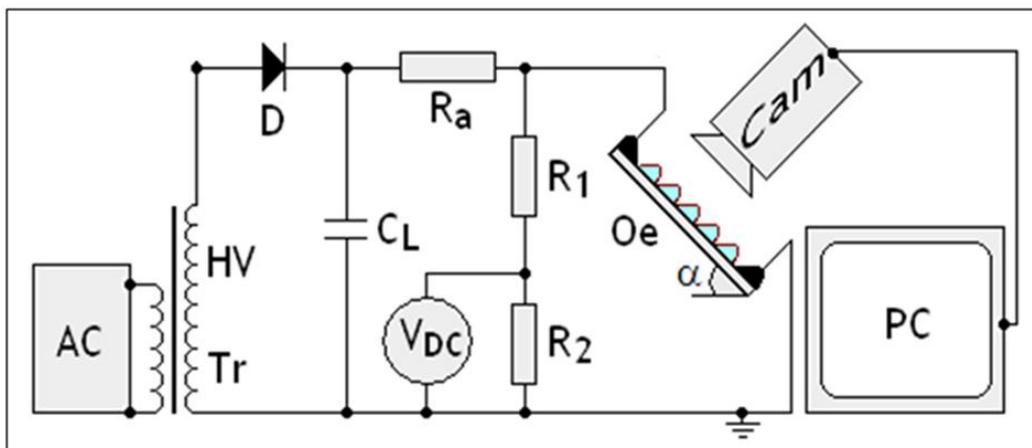
Boudissa et all se sont intéressés à l'étude de l'effet de l'angle d'inclinaison sur la performance électrique d'une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau disposées en ligne droite et mise sous tension continue positive. Le modèle expérimental utilisé par les chercheurs est illustré par la figure II.1a. Celui-ci correspond à une surface en silicone parallélépipédique délimitée par une géométrie d'électrodes planes à champ électrique quasi uniforme. Celle-ci est constituée d'une plaque en silicone de dimensions 130 mm x 120 mm x 6 mm, sur laquelle sont posées les deux électrodes en fer pleines de forme cylindrique, dont l'une est reliée à la terre et l'autre à la haute tension. La largeur  $l$  des électrodes pleines est de 120 mm, leur diamètre  $\phi_e$  est de 30 mm et arrondies à leur extrémités de telle sorte à ce que leur rayon de courbure soit égal à 15 mm. La ligne de fuite totale de l'isolation entre les électrodes de base  $L_c$  est fixée à 60 mm tout au long des divers essais effectués.

La variation de l'angle d'inclinaison de la surface isolante par rapport à l'horizontale  $\alpha$  est obtenue au moyen d'un dispositif illustré par la figure II.1b. Celui-ci se rapporte à un support confectionné en bois, de 500 mm x 500 mm x 400 mm de dimensions. Il est peint de plusieurs couches de vernis afin de l'empêcher d'absorber les gouttes d'eau atterrissant sur celui-ci à la fin de chaque essai. Sa paroi supérieure est reliée à une rotule lui permettant de passer de la position horizontale ( $\alpha = 0^\circ$ ) à la position verticale ( $\alpha = 90^\circ$ ). La fixation d'un angle d'inclinaison quelconque peut être obtenue au moyen de deux tiges passant par des trous appropriés, réalisés spécialement sur ses deux faces verticales opposées afin de bloquer la paroi à une position correspondant à l'angle suscitée (Figure II.1b).



**Fig. II. 1:** Plaque en silicone recouverte de gouttes d'eau en lignes droites et dispositif de variation de l'angle de son inclinaison par rapport à l'horizontale

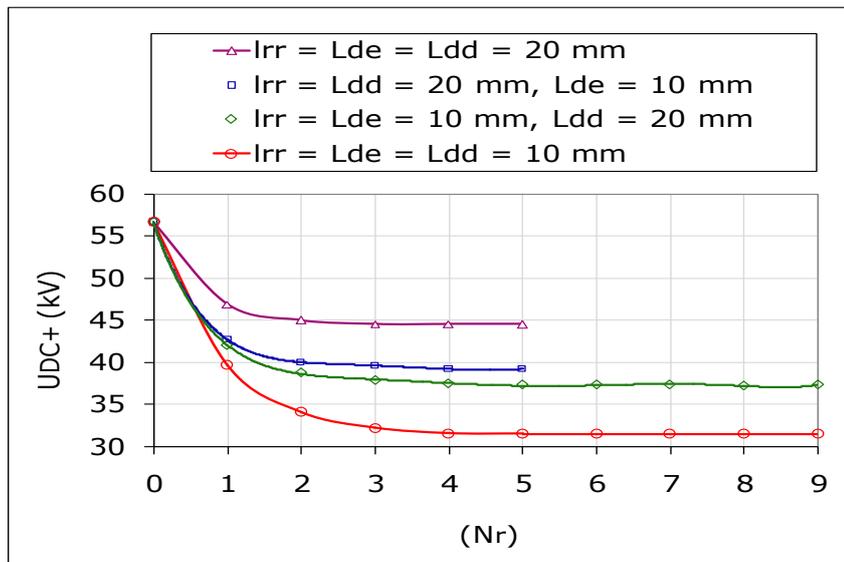
Le circuit de mesure de la tension de contournement de l'isolation est constitué d'un transformateur haute tension (0.08 A / 135 kV) (Figure II. 2) relié au moyen de la diode D en connexion directe à la résistance d'affaiblissement de courant  $R_a$  en dérivation avec le condensateur de lissage  $C_L$  (10 nF). Le branchement de l'objet d'essai (Oe) a été effectué aux bornes du diviseur de tension résistif ( $R_1/R_2$ ) et le voltmètre de crête  $V_{DC}$  aux extrémités de la résistance de mesure  $R_2$ . Le circuit de visualisation comprend une caméra rapide (Cam) à 10000 Frames/s pour l'enregistrement des différentes phases de développement de la décharge électrique évoluant sur la surface hydrophobe recouverte de gouttes d'eau en fonction de l'angle de son inclinaison et un PC pour le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Vidéo studio 11.



**Fig. II. 2:** Schémas de mesure de tension continue positive de contournement de l'isolation et de visualisation de la décharge électrique se développant sur celle-ci

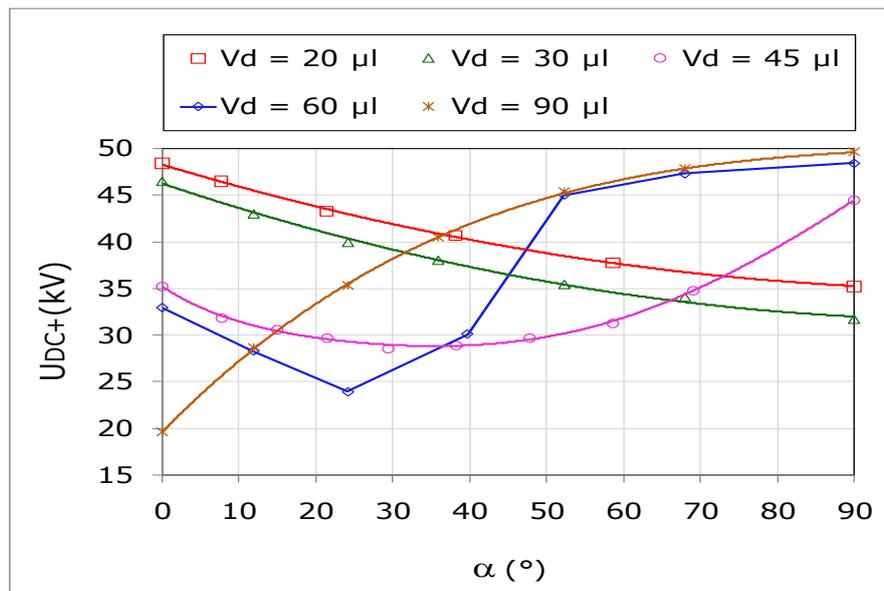
Les valeurs du volume des gouttes d'eau, choisies dans le cadre de cette étude, sont prises égales à 20, 30, 45, 60 et 90  $\mu\text{l}$ . Les valeurs de la conductivité électrique des gouttes d'eau retenues dans cette étude sont respectivement de 180  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 10  $\text{mS}/\text{cm}$ . Les rangées de gouttes sont disposées en ligne droite. Leur point d'impact sur la surface de l'isolation a été repéré au préalable à l'aide d'une teinte bleue isolante.

Les résultats de l'effet du nombre de rangées de gouttes d'eau, de volume égal à 45  $\mu\text{l}$  et recouvrant la surface en silicone en position horizontale, sont illustrés par la figure II.3.



**Fig. II. 3:**  $U_{DC+} = f(N_r, L_{dd}, L_{de}, l_{rr})$  pour une isolation en silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau ( $V_d = 45 \mu\text{l}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

Il résulte de la figure II.3 un déclin rapide de la tension de contournement du matériau à partir d'une valeur correspondant à l'absence de gouttelettes d'eau sur la surface de ce dernier jusqu'à une valeur limite du nombre de rangées de gouttes d'eau a été constaté. A partir de ce nombre limite, elle demeure constante indépendamment du nombre de rangées supplémentaires ajoutées sur la largeur de celle-ci.

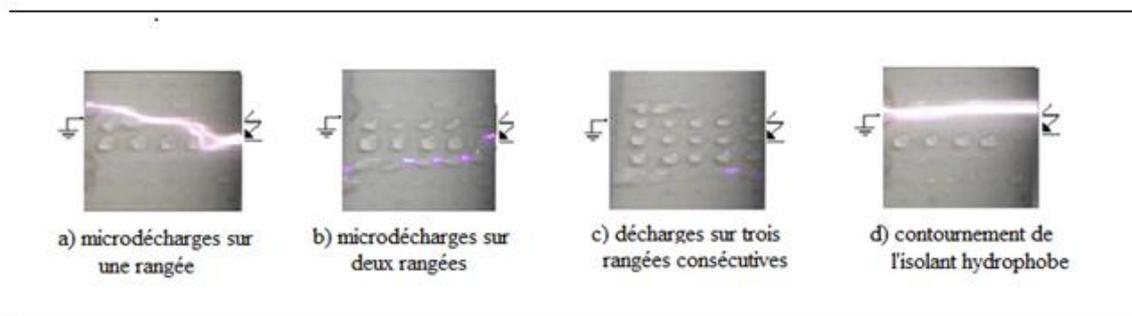


**Fig. II. 4:**  $U_{DC+} = f(\alpha, V_d)$  pour une isolation en silicone hydrophobe ( $N_r = 5$  rangées,  $l_{rr} = L_{de} = L_{dd} = 10$  mm,  $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ )

Les auteurs ont étudié aussi l'évolution de la tension continue de contournement en fonction de l'angle d'inclinaison d'une surface isolante hydrophobe recouverte de cinq rangées de gouttes d'eau, ayant une conductivité électrique égale à  $180 \mu\text{S/cm}$  et une taille variable, est illustrée par la figure II. 4. Les résultats de l'effet simultané de ces deux paramètres peuvent être résumés comme suit:

- Existence d'un couple de valeurs de ces deux paramètres pour lesquelles la caractéristique du matériau,  $U_{DC} = f(\alpha)$ , présente un minimum. La plus faible valeur de la performance enregistrée dans cette étude est obtenue sur une isolation en silicone hydrophobe en position horizontale et recouverte de grosses gouttes d'eau à faible conductivité électrique. La chute totale de celle-ci s'élève à 69 % dans ce cas.
- De plus, les auteurs ont remarqué qu'une élévation de la conductivité électrique des gouttes d'eau peut générer une chute supplémentaire de la performance de l'isolation de l'ordre de 12 %, de telle sorte que la diminution totale de celle-ci peut atteindre 82 % sous conditions de forte pollution humide.
- Les résultats des auteurs émanant de cette étude montrent aussi que pour une inclinaison des ailettes des isolateurs en polymères supérieure ou égale à  $50^\circ$ , peut maintenir leur performance électrique suffisamment élevée de telle sorte que sa chute totale par rapport au cas d'une atmosphère propre et sèche ne dépasse guère 15 %. Si de plus le rapport des volumes des petites et grandes gouttes d'eau est très inférieur à l'unité et le pourcentage des minuscules gouttes est

très élevé, il faudra s'attendre à ce que l'écart de performance de l'isolation par rapport au cas d'une atmosphère propre et sèche soit plus réduit encore.



**Fig. II. 5:** Contournement d'une isolation en silicone hydrophobe sous inclinaison critique

$$( V_d = 45 \text{ kV}, \sigma_v = 180 \text{ } \mu\text{S/cm}, \alpha_{cr} = 40^\circ )$$

La figure II.5 illustre le contournement d'une surface isolante inclinée et recouverte de gouttes d'eau. Celui-ci est subordonné à une évolution successive de la décharge électrique pratiquement sur la largeur totale occupée par les cinq rangées pour provoquer finalement le court-circuit de l'isolation. Ce phénomène diffère évidemment de celui engendrant le contournement de la même isolation avec gouttes d'eau en position horizontale.

Avant l'application de la tension, la première déformation des gouttes d'eau est d'abord engendrée par l'action de leur propre poids et la force de frottement. Sous l'effet de la contrainte de tension, celles-ci continuent à se déformer et à se mouvoir en direction de l'électrode mise à la terre. Pendant ce mouvement, les gouttes proches de l'électrode sous tension, plus rapides, arrivent à joindre celles, lentes et éloignées de l'électrode active. Leur jonction peut donner naissance à un filet d'eau partiel en forme d'un ver de terre à diamètre variable et dont l'extrémité en regard de l'électrode sous tension est de forme conique. A ce moment-là une décharge électrique, émanant de l'électrode haute tension, s'amorce dans l'intervalle d'air entre celle-ci et l'extrémité de ce filament et relie celui-ci au suivant (Fig. II. 5a). D'autres décharges électriques s'ensuivent en connectant entre eux les filaments d'eau subséquents (Fig. II. 5b). Généralement le filament d'eau partiel créé au voisinage de l'électrode active s'allonge vers ceux formés aux alentours de l'électrode terre.

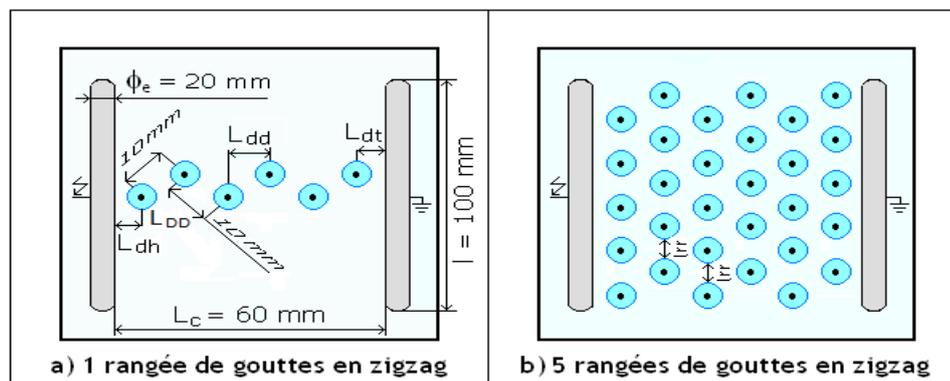
Parallèlement, la distance dans l'air séparant l'extrémité du premier filament de l'électrode active s'accroît à cause de son déplacement vers l'électrode terre du fait de sa lourdeur. L'arc électrique précurseur, brûlant au-dessus de cette zone, finit par s'éteindre pour se réallumer au

niveau d'une seule ou latéralement sur plusieurs rangées parallèles (Fig. II. 5b et c) lui offrant de par leur déformation avancée des conditions de propagation plus favorables.

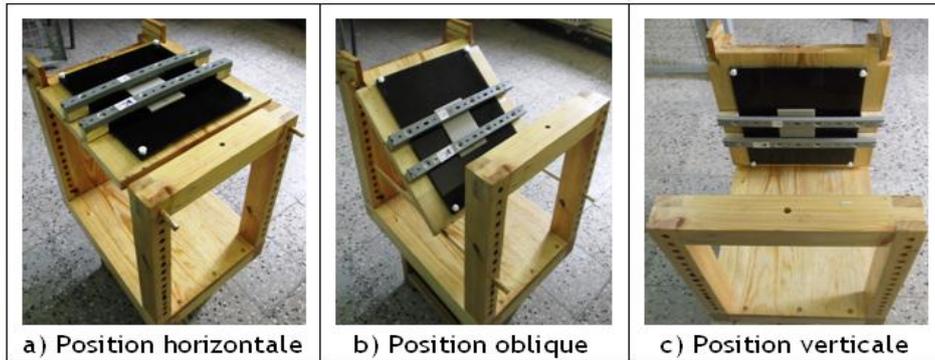
### II. 2. 2 Constellation des gouttes d'eau en lignes zigzagée [7]

Cette fois-ci, Boudissa et all ont étudié l'influence de l'angle d'inclinaison sur la performance électrique d'une isolation en silicone hydrophobe sur laquelle des gouttes d'eau ont été déposées manuellement selon un arrangement en zigzag. Le modèle expérimental utilisé par les chercheurs est décrit par la figure II.6. Celui-ci se résume à une surface en silicone parallélépipédique délimitée par une géométrie d'électrodes planes à champ électrique quasi uniforme. Celle-ci est constituée d'une plaque en silicone de dimensions 140 mm x 120 mm x 6 mm, sur laquelle sont déposées un jeu de deux électrodes en fer pleines de forme cylindrique, dont l'une est reliée à la terre et l'autre à la haute tension. La largeur  $l$  des électrodes est de 100 mm, leur diamètre  $\phi_e$  est de 20 mm et le rayon de chaque demi-sphère est égal à 10 mm. La ligne de fuite totale de l'isolation entre les électrodes de base  $L_c$  est fixée à 60 mm tout au long des divers essais effectués (Fig. II. 6).

Un support en bois, de 500 mm x 500 mm x 400 mm de dimensions, a été utilisé pour varier l'angle d'inclinaison de la surface isolante par rapport à l'horizontale  $\alpha$ (fig. II. 7). Sa paroi supérieure est reliée à une rotule lui permettant de varier l'angle d'inclinaison de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ . La fixation d'un angle d'inclinaison quelconque peut être obtenue au moyen de deux tiges passant par des trous appropriés, réalisés spécialement sur ses deux faces verticales opposées afin de bloquer la paroi à une position correspondant à l'angle suscitité (Figure II.7).

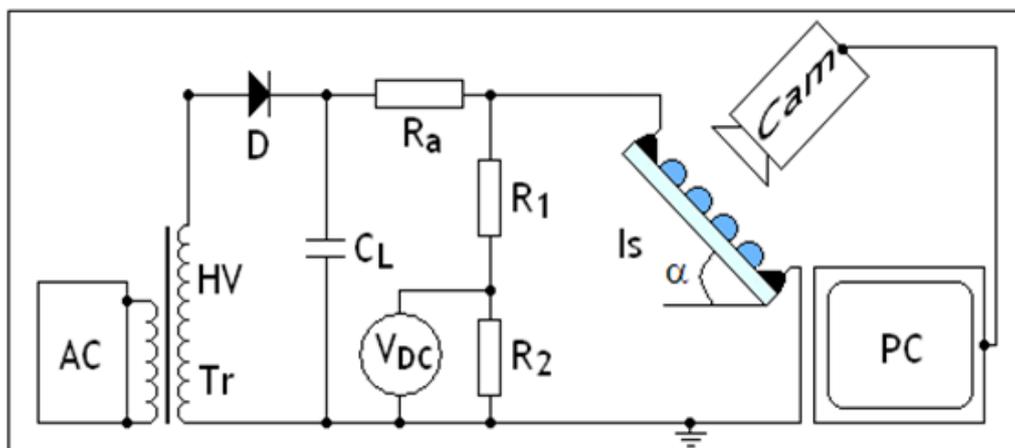


**Fig. II. 6:** Modèle expérimental et Arrangement en zigzag d'un multiple de rangées de gouttes d'eau sur l'isolation en silicone

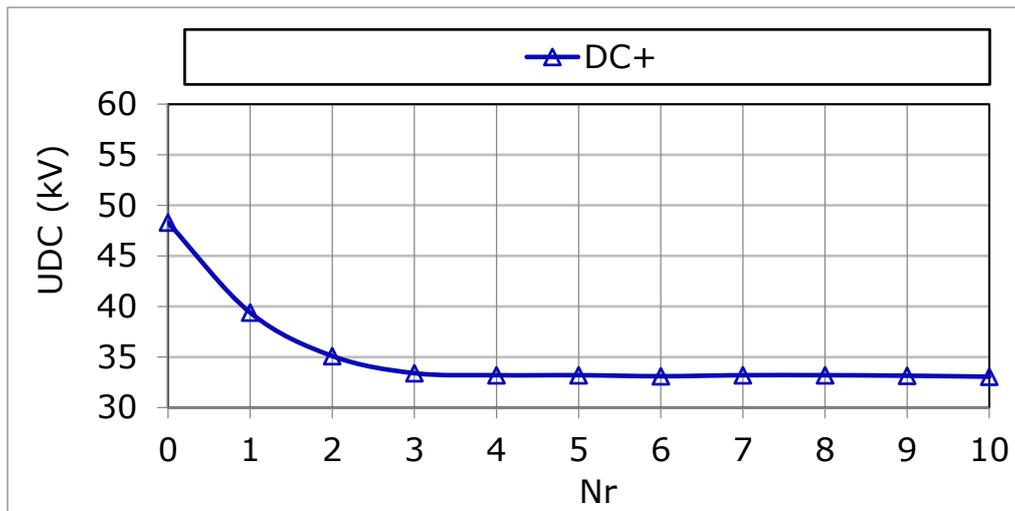


**Fig. II. 7:** Dispositif permettant la variation de l'angle de l'inclinaison de l'isolation en silicone

La station de mesure (fig. II. 8) comprend un transformateur élévateur (220 V/135 kV) reliées au moyen de la diode D en connexion directe à la résistance d'affaiblissement de courant  $R_a$  en dérivation avec le condensateur de lissage  $C_L$  (10 nF). Le branchement de l'objet d'essai ( $O_e$ ) a été effectué aux bornes du diviseur de tension résistif ( $R_1/R_2$ ) et le voltmètre de crête  $V_{DC}$  aux extrémités de la résistance de mesure  $R_2$ . Le circuit de visualisation comprend une caméra rapide (Cam) à 10000 Frames/s pour l'enregistrement des différentes phases de développement de la décharge électrique évoluant sur la surface hydrophobe recouverte de gouttes d'eau en fonction de l'angle de son inclinaison et un PC pour le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Vidéo studio 11.



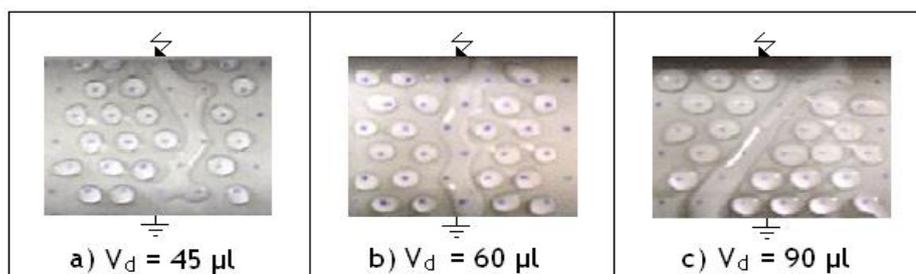
**Fig. II. 8:** Schémas de mesure de la tension continue de contournement de l'isolation et de visualisation de la décharge électrique évoluant sur sa surface



**Fig. II. 9:**  $U_{DC+} = f(N_r)$  de gouttes d'eau recouvrant une isolation en silicone ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $V_d = 45 \mu\text{l}$ )

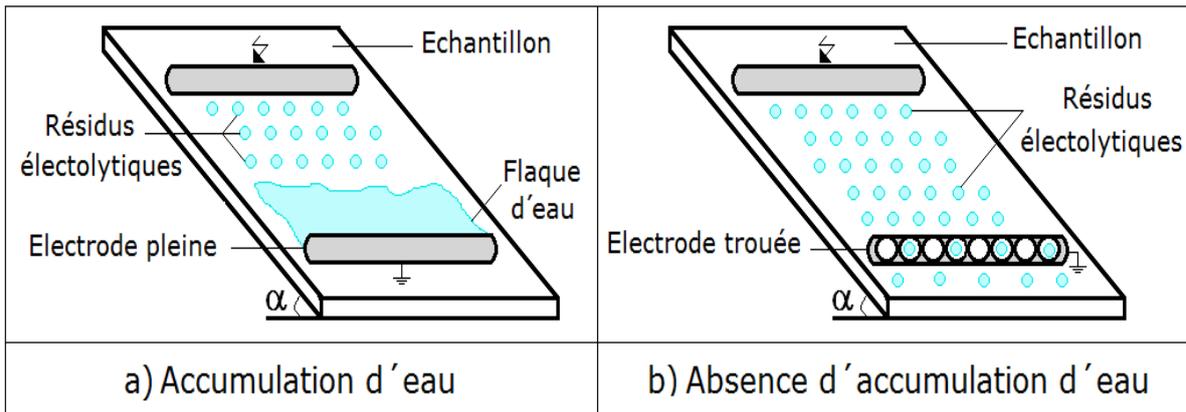
L'effet du nombre de rangées de gouttes d'eau en zigzag sur la performance électrique de l'isolation en silicone est illustré par la figure II. 9. Il en résulte une subdivision en deux zones distinctes de la tension de contournement de l'isolation:

- une première zone montrant un déclin rapide de la tension de contournement du matériau à partir de la valeur obtenue en l'absence de gouttelettes d'eau sur sa surface jusqu'à une valeur minimale correspondant à un nombre limité de rangées de gouttes de l'ordre de 4 à 5.
- Une deuxième zone caractérisant la constance de cette performance électrique minimale indépendamment du nombre de rangées supplémentaires ajoutées sur sa surface. La visualisation du phénomène de décharge électrique montre que la déformation des gouttes d'eau intéresse toujours 4 à 5 rangées et la décharge électrique s'établit sur un filet d'eau engendré par la jonction des gouttes d'eau situées très souvent sur une ou deux lignes obliques formées sur la surface interélectrode comme le montre la figure II. 10.

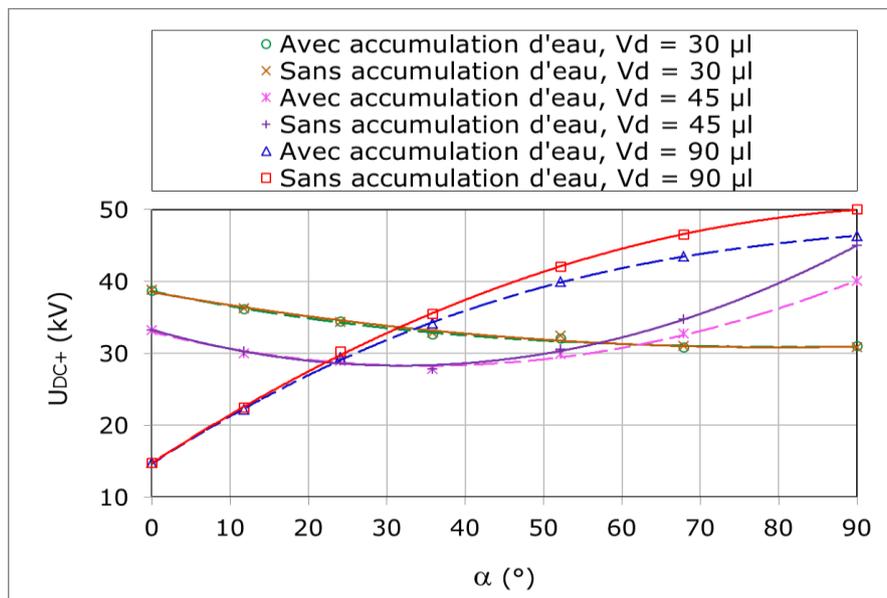


**Fig. II. 10:** Chemin emprunté par la décharge de contournement en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface en silicone (Arrangement en zigzag,  $N_r = 5$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

Pour tenir compte de l'accumulation d'eau ou non au niveau de l'électrode terre, deux types d'électrodes de terre (Fig. II. 11), l'une pleine (Fig. II. 11a), l'autre trouée le long de la largeur de l'isolation (Fig. II. 11b) de façon à retenir, dans le premier cas, au niveau de l'électrode terre, une quantité d'eau résultant de la chute de gouttes d'eau due à une inclinaison bien déterminée de l'isolation (Fig. II. 11a) et évacuer dans le deuxième cas cette même quantité d'eau à travers les trous de l'électrode de terre (Fig. II. 11b).



**Fig. II. 11:** Dispositif permettant l'accumulation d'eau sur la surface de l'isolation en silicone située au voisinage de l'électrode terre



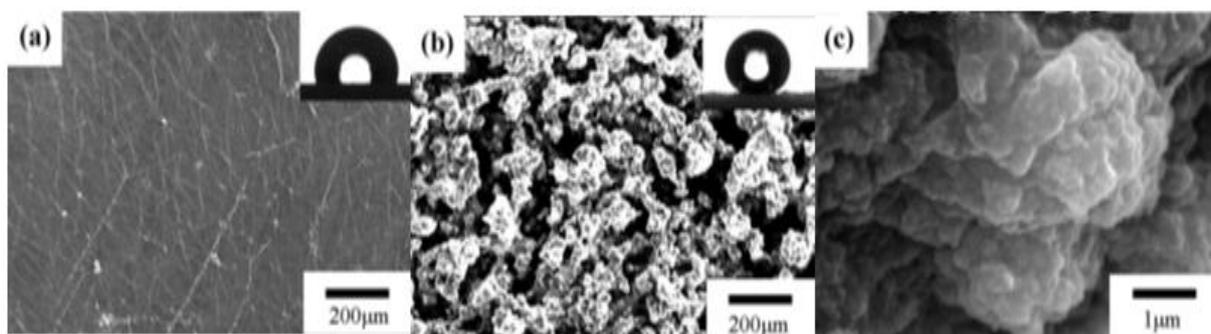
**Fig. II. 12:**  $U_{DC+} = f(\alpha)$  d'une isolation en silicone avec ou sans accumulation de gouttes d'eau au niveau de sa surface proche de l'électrode à la terre

L'influence de l'angle d'inclinaison d'une isolation en silicone recouverte de 5 rangées de gouttes d'eau en zigzag sur sa performance électrique, peut être résumée comme suit (figure II. 12):

- Un angle d'inclinaison nul de l'isolation correspondant à un profil favorable pour un isolateur lorsqu'il est recouvert de gouttes d'eau à volume inférieur à  $30 \mu\text{l}$  (Phénomène de condensation naturelle) a été obtenu. Par contre celui – ci lui est très défavorable sous l'effet d'une pluie naturelle à grosses gouttes d'eau ( $V_d \leq 110 \mu\text{l}$ ).
- La performance électrique de l'isolation décroît jusqu'à 40 % de celle de la même isolation sans ces gouttes d'eau, lorsque celle-ci est inclinée d'un angle  $0^\circ < \alpha < 50^\circ$  et recouverte de gouttes d'eau de pluie à volume moyen variant entre  $45 \mu\text{l}$  et  $60 \mu\text{l}$ .
- La performance électrique de l'isolation peut être maintenue à une valeur estimée au maximum à 85 % de celle obtenue sans ces gouttes dans un intervalle d'angle de l'inclinaison de sa surface compris entre  $50^\circ$  et  $90^\circ$ . Un tel profil est recommandé pour les ailettes d'un isolateur réel en silicone dans les régions à plus forte pluviométrie.
- Pour une conductivité électrique faible, l'accumulation d'eau au niveau de l'électrode à la terre exerce une influence négligeable sur la performance électrique de l'isolation.

### II. 3 Performance électrique d'une surface isolante superhydrophobe [7]

Y. Li et al 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 II. 13.



**Fig. II. 13:** 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

La surface superhydrophobe fabriquée par les auteurs est à base de silicone pure sur laquelle sont greffées des nanoparticules de  $\text{SiO}_2$ . Son angle de contact est de l'ordre de  $(161.8^\circ)$ .

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 II. 14. 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.

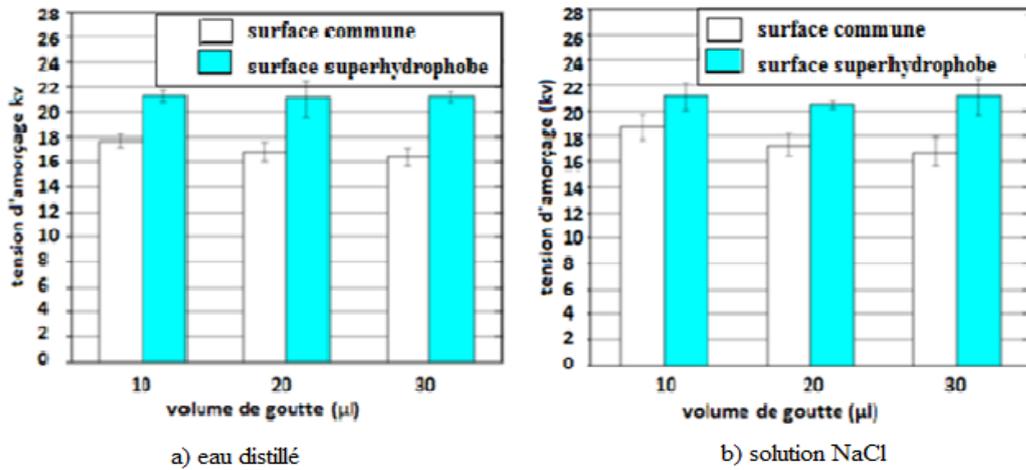


Fig. II. 14: Tension de contournement sur chaque surface pour différents liquides

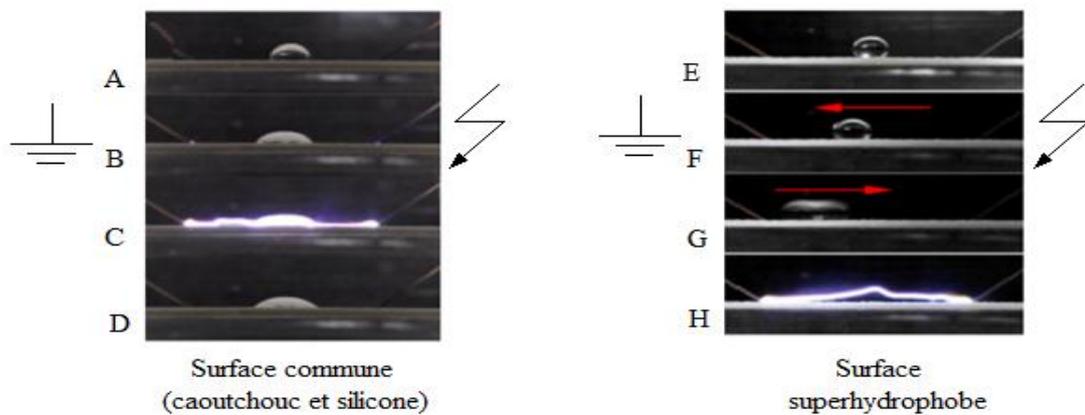
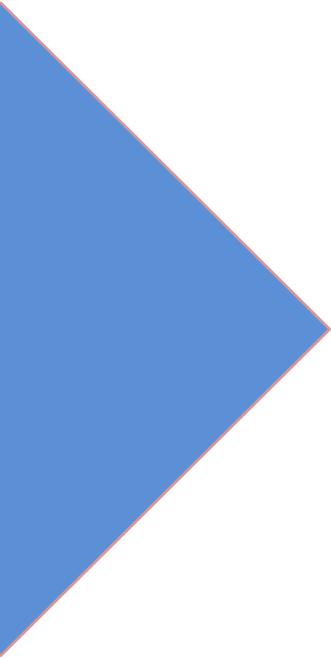


Fig. II. 15: le comportement dynamique d'une gouttelette et phénomène d'embrasement associé sur différents surfaces

La visualisation du comportement électrique d'une goutte d'eau posée sur les surfaces hydrophobe et superhydrophobe est décrite par la figure II. 15. Il en résulte que sur la surface commune réduit le chemin d'isolation et la tension de claquage 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 la surface hydrophobe et la tension de contournement augmente donc la gouttelette est capable de quitter la surface sous une tension continue.

## II. 4 Conclusion

Après avoir passé en revue l'état de l'art sur l'influence des types de surfaces, Il est a constaté l'intérêt grandissant accordé par les divers chercheurs, les différents types de surfaces montrent que la surface superhydrophobe présente un chemin d'isolement très élevé par rapport à une surface hydrophobe du fait que les gouttes d'eau la recouvrant quittent la surface interélectrode sous l'action d'un champ électrique.



# **CHAPITRE III**

**Pollution des isolations électriques**

### III. 1 Introduction

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

### III. 2 Définitions et significations [9]

#### III. 2. 1 Pollution

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

#### III. 2. 2 Salinité (Sa)

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

#### III. 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.

#### III. 2. 4 Degré de pollution

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

### **III. 3 Sources de pollution [10]**

Les principales sources de pollution pouvant être rencontrées sont la pollution naturelle : marine, désertique et la pollution industrielle. La pollution mixte représente l'ennemi majeur des ouvrages électriques car, elle est la combinaison des deux pollutions, naturelle et industrielle.

#### **III. 3. 1 Pollution naturelle**

Cette pollution peut être marine, désertique ou autre, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les vents.

##### **III. 3. 1. 1 Pollution désertique**

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

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

Dans les installations au voisinage de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi une couche de sel qui recouvre toute leur surface. Cette couche qui est humidifiée par les embruns eux-mêmes, devient de plus en plus conductrice. Ce qui donne naissance à des courants de fuite encore plus intenses, et des arcs pouvant se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolant.

##### **III. 3. 1. 3 Autres types de pollution naturelle**

La pluie est un phénomène naturel. 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. C'est le contournement sous pluie.

#### **III. 3. 2 Pollution industrielle**

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ...etc. 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. De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticides engrais et grains de pollens. Cette pollution peut aussi être d'origine

domestique, quand il s'agit des facteurs tels que fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

### III. 3. 3 Pollution mixte

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

### III. 4 Mesure de la sévérité de pollution d'un site [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17],[18], [19], [20]

Dans ce qui suit, nous passerons en revue différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées. Dans ce cas, les principales méthodes suivantes ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site.

#### III. 4. 1 Conductance superficielle

La conductance superficielle ( $G$ ) des isolateurs témoins, 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 témoin ( $V$ ), selon la relation III.1.

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

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur. Cette méthode est donc un paramètre qui caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche), laquelle détermine la performance d'une surface isolante. Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une

méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général elle présente des résultats dispersés.

### III. 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.

### III. 4. 3 Densité du dépôt non soluble (DDNS)

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de produits non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (Fig. III.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.

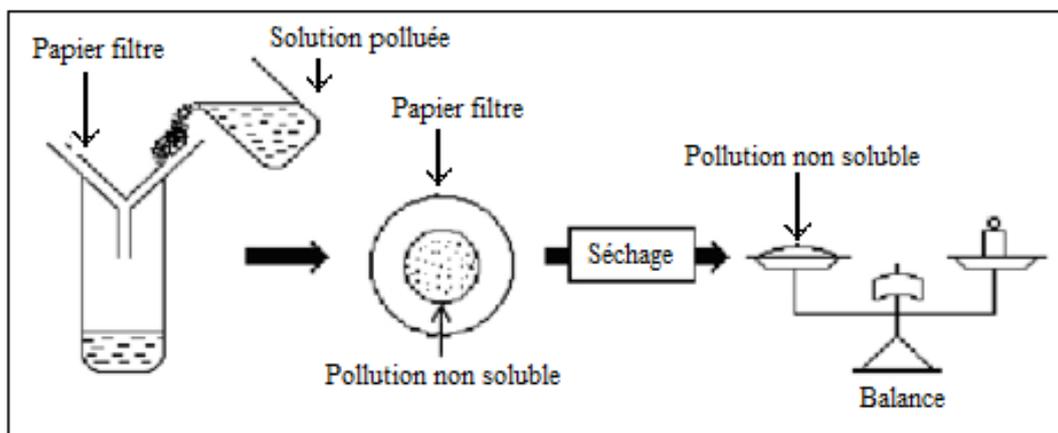
$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \quad (III. 2)$$

Où: DDNS : est la densité de dépôt non soluble en mg/cm<sup>2</sup>.

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

m<sub>i</sub> : est la masse initiale du papier filtre en mg.

A : est la surface lavée de la barrière en cm<sup>2</sup>.



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

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

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par  $\text{cm}^2$  de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau. Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut calculer la DDSE.

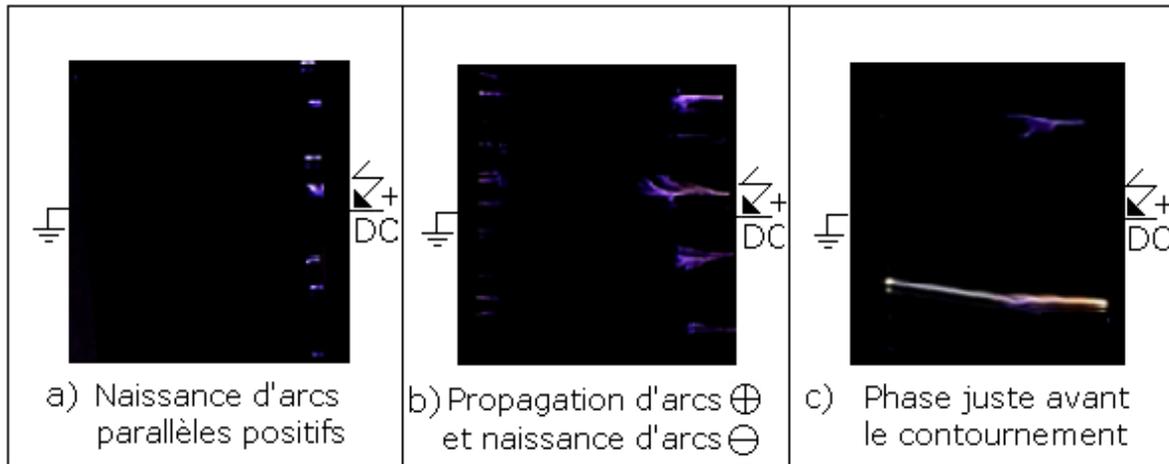
Pour déterminer la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturelle. Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente en outre certains inconvénients tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte.

## III. 5 Conséquences de la pollution sur les équipements électriques [11]

### III. 5. 1 Contournement d'une surface isolante hydrophile

#### III. 5. 1. 1 Pollution uniforme

Le contournement d'une surface hydrophile délimitée par deux électrodes planes mise sous conditions de pollution et sous tension continue positive est régi par deux arcs électriques en série, dont l'un est issu du plan sous haute tension et l'autre du plan mis à la terre. Chacun de ces deux arcs est le résultat de l'évolution de plusieurs décharges électriques en parallèle au niveau de chacune des électrodes planes suscitées dont le nombre restant au moment du contournement de l'isolation est fonction de la largeur de ces deux plans. Il est à signaler que les décharges positives sont plus longues, intenses et rapides par rapport à celles négatives (Fig. III. 2).

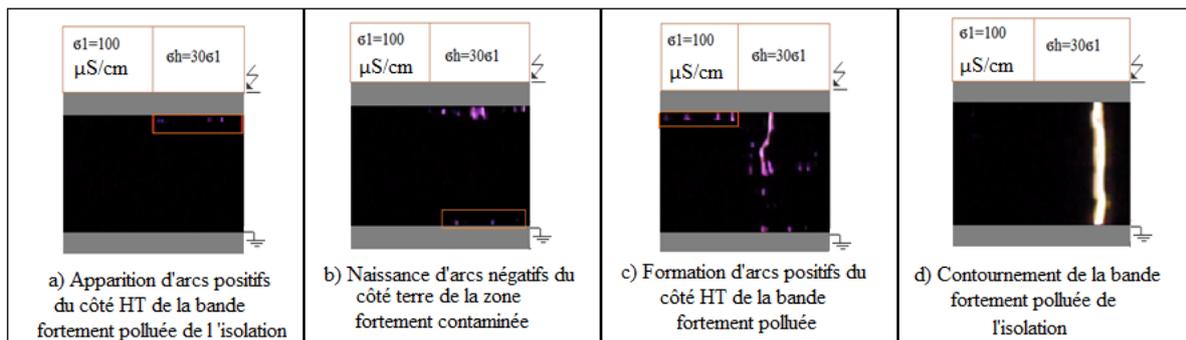


**Fig. III. 2:** Phases de contournement d'une surface hydrophile plan-plan polluée sous tension continue positive

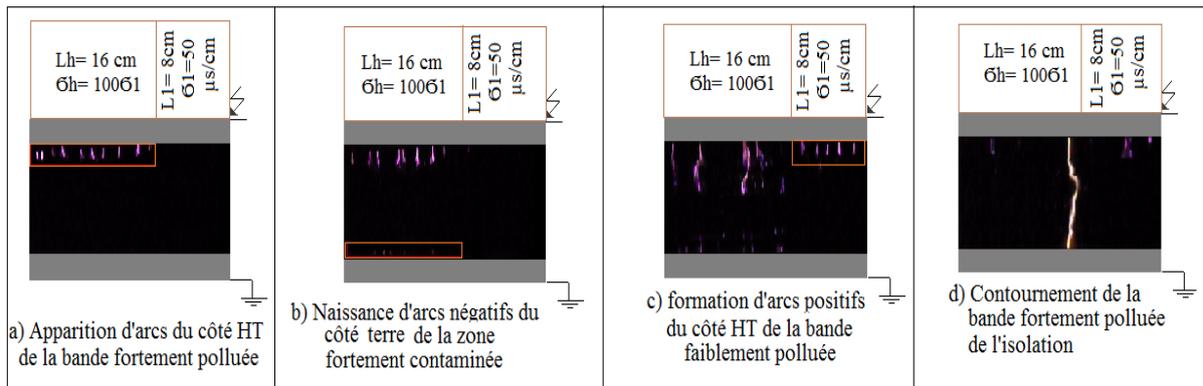
### III. 5. 1. 2 Pollution non uniforme

Le contournement d'une surface isolante à deux bandes non uniformément contaminées est régi par deux arcs précurseurs positif et négatif progressant l'un vers l'autre et finissant par provoquer le court-circuit de l'isolation. La visualisation des différentes phases de contournement de ses deux bandes faiblement et fortement polluées, à rapport de conductivités électriques  $\sigma_l/\sigma_h < 0,33$ , est illustrée par la figure III. 3. Dans ce cas, la longueur de l'isolation  $L_p = 2L_l = 2L_h$  est prise égale à 12 cm. Cela signifie que cette valeur est la même que celle de la largeur effective d'un arc électrique ayant atteint sa taille critique et sur le point de provoquer le contournement d'une isolation polluée. Cela voudra dire qu'il faudra s'attendre à la présence d'un seul et unique arc sur cette surface au moment de son contournement. Il résulte de la figure 4 une différence au niveau des phases essentielles de contournement d'une surface non uniformément contaminée par rapport à celle mise sous conditions de pollution uniforme. Les premiers arcs électriques parallèles et positifs apparaissent en premier lieu au niveau de l'électrode mise sous haute tension sur la bande fortement polluée de l'isolation (Fig. III. 3a). Après un certain temps de retard ( $\Delta t_1$ ), des arcs électriques négatifs prennent naissance au niveau de l'électrode mise à la terre sur la bande fortement contaminée de l'isolation comme si la zone faiblement polluée de l'isolation n'existait pas (Fig. III. 3b). Ce n'est que lorsque l'arc électrique positif le plus développé parmi ceux issus de l'électrode sous tension ait atteint la moitié de la longueur de la ligne de fuite, ce qui donne un autre retard  $\Delta t_2$  tel que  $\Delta t_2 > \Delta t_1$ , que

d'autres arcs électriques positifs, très infimes, prennent naissance du côté haute tension de la bande faiblement contaminée de l'isolation (Fig. III. 3c). Enfin, le court-circuit de la zone fortement contaminée s'établit de manière tellement rapide que des arcs électriques négatifs ne puissent pas du tout se former au-dessus de la zone faiblement polluée de l'isolation du côté de l'électrode mise à la terre (Fig. III. 3d). Par conséquent, le contournement précoce de la surface de la bande fortement polluée de l'isolation par une décharge électrique est justifié par le fait que l'arc électrique évoluant sur la surface de cette zone ait atteint sa taille critique bien avant la naissance de l'arc précurseur au niveau de la zone faiblement polluée. Donc, son développement temporaire bénéficie d'un temps d'avance égal à  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ . Lorsque la valeur de la longueur de sa surface est égale à celle de la largeur effective de l'arc critique juste avant le contournement de l'isolation, sa surface est occupée par un seul et unique arc précurseur évoluant sur la bande fortement polluée. Celle-ci est ainsi capable de lui offrir une quantité de charges assez suffisante pour lui permettre d'atteindre sa taille critique et d'engendrer le contournement de l'isolation au détriment de celui qui peine à prendre forme sur la bande faiblement contaminée ou qui s'éteint aussitôt né. Par contre lorsque la valeur de la longueur totale de la surface de l'isolation est le double de celle de la largeur effective de l'arc critique de contournement (Fig. III. 4), deux arcs électriques précurseurs peuvent coexister et se développer chacun dans sa zone, mais un seul peut entraîner le contournement de l'isolation. Celui-ci correspond à l'arc électrique évoluant sur la bande fortement contaminée et à plus faible résistance électrique.

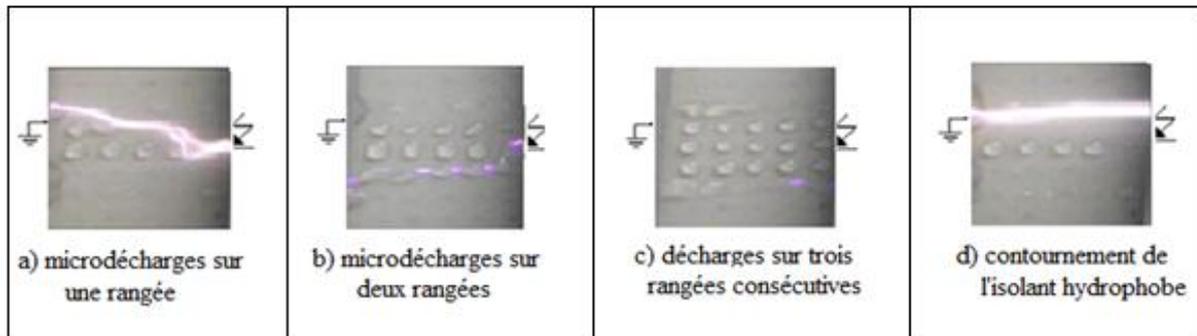


**Fig. III. 3:** Phases de contournement d'une surface non uniformément contaminée de l'isolation ( $L_p = 12$  cm,  $L_l = 6$  cm avec  $\sigma_l = 100$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  et  $L_h = 6$  cm avec  $\sigma_h = 30 \sigma_l = 3000$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ )



**Fig. III. 4:** Phases de développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante sous pollution non uniforme ( $L_p = 24$  cm,  $L_l = 8$  cm avec  $\sigma_l = 50$   $\mu\text{S/cm}$  et  $L_h = 16$  cm avec  $\sigma_h = 100 \sigma_l = 5\,000$   $\mu\text{S/cm}$ )

### III. 5. 2 Contournement d’une surface isolante hydrophobe sous arrangement en ligne droite [6]



**Fig. III. 5:** Contournement d’une isolation en silicone hydrophobe sous inclinaison critique ( $V_d = 45$   $\mu\text{l}$ ,  $\sigma_v = 180$   $\mu\text{S/cm}$ ,  $\alpha_{cr} = 40^\circ$ )

La figure III. 5 illustre le contournement d’une surface isolante inclinée et recouverte de gouttes d’eau. Celui-ci est subordonné à une évolution successive de la décharge électrique pratiquement sur la largeur totale occupée par les cinq rangées pour provoquer finalement le court-circuit de l’isolation. Ce phénomène diffère évidemment de celui engendrant le contournement de la même isolation avec gouttes d’eau en position horizontale.

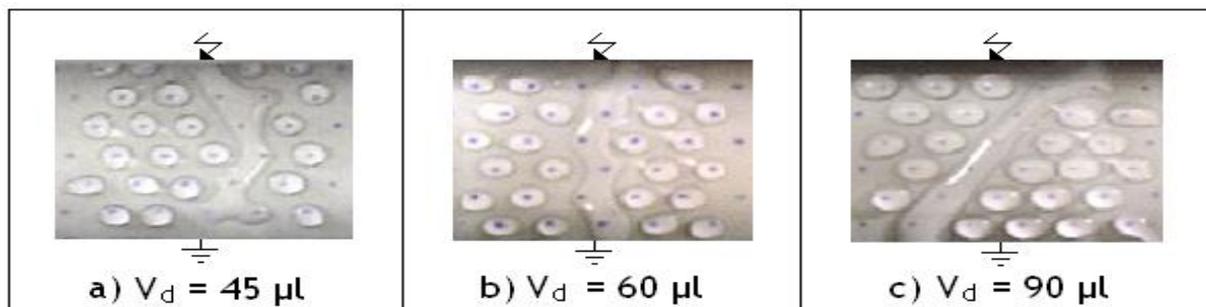
Avant l’application de la tension, la première déformation des gouttes d’eau est d’abord engendrée par l’action de leur propre poids et la force de frottement. Sous l’effet de la contrainte de tension, celles-ci continuent à se déformer et à se mouvoir en direction de l’électrode mise à la terre. Pendant ce mouvement, les gouttes proches de l’électrode sous tension, plus rapides,

arrivent à joindre celles, lentes et éloignées de l'électrode active. Leur jonction peut donner naissance à un filet d'eau partiel en forme d'un ver de terre à diamètre variable et dont l'extrémité en regard de l'électrode sous tension est de forme conique. A ce moment-là une décharge électrique, émanant de l'électrode haute tension, s'amorce dans l'intervalle d'air entre celle-ci et l'extrémité de ce filament et relie celui-ci au suivant (Fig. III. 5a). D'autres décharges électriques s'ensuivent en connectant entre eux les filaments d'eau subséquents (Fig. III. 5b). Généralement le filament d'eau partiel crée au voisinage de l'électrode active s'allonge vers ceux formés aux alentours de l'électrode terre.

Parallèlement, la distance dans l'air séparant l'extrémité du premier filament de l'électrode active s'accroît à cause de son déplacement vers l'électrode terre. L'arc électrique précurseur, brûlant au-dessus de cette zone, finit par s'éteindre pour se rallumer au niveau d'une seule ou latéralement sur plusieurs rangées parallèles (Fig. III. 5b et 5c) lui offrant de par leur déformation avancée des conditions de propagation plus favorables.

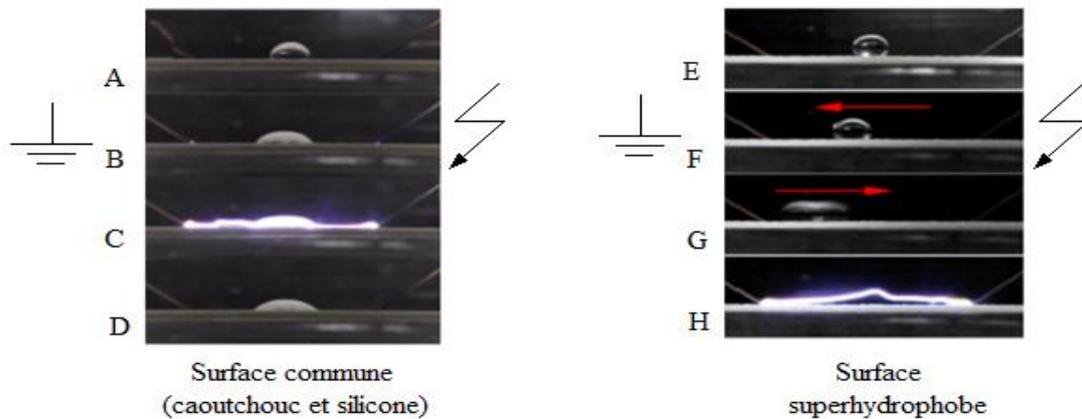
### III. 5. 3 Contournement d'une surface isolante hydrophobe sous arrangement zigzag [7]

La visualisation du phénomène de décharge électrique montre que la déformation des gouttes d'eau intéresse toujours 4 à 5 rangées et la décharge électrique s'établit sur un filet d'eau engendré par la jonction des gouttes d'eau situées très souvent sur une ou deux lignes obliques formées sur la surface interélectrode comme le montre la figure III. 6



**Fig. III. 6:** Chemin emprunté par la décharge de contournement en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface en silicone (Arrangement en zigzag,  $N_r = 5$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

### III. 5. 4 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe [8]



**Fig. III. 7:** le comportement dynamique d'une gouttelette et phénomène d'embranchement associé sur différentes surfaces

### III. 6 Simulation de la pollution au laboratoire [11]

#### III. 6. 1 Essais sous pollution artificielle

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

##### III. 6.1.1 Méthode de la couche solide

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte 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.

##### III. 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 kg/m<sup>3</sup>.

### **III. 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 méthyl cellulose 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.

### **III. 7 Techniques de lutte contre la pollution [11]**

Vu la sévérité de pollution des sites, la variation de celle-ci à travers le temps et l'extension des zones industrielles et urbaines, font que l'isolement des postes ou des lignes reste toujours insuffisant.

Alors des méthodes de lutte contre ces phénomènes peuvent être envisagées, par exemple le changement des isolateurs ; le coût étant élevé on préfère limiter ou même essayer de réduire le surplus de pollution, et la surface superhydrophobe.

### III. 8 Conclusion

Le comportement des isolateurs des lignes aériennes, et l'isolement externe d'une manière générale, est souvent affecté par le phénomène de contournement dû à la pollution atmosphérique. L'optimisation de l'isolement devient donc un point très important en vue de réduire les pertes occasionnées par le contournement.

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.

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

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



# CHAPITRE IV

L'automatisation du dépôt des gouttes  
d'eau

## IV. 1 Introduction

Un système est dit automatisé, lorsqu'il peut gérer de manière autonome un cycle de travail préétabli qui se décompose en séquences ou étapes. L'automatisation d'un procédé (machine, ensemble de machines ou plus généralement un équipement industriel) consiste à en assurer la conduite par un dispositif technologique.

L'arrivée de l'automatique a permis de faire un grand pas en avant, ou l'automatisation des machines est la suppression pour l'homme des tâches pénibles et répétitives, rajouter à cela un niveau de sécurité élevé.

Après la description du phénomène étudié dans les chapitres précédant, L'objectif de ce chapitre est de concevoir et réaliser le dépôt des gouttes sur la surface superhydrophobe automatique.

Nous allons donc élaborer l'analyse fonctionnelle d'un dispositif à réaliser et son grafset associé.

## IV. 2 Cahier de charge

Une unité du dépôt de goutte d'eau automatique se compose d'une pompe (P) destinée au remplissage d'un réservoir d'eau suivie d'une tige munie de deux électrovannes bistable (V1, V2) permettant de déverser une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe. Un moteur à double sens MD, MG autorise le déplacement de la tige d'une position à une autre.

Le dépôt de quatre gouttes d'un volume fixe égal à  $40 \mu\text{l}$  sur une surface superhydrophobe s'effectue comme suit (Fig.IV.1) :

A l'appui sur le bouton marche Bm la pompe se déclenche jusqu'à atteindre le niveau N1 (cela se fait chaque essai), puis V2 s'ouvre ( $A2=0$ ), après 3s V2 se ferme ( $A2=1$ ).

V1 s'ouvre ( $A1=0$ ) après 2s V1 se ferme ( $A1=1$ ), puis M1 tourne, la tige se déplace à la position  $i$  ( $1...4$ ) détectée par des capteurs CG $i$  ( $1...4$ ).

A l'arrivée de la tige à la position 4 ( $CG4=1$ ), le moteur tourne dans le sens inverse jusqu'à l'arrivée de la tige à la position initiale ( $CG1=1$ ).

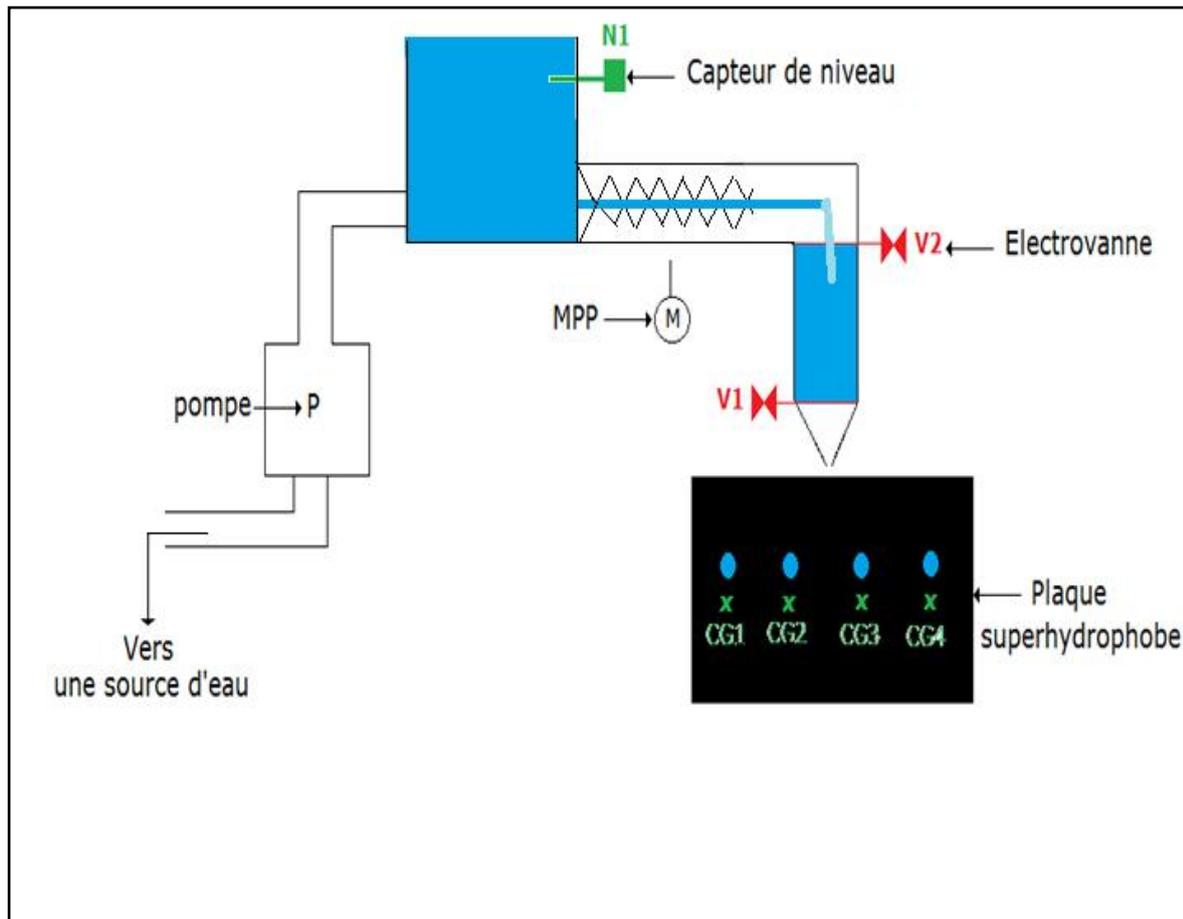


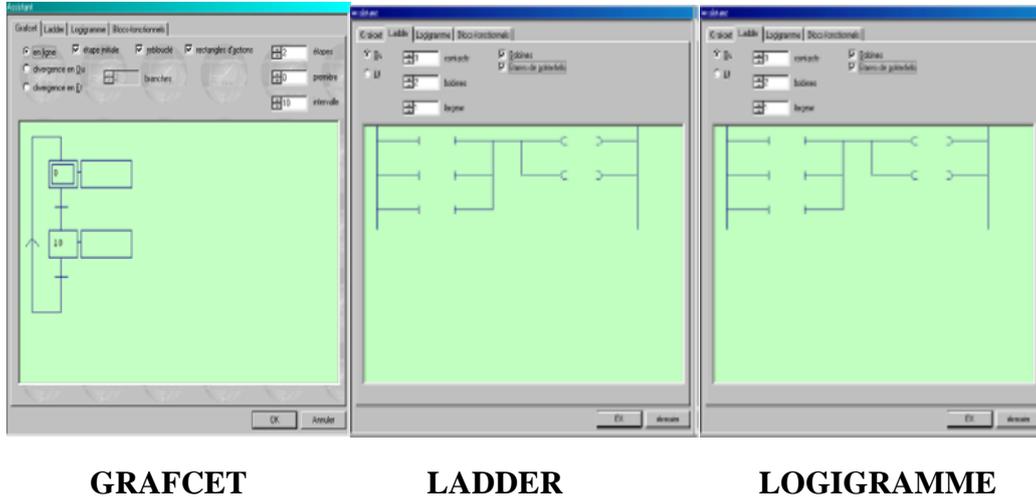
Fig. IV. 1: Vue générale du dispositif

### IV. 3 Elaboration du GRAFCET

A partir du cahier des charges et en utilisant le logiciel AUTOMGEN, le GRAFCET a été élaboré pour permettre le fonctionnement du dispositif donné en figure IV.1.

#### IV. 3. 1 Présentation du logiciel de programmation (AUTOMGEN) [23]

C'est un logiciel de conception et d'application d'automatisme. Il permet de programmer et de simuler des systèmes pilotés par des automates programmables industriels, microprocesseurs, ordinateurs équipés de cartes d'entrée-sorties. Il utilise les langages de programmation compatible : Logigramme, LADDER, blocs Fonctionnels, Organigramme et Langage latéral, ainsi que le GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Etape-Transition).

**Fig. IV. 2 : Icône de l'AUTOMGEN 8****GRAFCET****LADDER****LOGIGRAMME****Fig. IV. 3: image sur model de programme**

### La vue générale

Élément central de la gestion des applications, le navigateur permet un accès rapide aux différents éléments d'une application :

- Folios.
- Symboles.
- Configuration.
- Documentation.
- Objets IRIS.

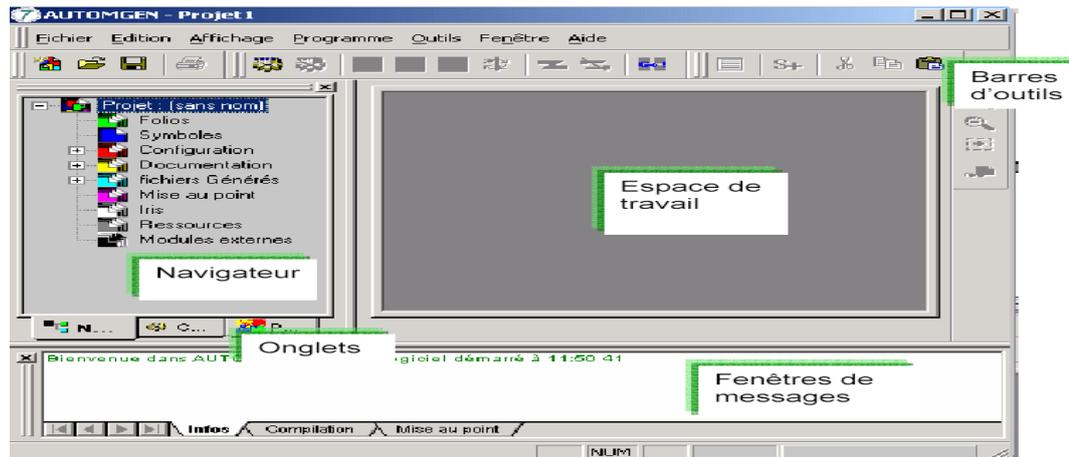


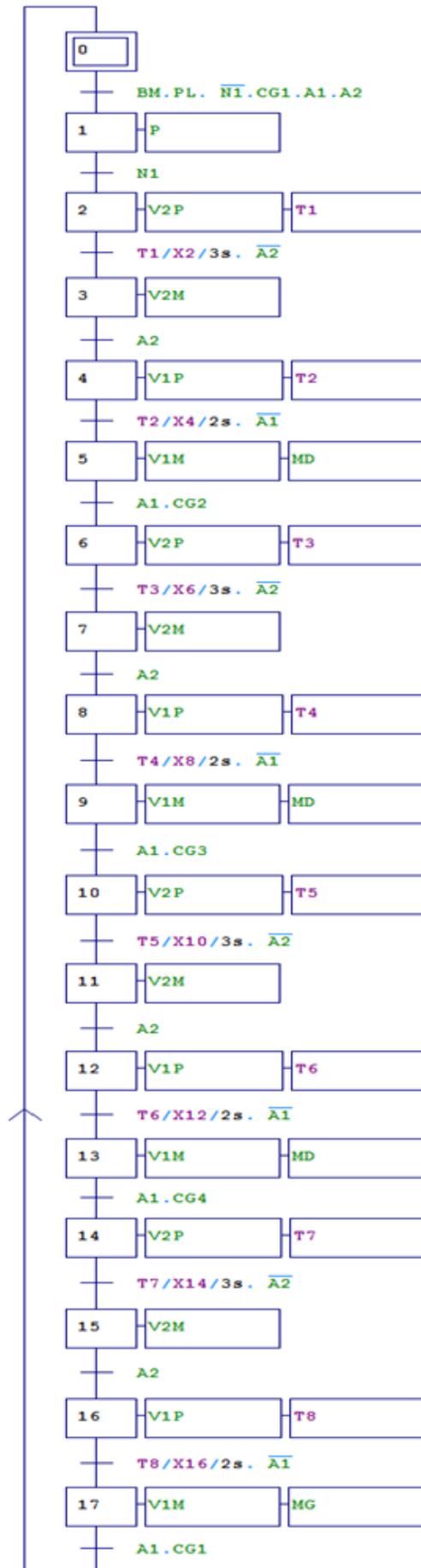
Fig. IV. 4 : page d'accueil de logiciel automgène

#### IV. 4 GRAFCET de fonctionnement

La table des variables utilisées est la suivante : Tableau IV.1 : Variables utilisées

symboles	Variables	Commentaires
Bm	I0	Bouton marche
PL	I1	Capteur de position : détecte la présence de la plaque (surface superhydrophobe)
N1	I2	Capteur de niveau : indique que le niveau haut du réservoir
A1	I3	Capteur de proximité : fermeture de la l'électrovanne V1
A2	I4	Capteur de proximité : fermeture de l'électrovanne V2
CG1	I5	Capteur de position : indique que la tige est en position 1
CG2	I6	Capteur de position : indique que la tige est en position 2
CG3	I7	Capteur de position : indique que la tige est en position 3
CG4	I8	Capteur de position : indique que la tige est en position 4
P	O0	Pompe de remplissage déclenché
V2P	O1	Ouverture de l'électrovanne V2
V2M	O2	Fermeture de l'électrovanne V2
V1P	O3	Ouverture de l'électrovanne V1
V1M	O4	Fermeture de l'électrovanne V1
MD	O5	Moteur tourne permettant de déplacé la tige du côté droit
MG	O6	Moteur tourne permettant de déplacé la tige du côté gauche

Grafcet



## IV. 5 Exemple d'application [22 ,24]

### IV. 5. 1 Analyseur de la forme de la goutte



**Fig. IV. 5 :** Analyseur de la forme de la goutte

Drop Shape Analyzer – DSA100 est un système de haute qualité pour la plupart des tâches d'analyse de mouillage et adhésion sur des surfaces solides. Du modèle de base pour la mesure précise de l'angle de contact à l'instrument de configuration supérieure entièrement automatique pour la mesure en série de l'énergie de surface (SFE), le DSA100 propose les options, flexibles et fiables, adaptées à ces surfaces et processus.

#### IV. 5. 1. 1 Tâches et application

- Caractérisation des processus de prétraitement de surfaces
- Analyse de l'adhésion et de la stabilité des processus de liage et de revêtement
- Analyse de substances de revêtement selon DIN 55660
- Contrôle de la mouillabilité du plastique, du verre, de la céramique, du bois ou du métal
- Contrôle qualité des wafers et dans la microélectronique
- Contrôle de la propreté de surfaces
- Élasticité des films liquides
- Mouillage de surfaces microscopiques

## IV. 5. 2 Système de dosage

### IV. 5. 2. 1 Système de dosage piloter



**Fig. IV. 6:** système de dosage piloter

La tendance vers de plus petites structures, associée à des exigences de qualité toujours plus grandes, nécessite de nouvelles solutions pour mesurer les angles de contact. KRÜSS a relevé ce défi avec les systèmes de dosage picoliter: mesures de l'angle de contact sur les poils, composants électroniques ou têtes d'impression jusqu'à 1000 mesures et plus par seconde et largage de 50 piloter .Le taux d'enregistrement d'image est extrêmement élevé en combinaison avec le grossissement jusqu'à 50 fois de l'image de chute.

Un éclairage LED spécial à rayonnement thermique réduit garantit l'excellente qualité d'image des gouttes de piloter sur de très petites structures.

### IV. 5. 2. 2 Système de dosage manuel à jet direct DS3202

- Dosage à haute vitesse

Afin de gagner du temps: le DS3202 est le système de dosage manuel par jet direct pour des volumes reproductibles. Ses points forts: dosage rapide, précision et fiabilité.



**Fig. IV. 7:** DS3202

#### IV. 5. 2. 3 Système multi-dosage avec contrôle logiciel DS3228

Le DS3228 est très particulier: le système de dosage multiple commandé par logiciel convient pour des mesures avec jusqu'à 8 liquides d'essai. Cela garantit des analyses de forme de goutte précises, car plus le nombre de liquides d'essai utilisés est grand, plus le calcul de l'énergie libre de surface et de ses composants est précis.

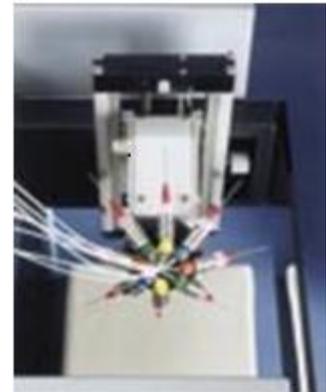


Fig. IV. 8: DS3228

#### IV. 5. 2. 4 Système de dosage direct avec contrôle logiciel DS3210

Le DS3210 élimine les méthodes de nettoyage méticuleuses qui nécessitaient auparavant des mesures sur les peintures, les encres, les adhésifs et autres supports liquides. Le système de dosage direct fonctionne avec des seringues en verre et des seringues en plastique jetables qui sont directement remplies avec le liquide d'essai. Cela évite la contamination des tuyaux et des vannes, tandis que le dosage direct permet un changement d'échantillon particulièrement rapide.



Fig. IV. 9: DS3210

#### IV. 5. 2. 5 Système de dosage à haute température DO3241

- Mesures exactes jusqu'à 400 ° C

La tension de surface des liquides à haute viscosité et fondus peut être déterminée à des températures allant jusqu'à 400 °C. La combinaison d'un système de dosage haute température et d'une chambre haute température est la solution optimale pour les mesures de l'angle de contact et de la tension superficielle au-dessus de la température ambiante.



Fig. IV. 10: DO3241

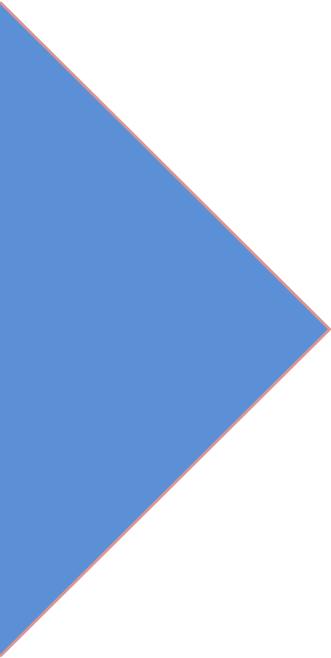
#### **IV. 6 Avantages [22]**

Les avantages de l'automatisation et la robotique rend les industries de la transformation et de la fabrication mondiale plus sûre, plus efficaces et leur permettent de fournir des bénéfices supérieurs, est essentielle pour un succès durable.

- Réduction du gaspillage de l'eau
- L'optimisation des temps de cycles des pièces: les robots peuvent fonctionner plus longtemps et plus rapidement.
- La réduction des déchets : les robots sont si précis qu'ils peuvent économiser de la matière
- La suppression de certaines tâches fatigantes répétitives ou nocives pour l'homme.

#### **IV. 7 Conclusion**

Le graphique réalisé dans le cadre de ce chapitre peut être exploité pour l'étude expérimentale présentée au chapitre V, il peut être développé pour répondre positivement aux investigations à entreprendre à l'avenir dans ce sens.



# CHAPITRE V

Partie expérimentale

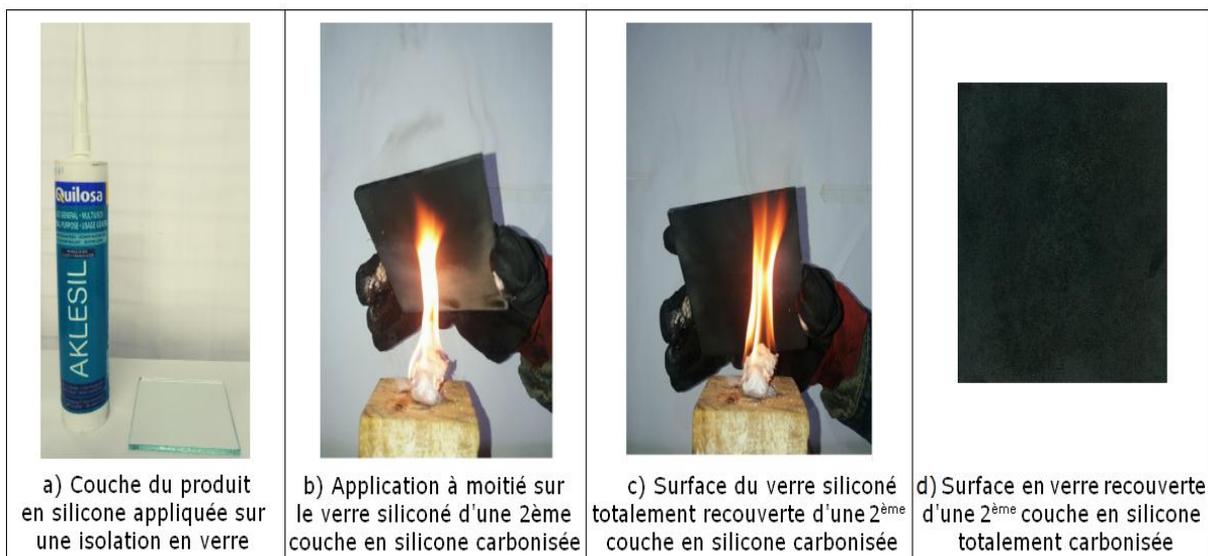
## V. 1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté une analyse du comportement des gouttes d'eau recouvrant des surfaces hydrophobes sous l'action d'un champ électrique. L'impact de la présence des gouttes d'eau sur la surface des isolateurs a été également rapporté. Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux de plusieurs séries d'expériences permettant la mise en évidence de l'effet des paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau déposées manuellement sur une surface superhydrophobe sur la tension de leur expulsion de celle-ci et la recherche du profil des électrodes haute tension et terre empêchant la formation des décharges électriques partielles et de contournement de l'isolation. Ces investigations seront appuyées par la visualisation du phénomène d'évacuation des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe du matériau considéré dans cette étude.

## V. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure

### V. 2.1 Préparation de la surface superhydrophobe

La figure V.1 montre les étapes essentielles de la préparation de la plaque superhydrophobe. Nous prenons des plaques en verre neuves sur lesquelles nous déposons une fine couche de silicone prise à partir du tube illustré par la figure V.1. Une quantité de silicone prise du même tube est déposée sur un morceau de bois que nous brûlons (Fig.V.1). La plaque recouverte d'une couche de silicone est approchée de la flamme pour la recouvrir de suie émanant de la carbonisation de la silicone (Fig.V.1b et 1c). La figure V.1d illustre une plaque totalement noircie et lavée et rincée à l'eau du robinet.



**Fig. V.1:** Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe

### V. 2.2 Choix et fixation du volume des gouttes d'eau:

Dans le cadre de cette étude une micropipette graduée de 0 à 100  $\mu\text{l}$  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. V.2a). Celle-ci est déposée sous forme d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe du matériau (Fig.V.2b).

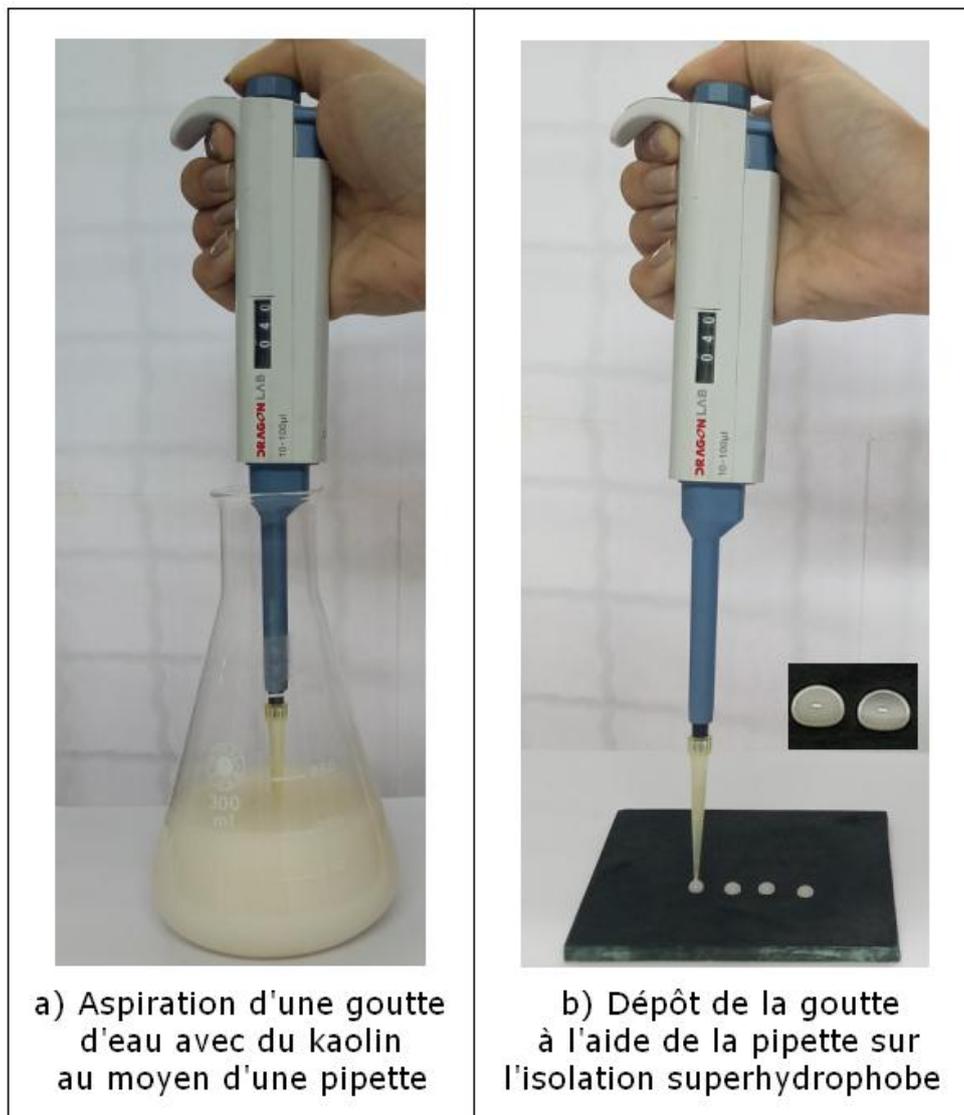
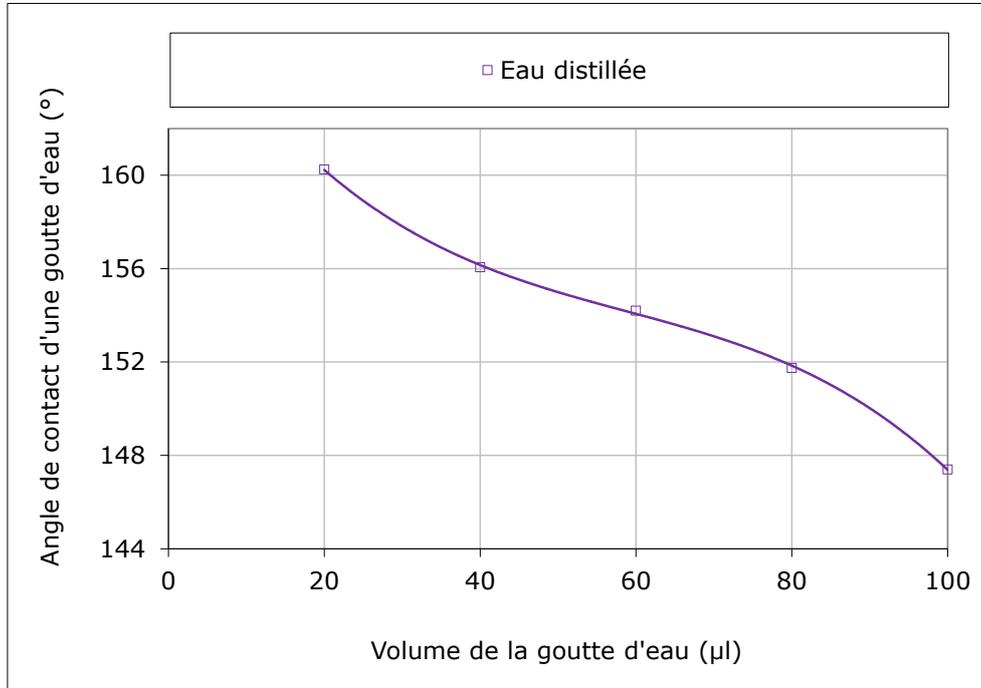


Fig. V.2: Micropipette de mesure de volume de gouttes d'eau graduée de 0 à 50  $\mu\text{l}$

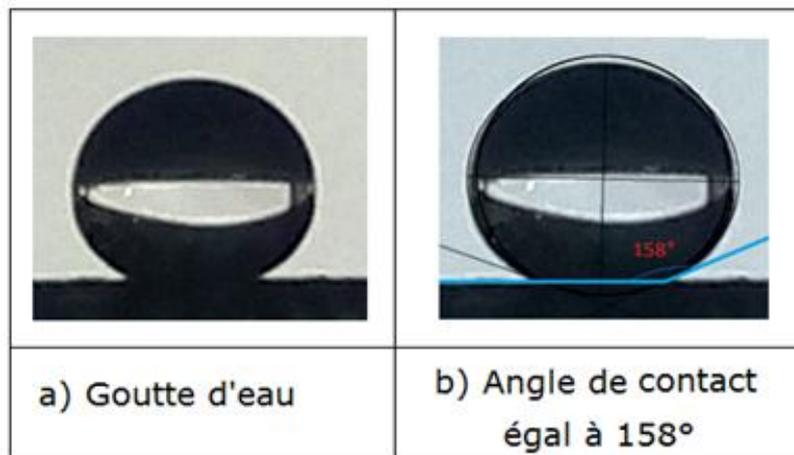
### V.2.3 Mesure de l'angle de contact

La figure V.3 illustre l'allure de l'angle de contact en fonction du volume d'une goutte d'eau, Il en découle que plus le volume augmente l'angle de contact diminue ceci est dû au fait qu'avec

l'élévation du volume de la goutte, celle-ci s'alourdit et s'aplatit ce qui entraîne la diminution de son angle de contact. La mesure de ce dernier est effectuée à l'aide du logiciel Image J disponible sur internet (Fig. V .4).La valeur de celui-ci est de l'ordre de 158 °.



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

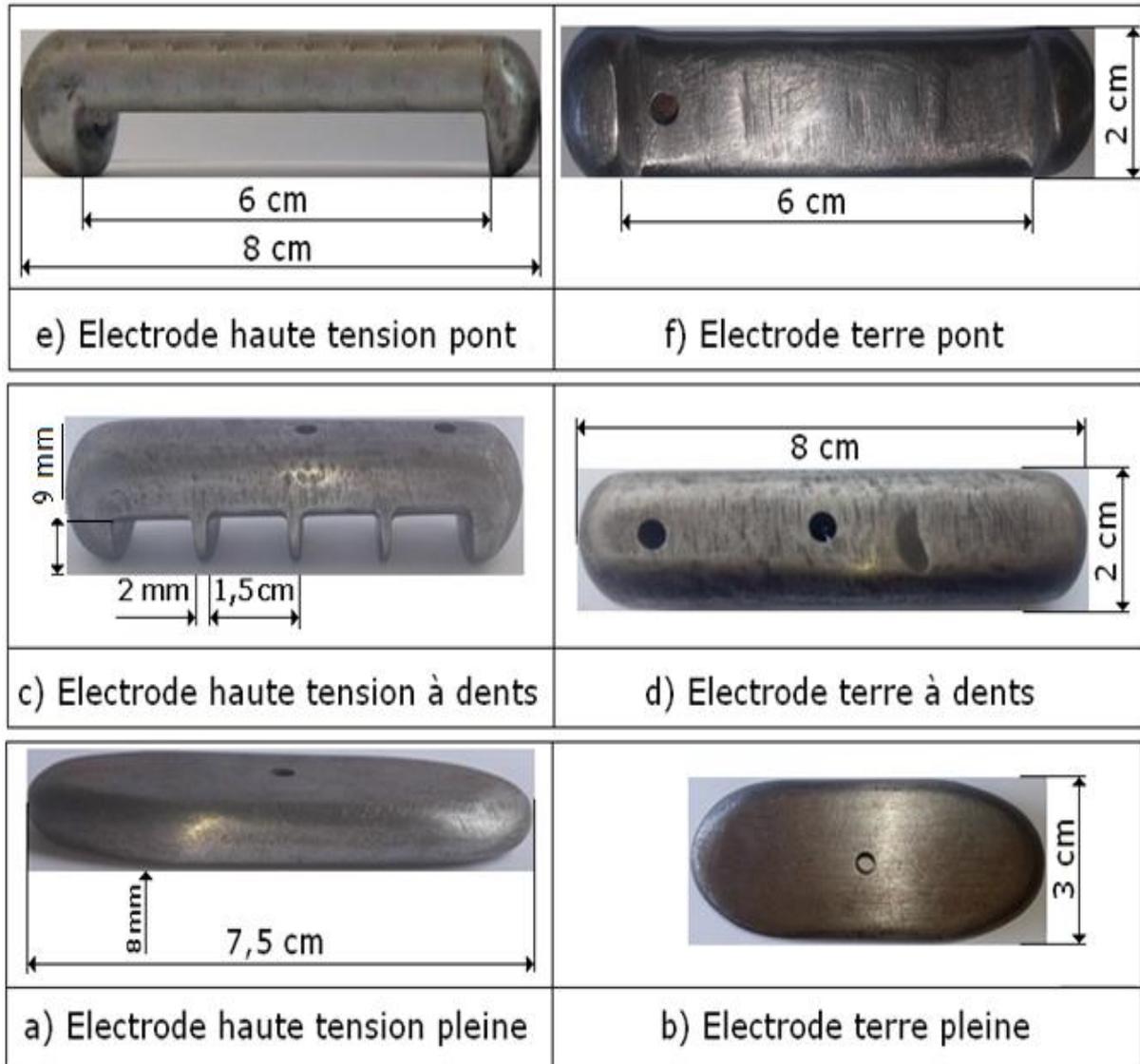


**Fig.V.4 :** Angle de contact d'une goutte d'eau posé sur une surface superhydrophobe

#### V. 2. 4 Confection des électrodes haute tension et terre

Trois jeux de deux électrodes ont été confectionnés, la figure V.5 illustre des différentes géométries des électrodes utilisées tout au long de nos expériences. Le premier profil correspond à des électrodes parallélépipédiques pleines (Fig. V. 5a et 5b), le 2<sup>ème</sup> profil à des

électrodes cylindriques à dents (Fig. V. 5c et 5d), le 3<sup>ème</sup> profil à électrode cylindrique à pond (Fig. V. 5e et 5f). À travers ces géométries, nous recherchons le meilleur profil empêchant la naissance des décharges électriques partielles et de contournement de la surface de l'isolation.



**Fig. V. 5:** Systèmes d'électrodes utilisées

La tension continue d'essai de l'isolation est fournie par la station de mesure illustrée par la figure V.6. Celle-ci comprend principalement un transformateur élévateur délivrant à son secondaire une tension de 135 kV et un courant de 80 mA. Sa sortie est reliée au moyen de la diode D en connexion direct à la résistance d'affaiblissement de courant Ra (106 kΩ), en dérivant avec le condensateur de lissage CL (10nF). Dans ces cas, les branchements de l'isolation superhydrophobe (Ssh) et du voltmètre de crête (Vdc) sont effectués respectivement aux bornes du diviseur de tension résistif (R1/R2) et aux extrémités de la résistance de mesure

R2 le bouton de montée de la vitesse de la rampe de tension d'essai est commandé manuellement.

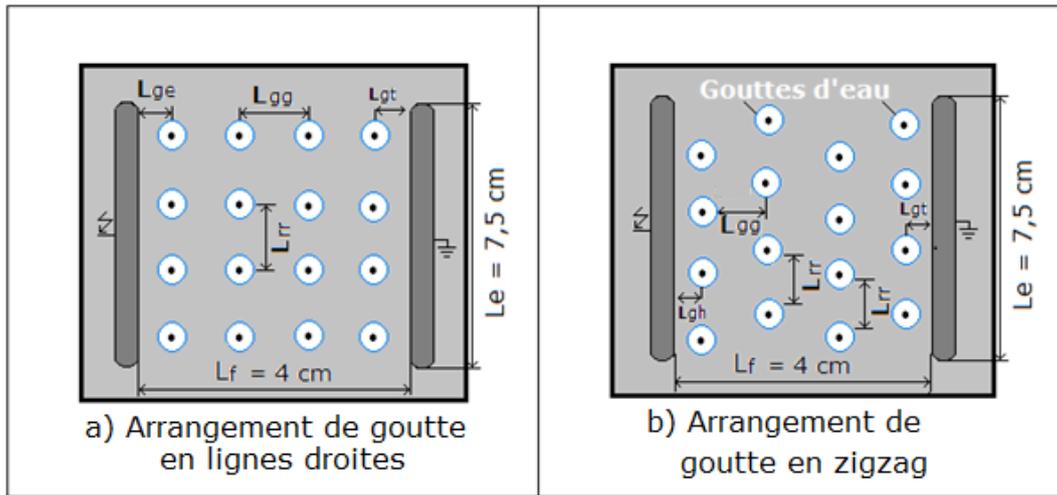


Fig. V. 6: Types d'arrangements de gouttes d'eau ligne droite et zigzag

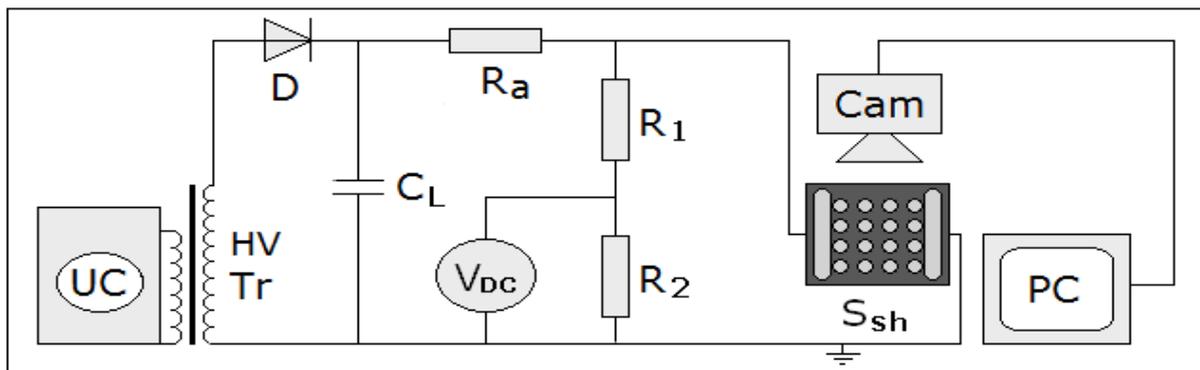


Fig. V. 7: Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes

Le nombre d'éprouvettes exploité pour chaque polarité DC+ est pris égal à 20. A la fin des essais de chaque série des 20 échantillons de l'isolation.

### V. 3 Résultats et discussions

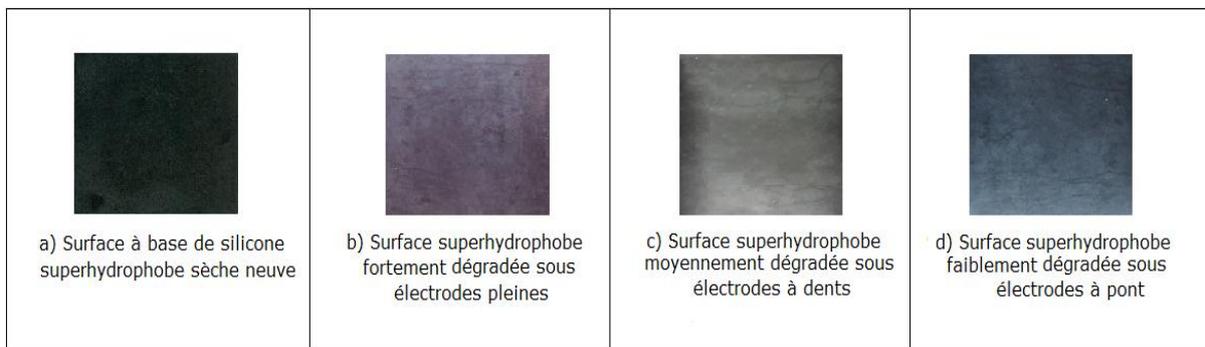
#### V.3.1 Tension de contournement de l'isolation superhydrophobe sèche

Après fabrication de plusieurs échantillons de l'isolation superhydrophobe, certains d'entre eux ont été essayés sous tension continue positive à sec dont les valeurs moyennes acquises en fonction de la géométries HT et terre sont résumées dans le tableau V.1. Il en découle que leur tension de contournement sous électrodes à pont est plus grande que celle à dents et pleines. La figure V.8 illustre l'état de surface de l'isolation lorsque celle-ci est neuve (Fig. V. 8a) et après une forte dégradation sous électrodes pleines (Fig. V. 8b) ou bien avoir une altération moyenne

sous électrodes à dents (Fig. V. 8c) ou bien une très faible dégradation sous électrodes à pont (Fig. V. 8d).

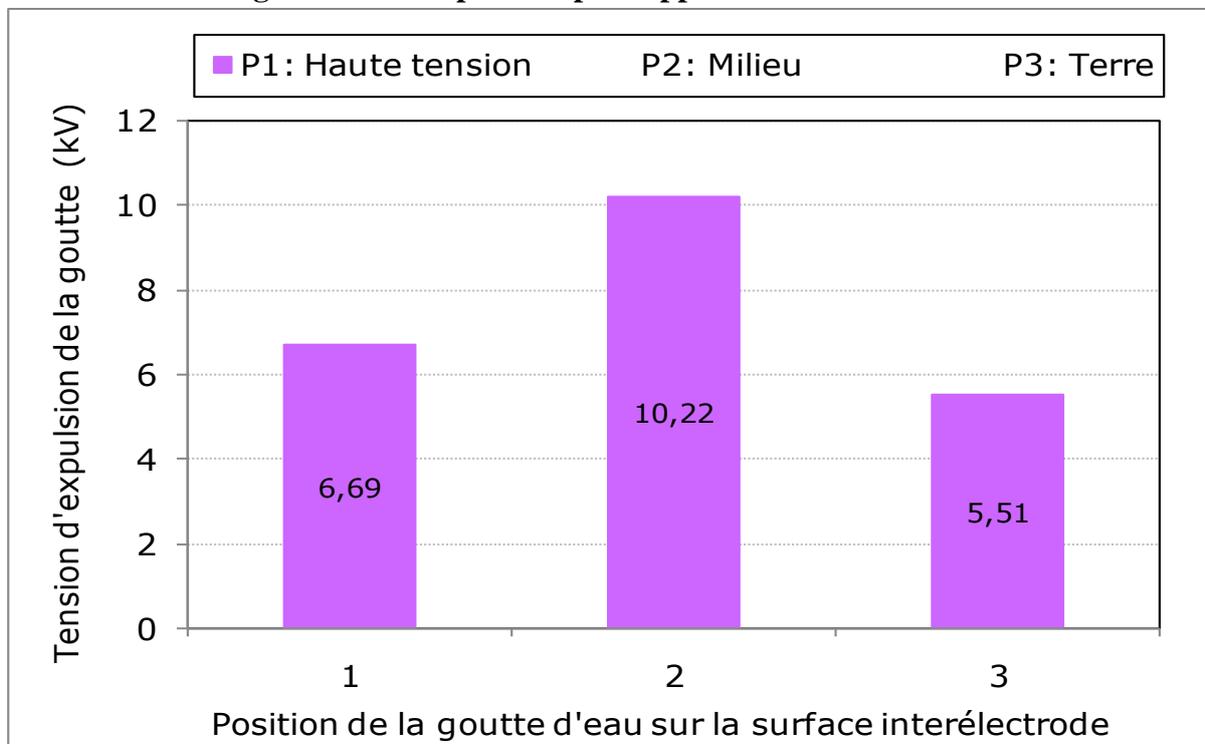
Nature des électrodes	pleines	à dents	à pont
La valeur moyenne de la tension de contournement de l'isolation sèche	39.2	43.9	48.9

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



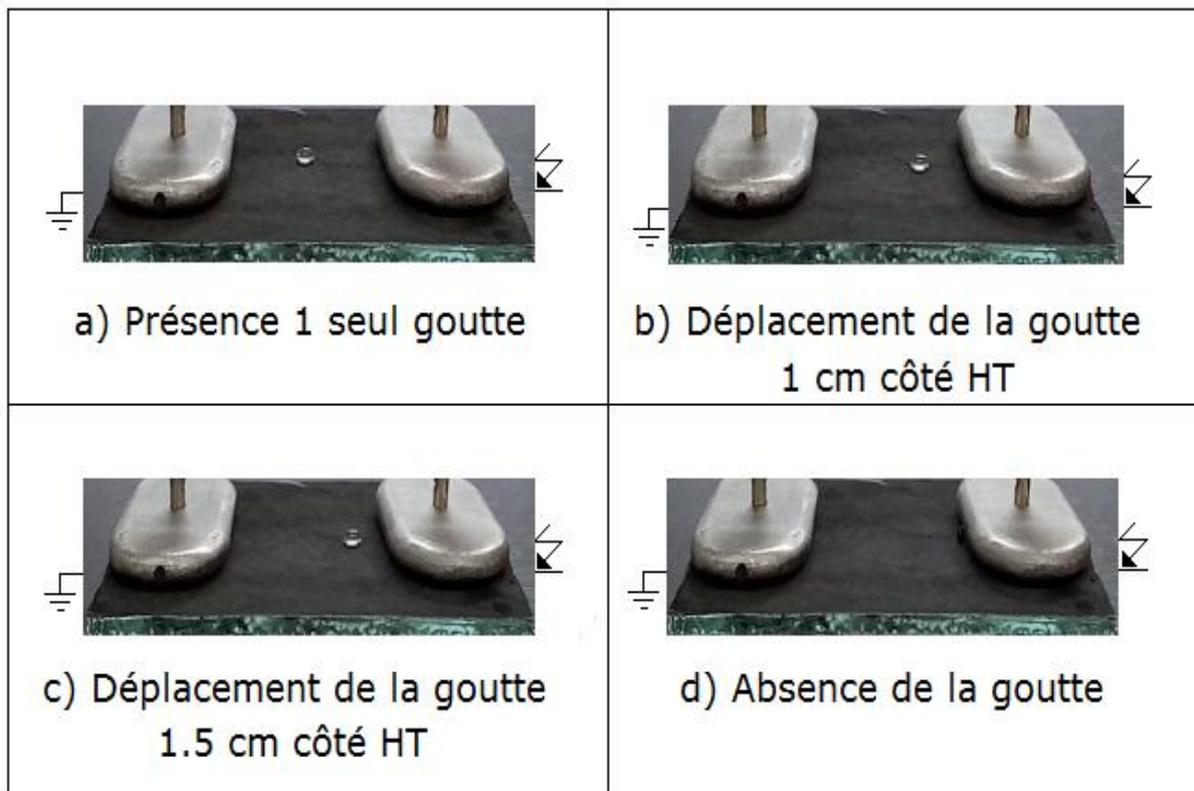
**Fig. V. 8:** Etat neuf et dégradé de la surface superhydrophobe délimité par les électrodes pleines et à dents

### V.3. 2 Nombre de gouttes et leur position par rapport aux électrodes



**Fig. V. 9:** Tension d'expulsion de la goutte d'eau en fonction de sa position sur la surface interélectrode

La figure V.9 donne l'évolution de la tension d'expulsion d'une goutte d'eau en fonction de sa position sur la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Celle-ci a été déposée manuellement à l'aide d'une pipette sur la surface du matériau en absence de tension (au voisinage de l'électrode haute tension, milieu et au voisinage de l'électrode terre). Il en résulte que la goutte est évacuée plus rapidement lorsque elle est proche de l'électrode terre et expulsé tardivement lorsque elle est localisée au milieu de la surface interélectrode. La figure V.9 montre le mouvement de la goutte d'eau le long de la ligne de fuite vers l'électrode haute tension de l'isolation superhydrophobe.



**Fig. V. 10:** Différentes étapes de déplacement d'une goutte d'eau sur la surface interélectrode

La figure V.11 illustre l'allure de la tension d'évacuation de deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la surface interélectrode de l'isolation superhydrophobe. Il en découle que les gouttes sont expulsées séparément et que l'expulsion est plus rapide lorsque les gouttes d'eau se trouvent au milieu que lorsqu'elles sont proches des électrodes terre et haute tension.

La figure V.12 montre que les gouttes sont expulsées ensemble et que l'expulsion est plus rapide lorsque les gouttes d'eau se trouvent au milieu que lorsqu'elles sont proches des électrodes terre et haute tension.

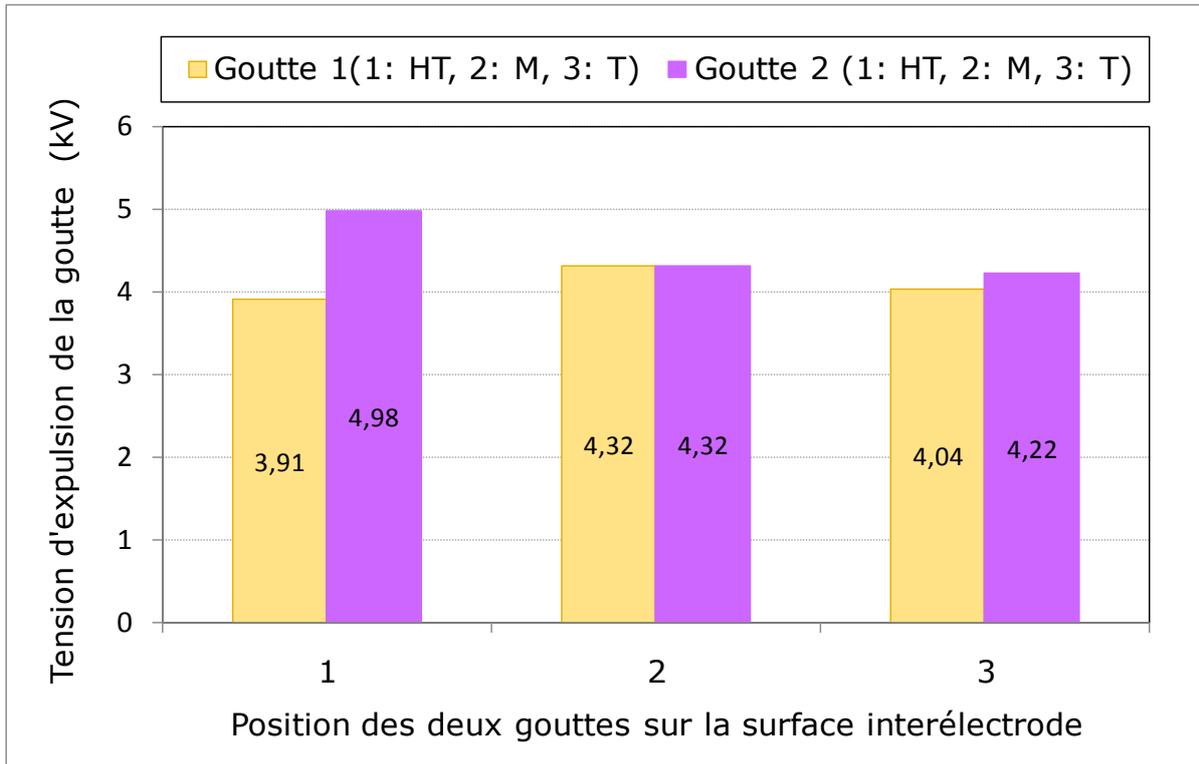


Fig. V. 11: Tension d'expulsion séparément des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la surface interélectrode

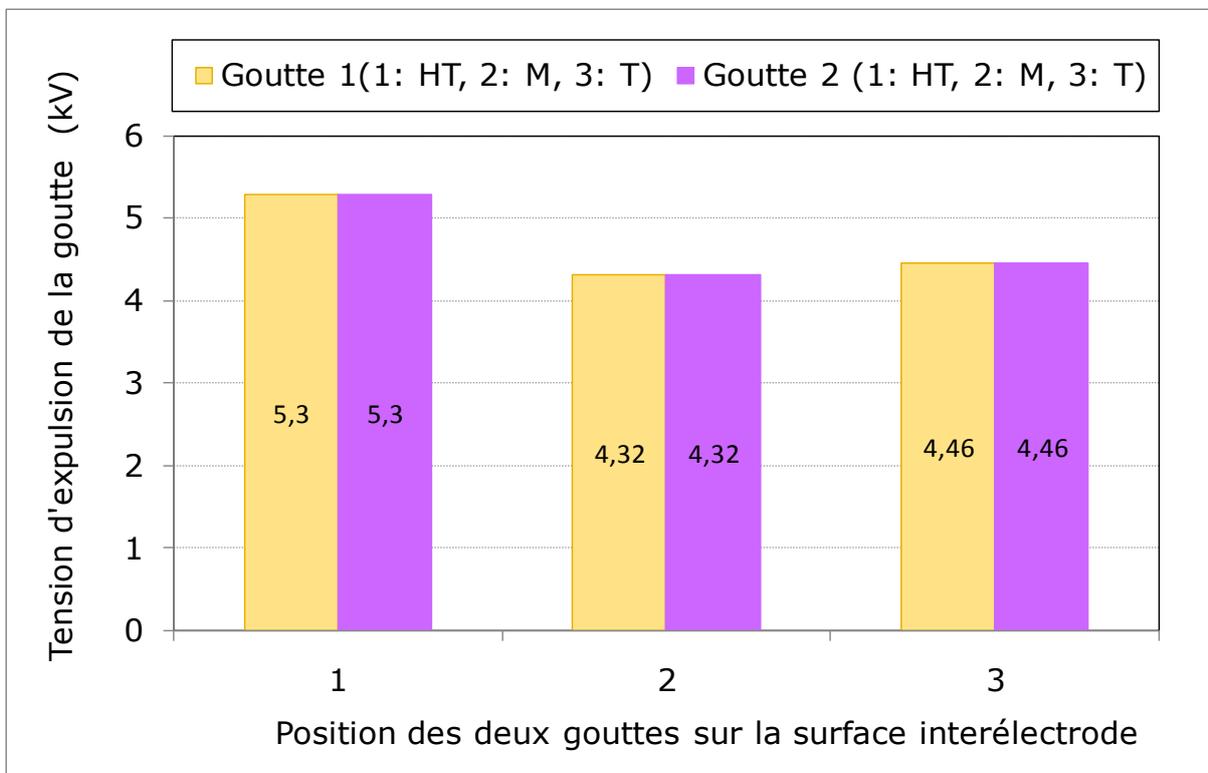
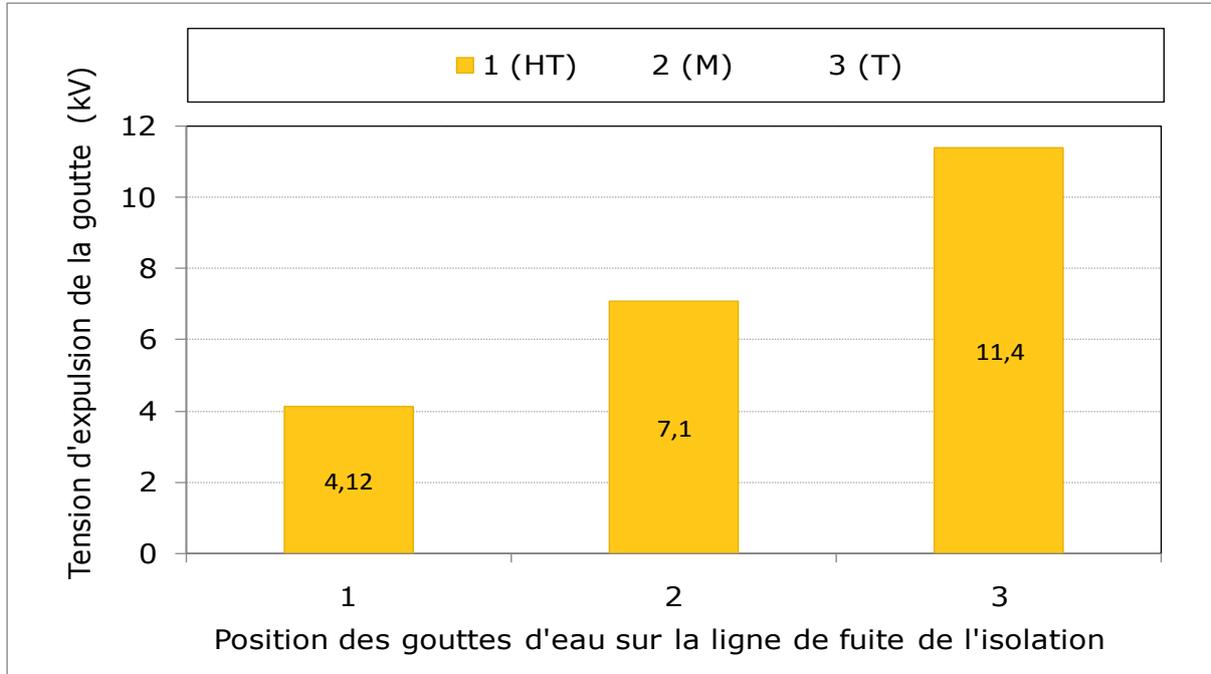
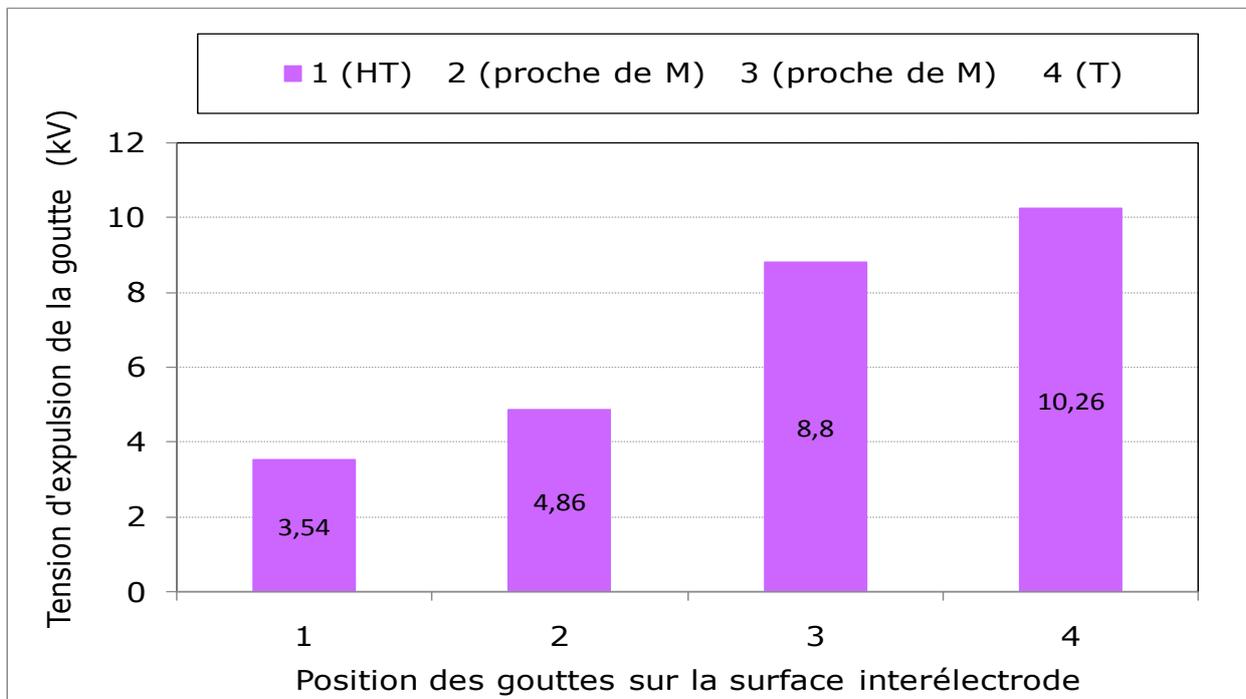


Fig. V. 12: Tension d'expulsion simultanément des deux gouttes d'eau en fonction de leur position sur la surface interélectrode

La figure V.13 donne l'allure de la tension d'expulsion de trois gouttes d'eau en fonction de leur position sur la surface interélectrode de l'isolation superhydrophobe. Il en résulte que l'expulsion intervient d'abord la goutte proche de HT en suite celle du milieu et enfin celle proche de l'électrode terre.

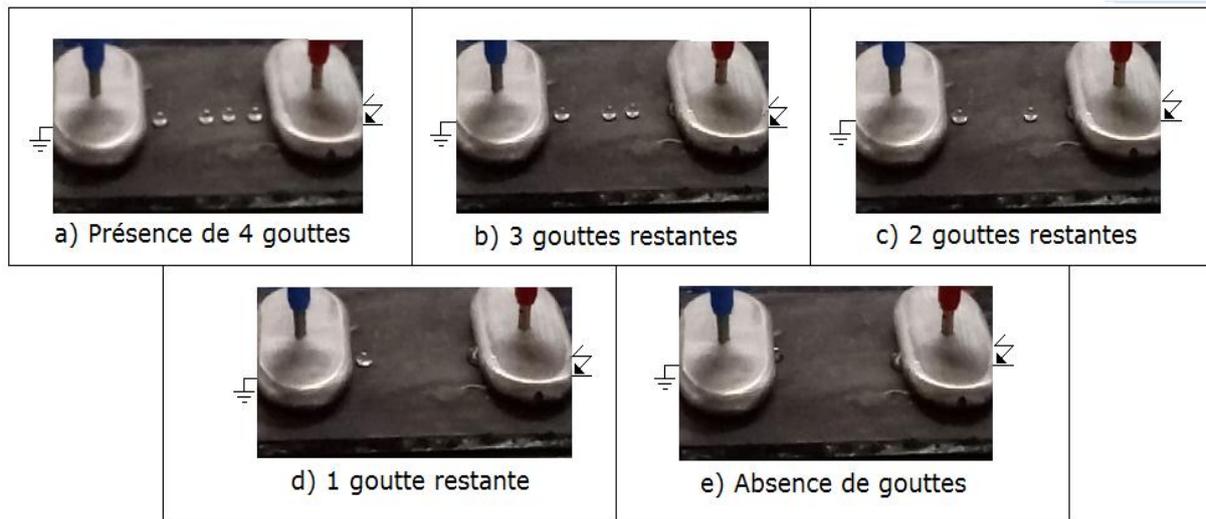


**Fig. V. 13:** Tension d'expulsion de trois gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation.



**Fig. V. 14:** Tension d'expulsion de quatre gouttes d'eau en fonction de leur position sur la ligne de fuite de l'isolation

La figure V.14 montre l'allure de la tension d'expulsion de quatre gouttes d'eau en fonction de leur position le long de la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. Il en ressort que la tension d'expulsion de la goutte augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'électrode haute tension vers celle mise à la terre. La figure V.14 montre le mouvement de quatre gouttes d'eau le long de la ligne de fuite vers les électrodes haute tension et terre de l'isolation superhydrophobe.



**Fig. V. 15 :** Phases essentielles de déplacement de quatre gouttes d'eau sur la ligne de fuite d'une isolation superhydrophobe

### V.3. 3 Type d'arrangement de gouttes d'eau

La figure V.16a a été obtenue suivant deux types d'arrangement de gouttes d'eau conformément à la figure V.6. Selon cette figure, les gouttes d'eau sont déposées en plusieurs rangées de quatre gouttes chacune. Les rangées peuvent être des lignes droites (Fig. V. 6a) ou bien en lignes zigzags (Fig. V. 6b). Il en découle que la tension d'expulsion de la dernière goutte augmente légèrement en fonction du nombre de rangées et à partir de la troisième rangée celle-ci devient constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées. L'allure de deux courbes d'expulsion est similaire quel que soit le type d'arrangement utilisé. La tension d'expulsion sous arrangement des gouttes en ligne droite (Fig V. 16) est plus élevée que celle obtenue sous arrangement en zigzag (Fig V. 18).

Les figures V.17 et V.19 représentent les mouvements des gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe en droite et en zigzag respectivement.

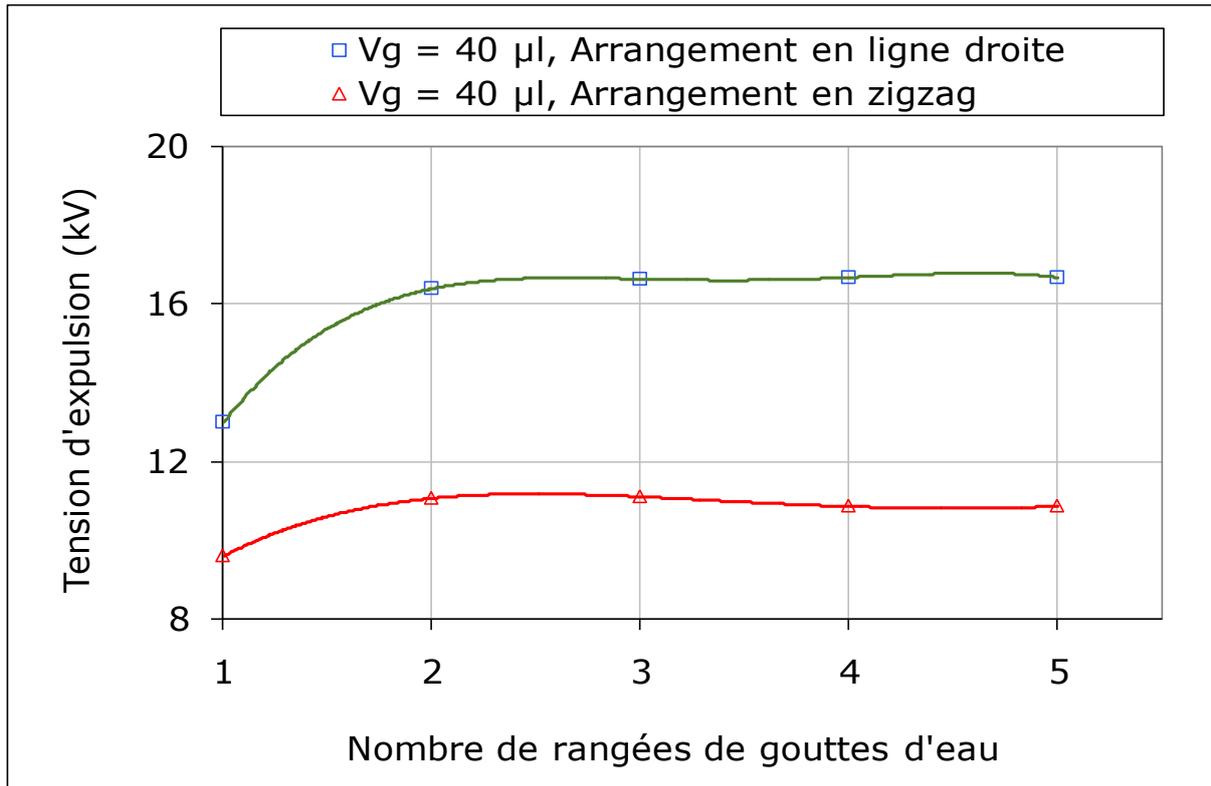


Fig. V. 16: Tension continue positive d'expulsion en fonction de la nature de l'arrangement et du nombre de rangées de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

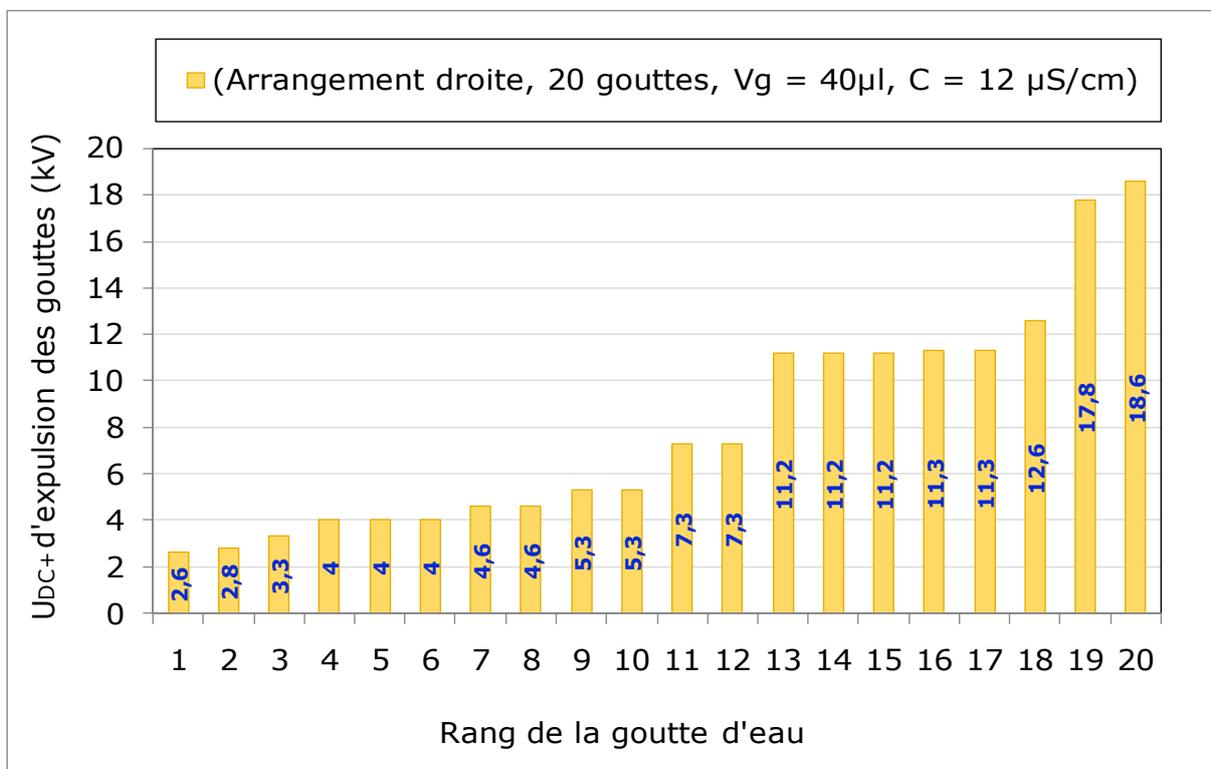
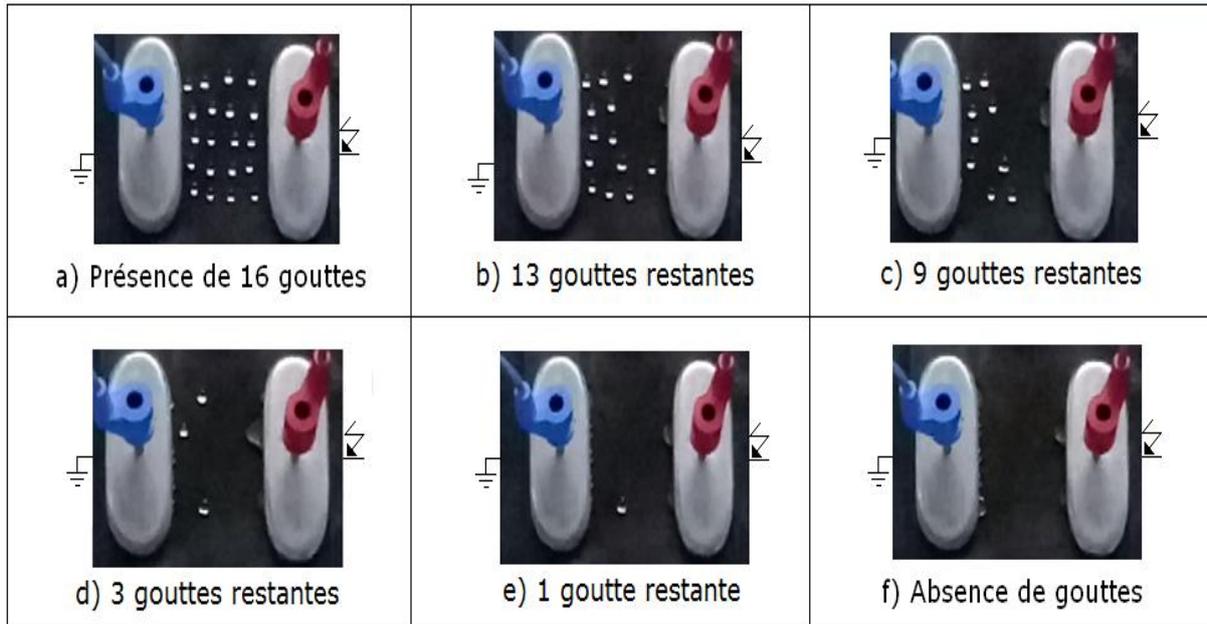
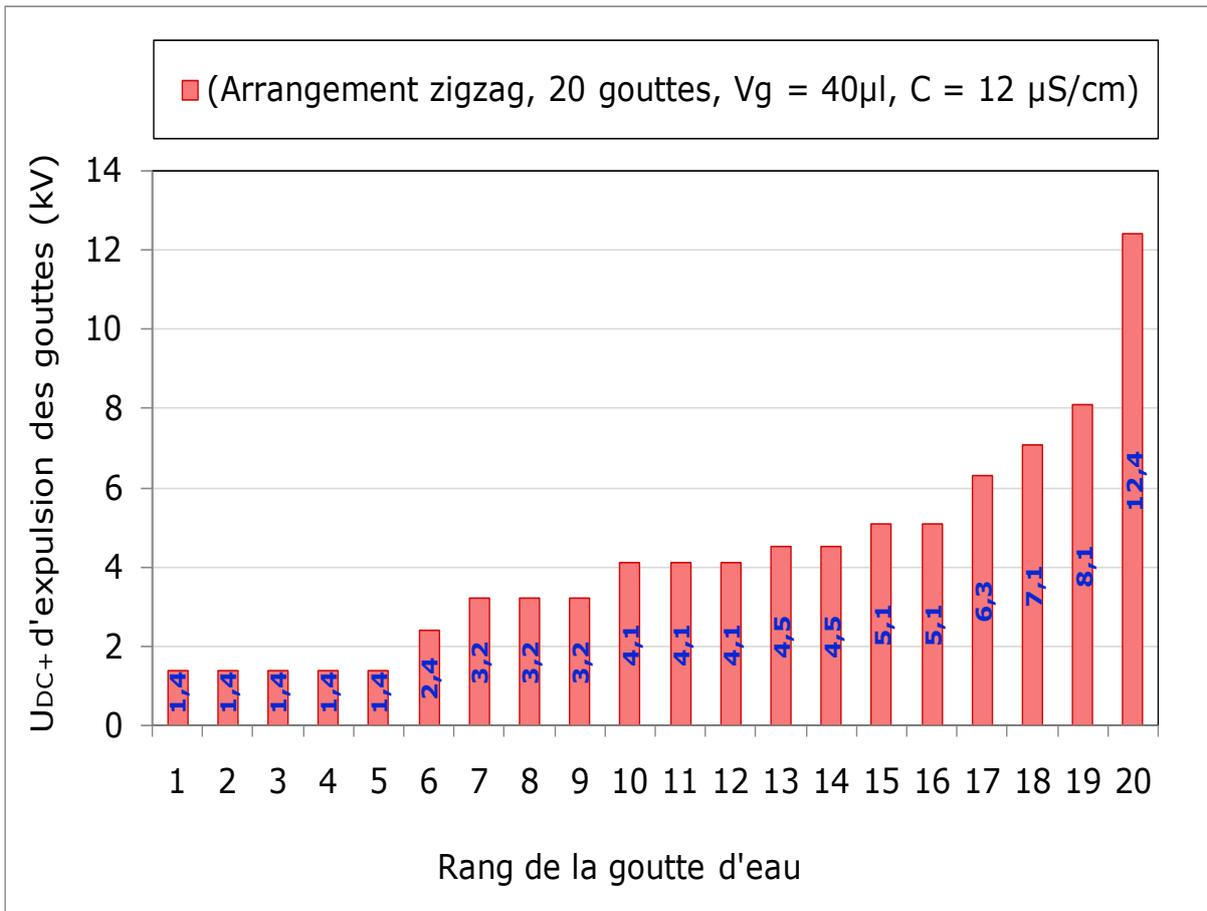


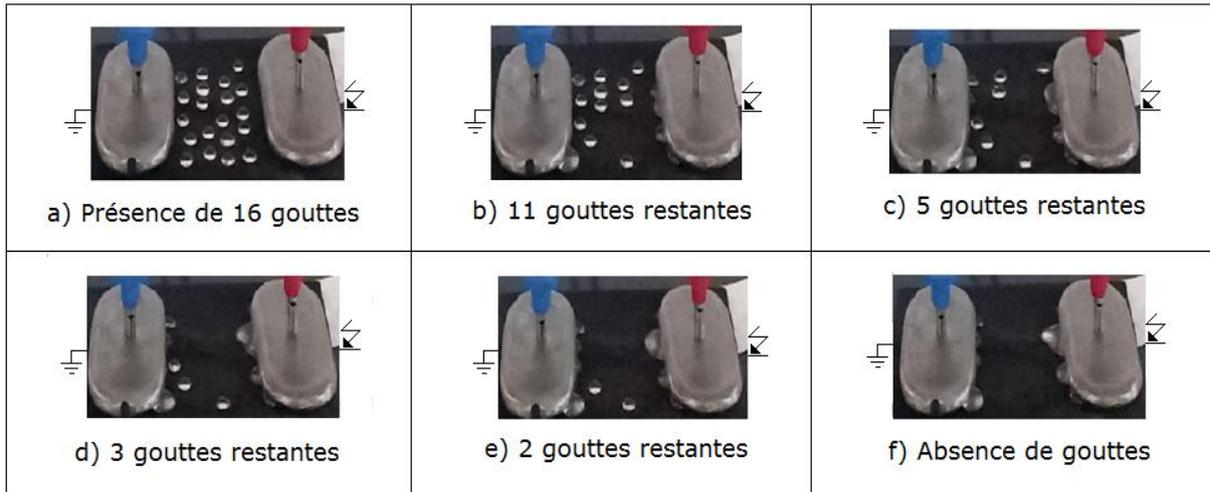
Fig. V. 17: Tension continue positive d'expulsion de gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites déposées sur l'isolation superhydrophobe



**Fig. V. 18:** Etape essentielle d'expulsion des gouttes d'eau déposées en ligne droite sur l'isolation superhydrophobe

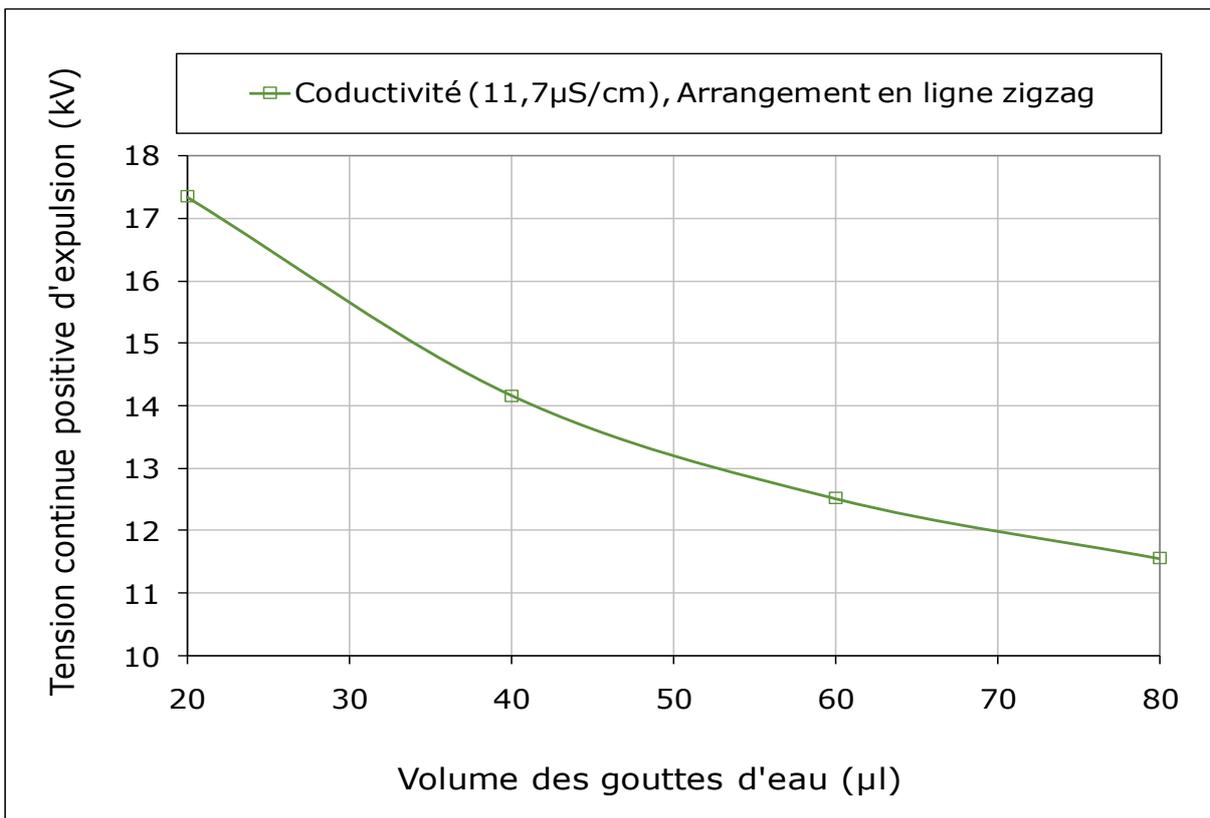


**Fig. V. 19:** Tension continue positive d'expulsion de gouttes d'eau sous arrangement en lignes zigzags déposées sur l'isolation superhydrophobe



**Fig. V. 20 :** Etape essentielle d’expulsion des gouttes d’eau déposées en ligne zigzag sur l’isolation superhydrophobe

**V. 3. 4 Volume des gouttes d’eau**

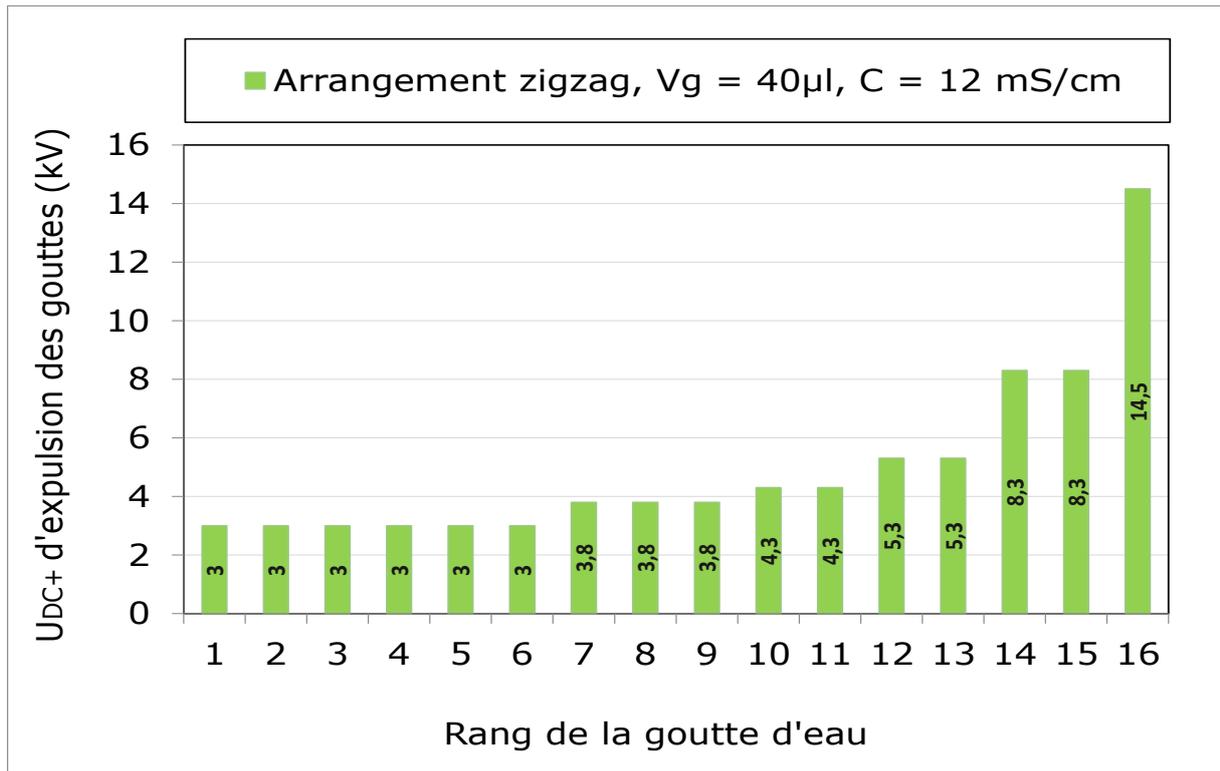


**Fig. V. 21:** Tension continue positive d’expulsion en fonction du volume des gouttes d’eau déposée sur la surface de l’isolation superhydrophobe

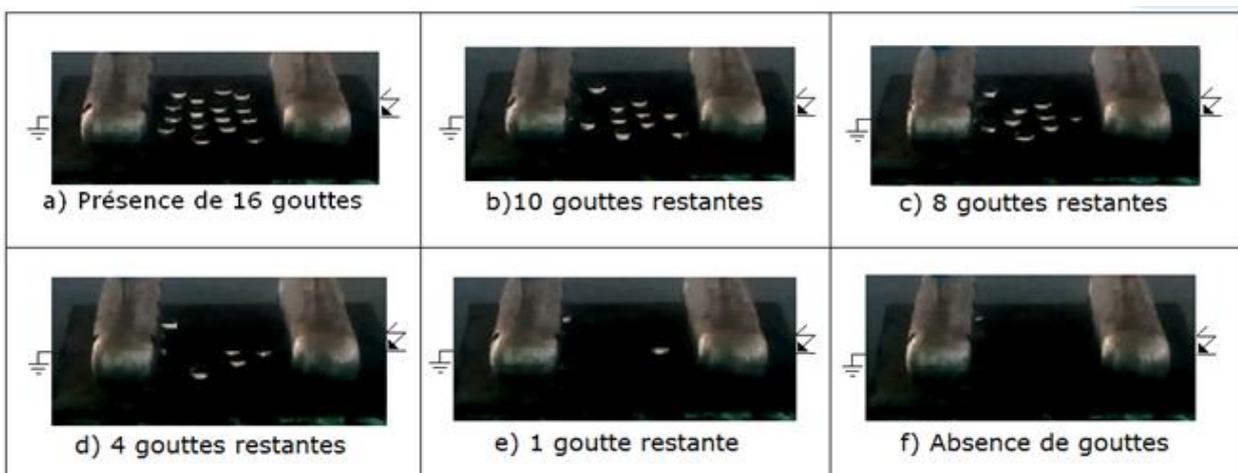
La figure V.21 montre l’allure de la tension d’expulsion en fonction du volume. Il en résulte que celle-ci diminue avec l’élévation du volume. Ceci peut être expliqué par le fait que les

gouttes de petite taille exigent une tension d'évacuation plus élevée que les gouttes de grande taille car elles s'accrochent aux aspérités de la surface superhydrophobe.

La figure V.22 illustre la tension d'expulsion en fonction du nombre de gouttes avec un volume de 40µl, et les résultats obtenus nous montrent le déplacement de 16 gouttes d'eau par groupes à des valeurs de tension d'expulsion différentes. Ce mode de déplacement est décrit par la figure V.23 montrant les étapes essentielles d'évacuation des gouttes d'eau.



**Fig. V. 22:** Tension d'expulsion des gouttes en fonction du nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe (Vg=40µl)



**Fig. V. 23:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau de 40µl déposées sur l'isolation superhydrophobe

La figure V.24 montre la tension d'expulsion en fonction de nombres de gouttes avec un volume de 60 $\mu$ l. Il en résulte un déplacement séparé des gouttes d'eau (en escalier) à des tensions d'expulsion différentes.

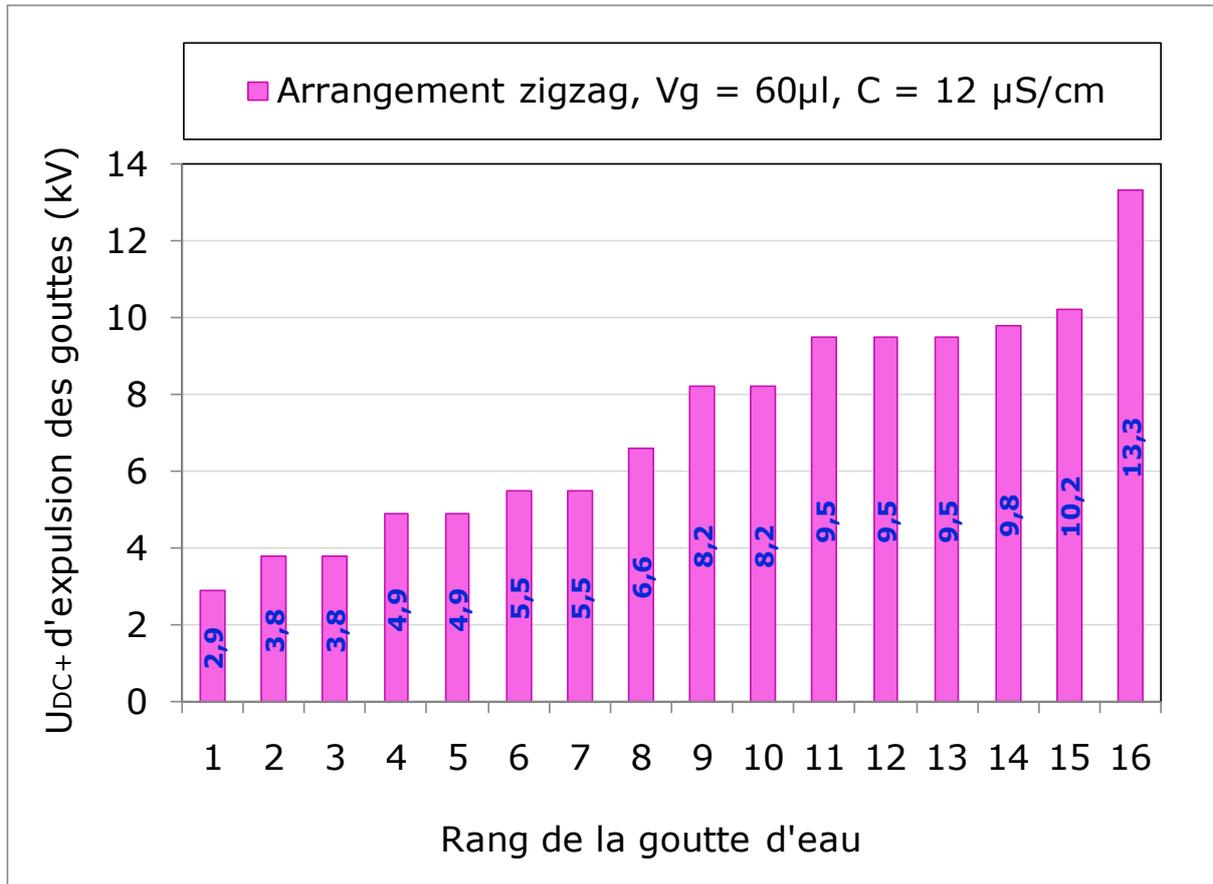
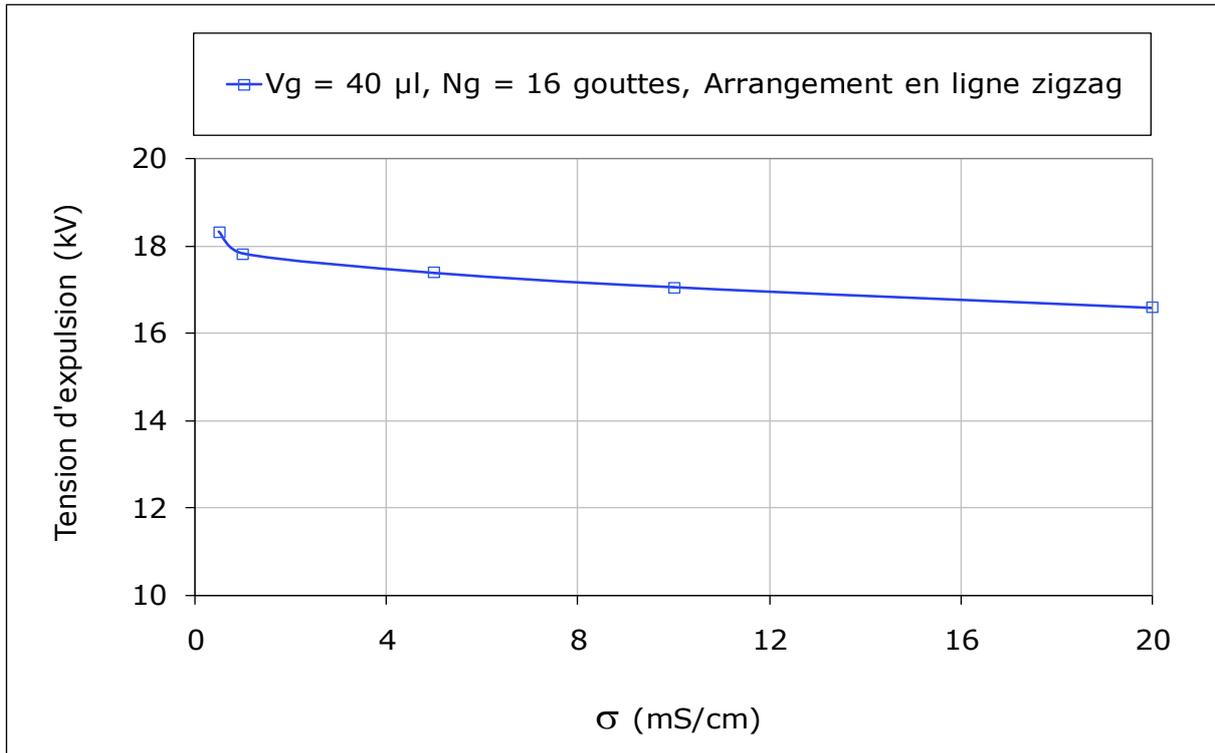


Fig. V. 24: Tension d'expulsion en fonction du nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_g=60\mu$ l)

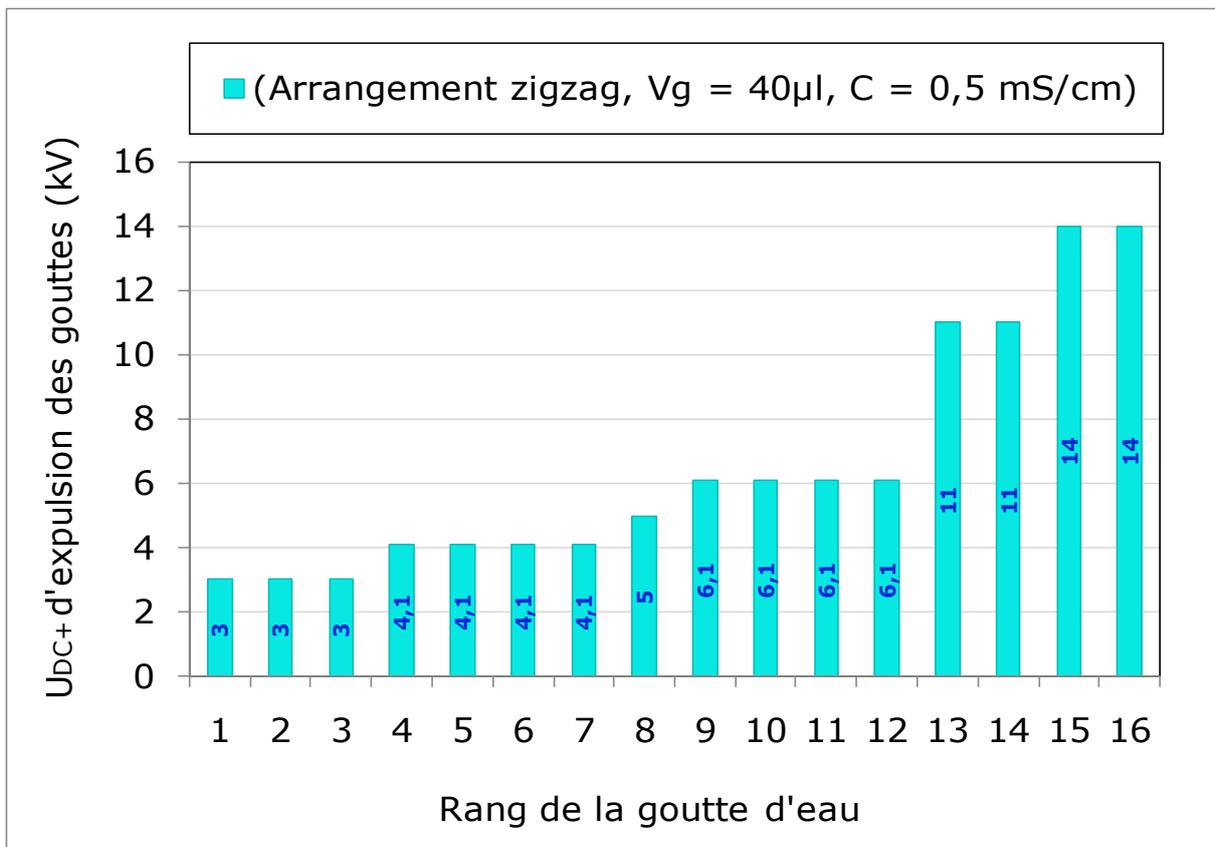
### V.3. 5 Conductivité électrique des gouttes d'eau

La figure IV. 25 illustre l'effet de la conductivité électrique des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe sur leur tension d'expulsion. Il en découle un déclin négligeable de la tension d'évacuation des gouttes d'eau. Ceci est dû à la polarisation des gouttes entre le cas où elles sont isolantes ( $\sigma_v \leq 1$  mS/cm) et le cas où elles sont conductrices ( $\sigma_v > 1$  mS/cm).

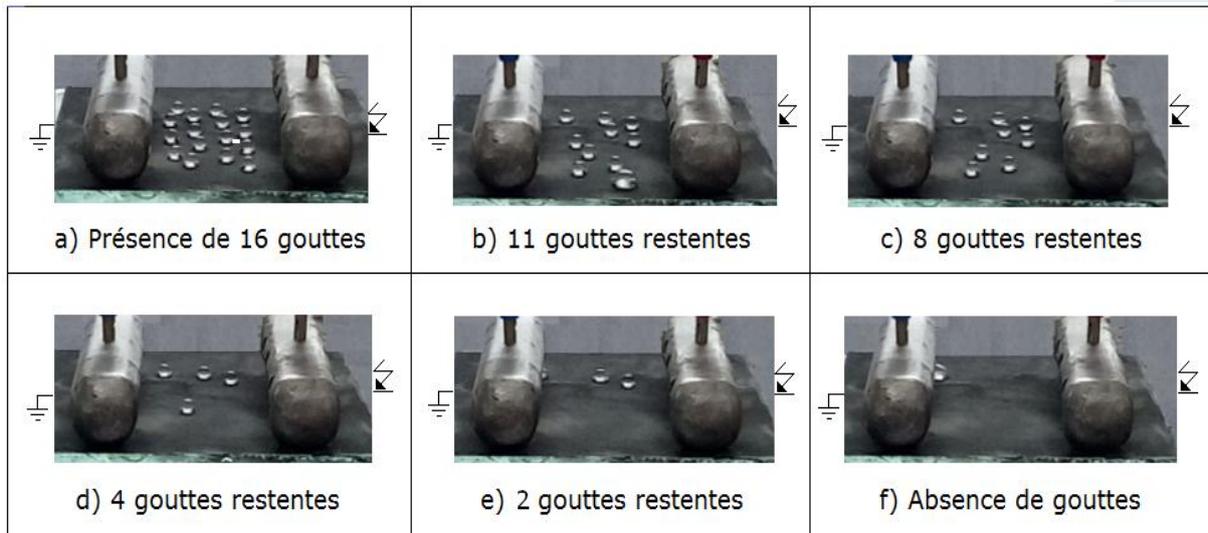
La figure V.26 représente la tension d'expulsion en fonction du nombre de gouttes avec une conductivité électrique de 0.5 mS/cm. Les résultats obtenus nous donnent le mouvement d'un des gouttes d'eau par groupes (par paliers) à valeurs de tension d'expulsion différentes. Ce genre d'évacuation est décrit par la figure V. 27 donnant les principales phases de libération de la surface superhydrophobe de l'isolation.



**Fig. V. 25:** Tension continue positive d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

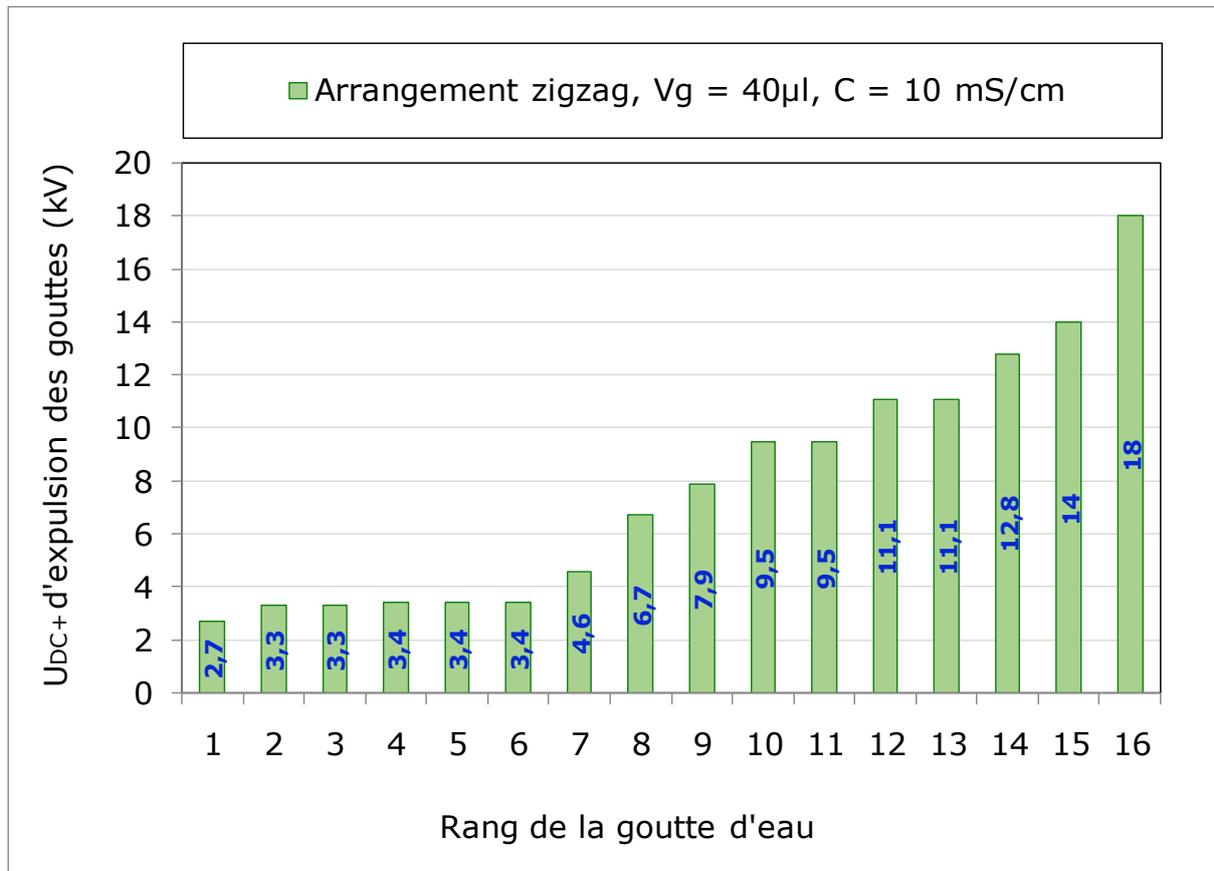


**Fig. V. 26:** Tension d'expulsion des gouttes en fonction du nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $C=0.5\text{mS/cm}$ ,  $V_g=40\mu\text{l}$ ).



**Fig. V. 27:** Etape essentielle d'expulsion des gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe

La figure V.28 représente la tension d'expulsion en fonction du nombre de gouttes d'eau à une conductivité électrique égal à 10 mS/cm. Les résultats obtenus nous montrent le déplacement séparé des gouttes d'eau à des tensions d'expulsion différentes.



**Fig. V. 28:** Tension d'expulsion en fonction de nombre de gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $C=10\text{mS/cm}$ ,  $V_g= 40\mu\text{l}$ )

V.3. 6 Masse du kaolin mélangé aux gouttes d'eau

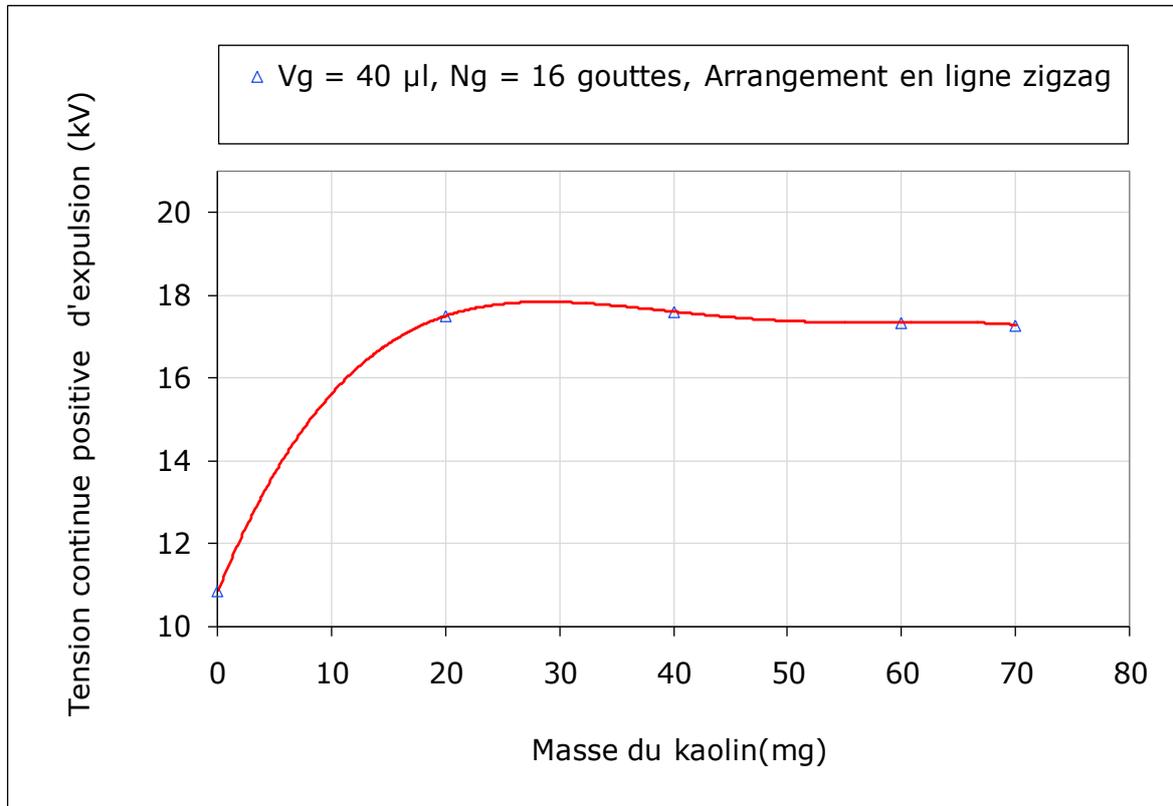


Fig. V. 29: Tension d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe

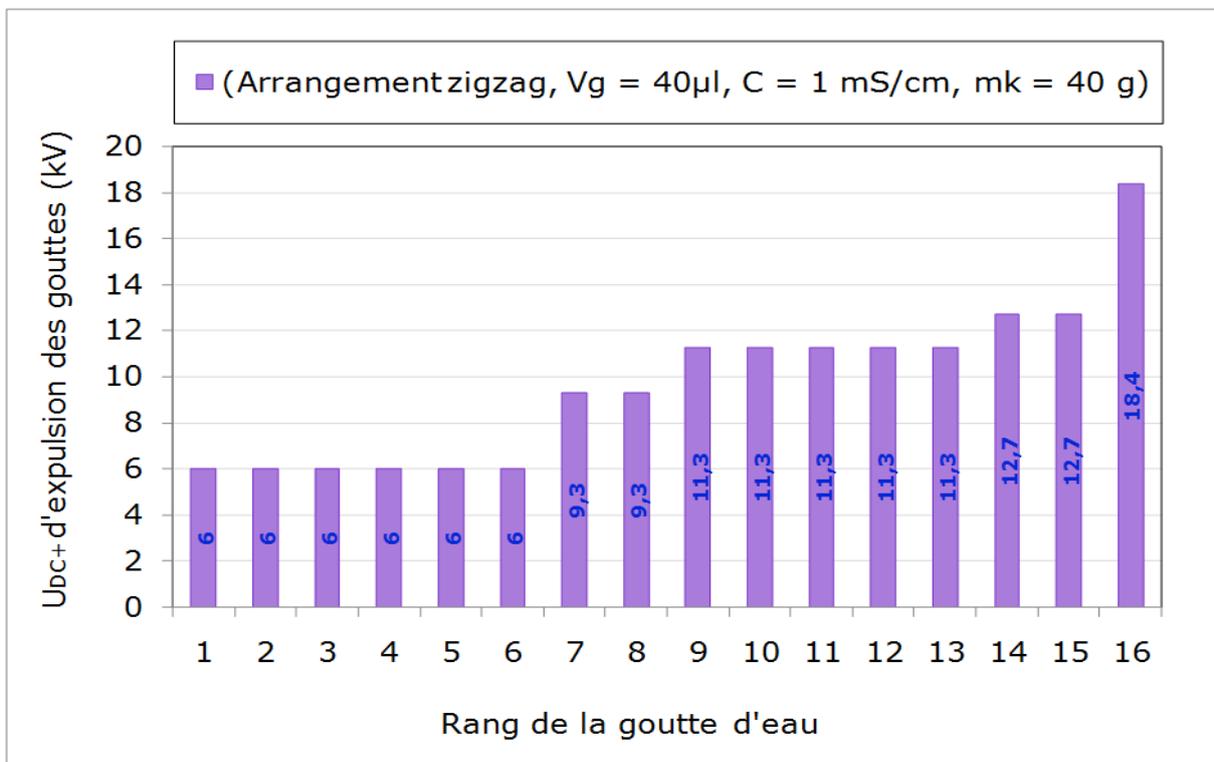
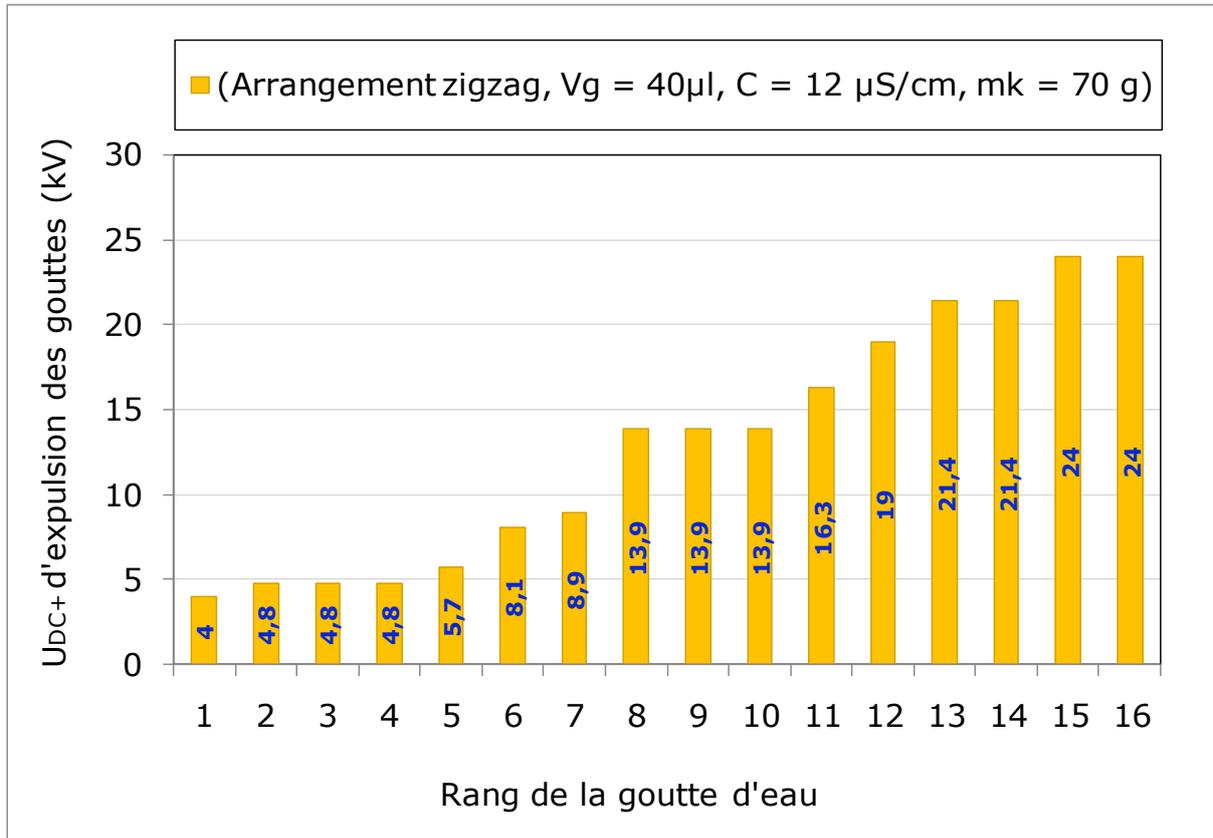
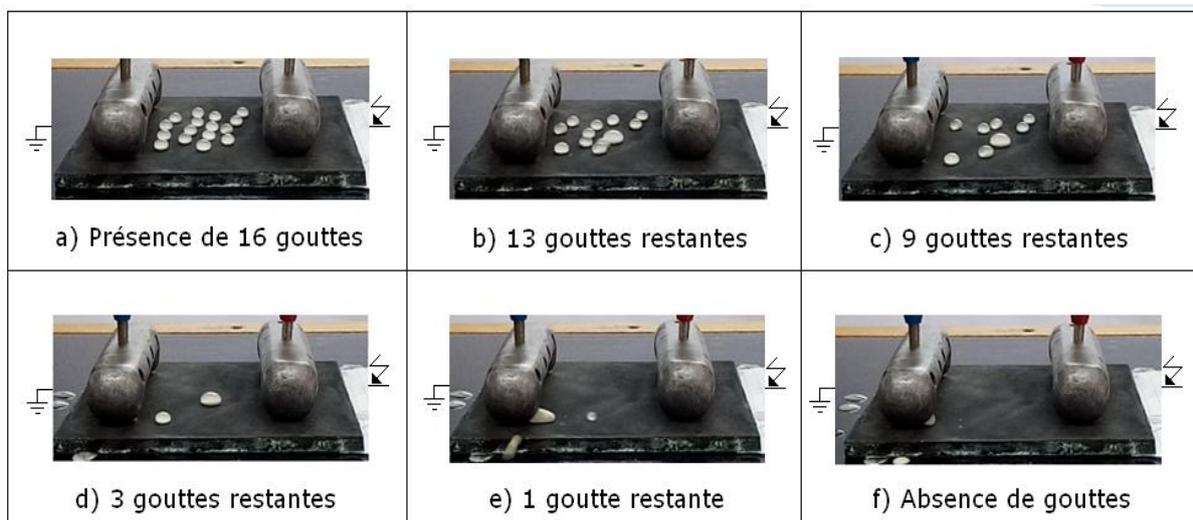


Fig. V. 30: Tension continue positive d'expulsion des gouttes de la masse du kaolin d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

La figure V.29 a été obtenue en augmentant la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau. Il en découle que la tension d'expulsion de la dernière goutte augmente en fonction de la masse du kaolin et à partir de 40 mg la tension d'évacuation de la dernière goutte reste constante quelle que soit la masse du kaolin ajoutée.



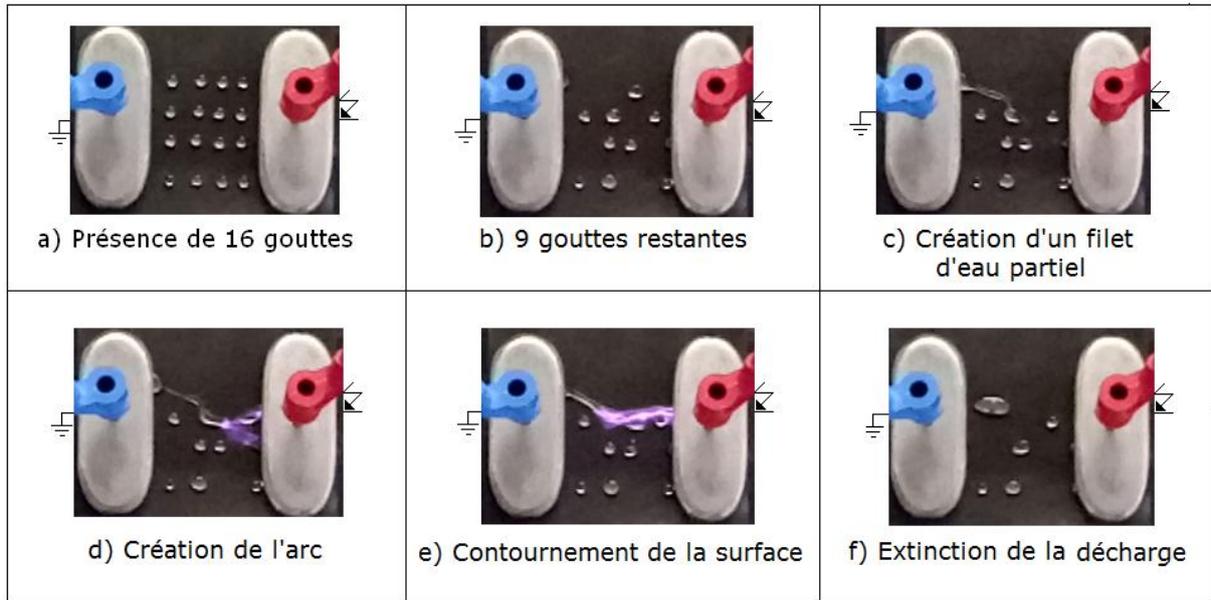
**Fig. V. 31:** Tension continue positive d'expulsion en fonction des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe



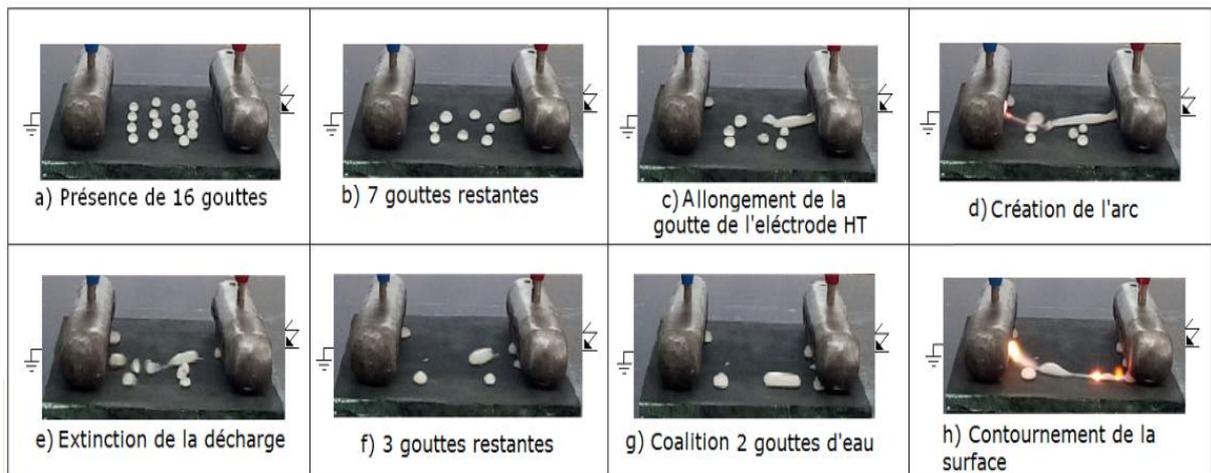
**Fig. V. 32:** Etape essentielle d'expulsion des gouttes d'eau de la masse du kaolin déposées sur l'isolation superhydrophobe

Les figures V.30 et 31 donne respectivement les tensions d'expulsion en fonction du nombre de gouttes d'eau. Quelle que soit la masse du kaolin ajoutée, les deux types d'évacuation des gouttes d'eau (expulsion par groupe ou individuelle) sont présents. Le mode d'expulsion est décrit par la figure V.32 donnant les phases essentielles d'expulsion des gouttes.

### V.3. 7 Géométrie des électrodes haute tension et terre



**Fig. V. 33:** Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes pleines



**Fig. V. 34:** Contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes à dents

Les figures V.33 et V.34 illustrent le contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes pleines et à dents. Il en ressort une expulsion incomplète des gouttes d'eau,

coalescence de certaines gouttes, formation de filets, accrochage des gouttes au niveau des électrodes HT et terre et enfin apparition des décharges partiel et de contournement de la surface de l'isolation superhydrophobe quel que soit le profil des électrodes suscitée. Par contre la géométrie de l'électrode à pont de par sa forme, elle empêche le collage des gouttes et la naissance de décharges électriques partielles (voir fig V. 23).

#### **V. 4 Conclusion**

L'objectif recherché à travers ce chapitre consiste en l'étude du comportement dynamique des gouttes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe sous tension continue positive. A cet effet des échantillons de surface superhydrophobe à l'angle de contact est de l'ordre de 158°.

Ont été conçus et réalisés par nous-même. La quantification de l'influence de certains paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau déposées manuellement sur les surfaces fabriquées a mené aux résultats essentiels suivants:

- Quels que soient le nombre de gouttes, de rangées, type d'arrangement, volume, conductivité électrique et de masse de kaolin ajoutée aux gouttes d'eau, celles-ci quittent la surface superhydrophobe soit individuellement, par groupe ou mixte dans les pire des cas à une tension égale à 50% de la tension de contournement de l'isolation sèche.
- Un profil d'électrode a été conçu et réalisé de telle sorte qu'aucune goutte expulsée par la surface superhydrophobe ne puisse s'attacher à celle-ci, lorsque l'isolation est mise sous tension proche de la tension de contournement de celle-ci.

## Conclusion générale

L'étude du comportement électrique d'une isolation superhydrophobe sous l'impact de gouttes d'eau et tension continue positive a mené aux résultats essentiels suivants:

- Une surface superhydrophobe isolante à base de silicone a été confectionnée dans le cadre de cette étude.

- Des investigations de quantification de l'effet de certains paramètres géométriques et électriques de gouttes d'eau recouvrant les surfaces suscitées sur la tension de leur expulsion a donné les principaux résultats suivants:

- Quels que soient le nombre de gouttes d'eau déposé sur la surface superhydrophobe considérée, le nombre de rangées, les types de leur arrangement, leur volume, leur conductivité électrique, la masse du kaolin ajoutée, ces perles d'eau abandonnent cette surface soit individuellement ou par groupe ou mixte, dans les pires des cas a une tension égale 50% de la tension de contournement de la même isolation sous atmosphère sèche. Concernant le nombre de gouttes d'eau celui-ci fait augmenter leur tension d'expulsion. En ce qui concerne le nombre de rangées, il existe une limite au-delà de laquelle la tension d'évacuation des gouttes d'eau est indépendante quel que soit le nombre de rangées ajoutées. La tension d'expulsion sous arrangement zigzag est plus petite sous arrangement en lignes droites. Un grand volume de goutte d'eau nécessite une tension d'évacuation plus faible. La conductivité électrique des gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur la tension de leur expulsion. La tension d'expulsion de la dernière goutte augmente en fonction de la masse du kaolin et à partir de 40 mg la tension d'évacuation de la dernière goutte reste constante quelle que soit la masse du kaolin ajoutée.

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

## REFERENCES

- [1] «Les surfaces naturelles super hydrophobes», document word.
- [2] Xue Yanpeng, «Voie innovante pour la nano micro texturation de surfaces métalliques à base d'assemblage de nanoparticules d'Or : application superhydrophobe», mémoire, 26 juin 2014.
- [3] Elina moncada-potignon, Emmanuelle guerret, professeur encadrant : M.Merilhou, «olympiades de physique» 2014-2015.
- [4] Jean-Denis brassard, « revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d'applications en aérodynamique», l'université du Québec à Chicoutimi, Novembre 2011, pp [1-128]
- [5] David Quéré, «Les surfaces super-hydrophobes», Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, CNRS/Collège de France, pp [1-244].
- [6] R. Boudissa, T. Boughani, « Effet de l'Angle d'Inclinaison sur la Performance Electrique d'une Isolation en Silicone Hydrophobe Recouverte de Gouttes d'Eau sous Tension Continue», article,
- [7] Rabah Boudissa and Fatma Bouchelga, «Recherche d'une inclinaison appropriée à la performance électrique optimale d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau disposées en zigzag sous DC», article, pp [1-14].
- [8] Yufeng Li, Haiyun Jin, Shichao Nie, Naikui Gao , Article in Applied Physics Letters 110(20):201602 , May 2017, DOI: 10.1063/1.4983714.
- [9] Mlle Satta Samia, contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation, mémoire, [1-9].
- [10] R. Boudissa et F. Bouchelga, effet des décharges électriques parallèles sur la performance d'une isolation en verre non uniformément polluée sous tension continue, article.....pp [1-11].

[11] R. Boudissa and F. Bouchelga, "Recherche d'une inclinaison appropriée à la performance électrique optimale d'une isolation en silicone recouverte de gouttes d'eau disposées en zigzag sous DC", IEEE, 2017.

[12] A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Thèse de Magister, Génie électrique, ENP 1990.

[13] W. Heise, G. F. Luxa, G. Revrery et M. P. Verma, "Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide", CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.

[14] D. Namane, "Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Février 1998.

[15] N. Lahoud, "Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique application à la fiabilité des matériaux». Thèse de doctorat de l'université Toulouse III – Paul Sabatier. Mars 2009.

[16] E. Aubert, "Diagnostic optique du vieillissement électrique des résines époxydes sous faible champ électrique". Thèse de doctorat de l'université Toulouse III – Paul Sabatier, novembre 2008.

[17] A. Cimador, S. Vitet, "La pollution des isolateurs", EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.

[18] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. D. Deut. Akad, 1990.

[19] Massioune, Tharounsaid, "Caractérisation des décharges électriques évoluant dans l'intervalle d'air pointe-barrière diélectrique polluée-pointe sous tension continue négative", PFE Master THT, U. A. M. Bejaïa 2015.

[20] M. Tegar, "Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques". Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, 2003.

[21] The versatile high-end instrument for analyzing coatings and wetting processes.

[22] IEC 62271-304, « Technical Specification of design classes for indoor enclosed switchgear and controlgear from 1 kV and up to and including 52 kV to be used in severe climatic conditions », High voltage Switchgear and controlgear-PART 304.

[23] Logiciel AUTOMGEN8 VERSION 8.9.

## Documents internet

[24]<https://www.kruss-scientific.com/fr/produits/angle-de-contact/dsa100/drop-shape-analyzer-dsa100/>.

## Résumé

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressées à l'étude du comportement dynamique des gouttes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe mise sous tension continue positive. A cet effet des échantillons de matériaux superhydrophobes à base de silicone et ayant une valeur de l'angle de contact égale à  $158^\circ$ , ont été confectionnés par nos propres mains. L'effet des facteurs géométriques (nombre de gouttes, leur volume, leur arrangement, la masse du kaolin ajoutée à celles-ci) et électriques (conductivité électrique) sur la tension continue positive de leur évacuation de la surface des échantillons ainsi fabriquées a été quantifié. Un dispositif semi-automatique de dépôt de gouttes d'eau sur la surface de telles isolations superhydrophobes ainsi qu'un système de visualisation de leur expulsion en dehors de cette surface ont été utilisés.

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

- Une géométrie d'électrodes a été conçue et réalisée de telle sorte qu'aucune goutte rejetée par la surface superhydrophobe des échantillons fabriqués ne puisse se coller sur celles-ci, lors de l'application d'une tension continue positive voisine de celle de contournement de la dite surface.
- La tension d'expulsion des gouttes d'eau de faible volume et plus grande que lorsque leur taille est plus élevée.
- Il existe une limite du nombre de rangées de gouttes d'eau au-delà de laquelle la tension de leur évacuation demeure constante quel que soit le nombre de rangées de gouttes d'eau ajoutées.
- La tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe considérée est plus élevée sous un arrangement en lignes droites qu'en zigzag.
- Il existe une valeur limite de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau au-delà de laquelle la tension d'évacuation de celles-ci reste inchangée indépendamment de la masse du kaolin ajoutée à celles-ci.
- la conductivité électrique des gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur la tension de leur expulsion de la surface superhydrophobe considérée.

**Mots clés:** isolation superhydrophobe, expulsion des gouttes d'eau, décharges électriques, contournement.