

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA**  
**Faculté De Technologie**  
**Département de Génie Electrique**



**Mémoire de fin d'étude**

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

Option: Réseaux électriques

**Thème**

Effet des paramètres électrogéométriques des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension alternative 50 Hz

Présenté par :

M<sup>elle</sup> : HADDADI Meriem

M<sup>elle</sup> : HALLOUANE Nassia

Soutenu publiquement le 24 juin 2019 devant le jury composé de:

M<sup>elle</sup> N. ROUHA

MCA

U.A.M. Bejaia

Présidente

Mr M. LARBA

MCB

U.A.M.Bejaia

Examineur

Mr R. BOUDISSA

Professeur

U.A.M.Bejaia

Rapporteur

Mr K. HAMOUR

Doct

U.A.M.Bejaia

Co-Rapporteur

Année Universitaire 2018/2019



# *Dédicaces*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon soutien moral et source de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde pour moi, à toi mon père.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence de ce jour, à mes frères, tous mes amis (es), ma Ninou, Kenza, Tarik, Mohamed et Lyes, groupe R-E et à tous mes enseignants.*

*A ma copine Meriem et toute la famille Haddadi.*

*A celui que j'aime beaucoup et qui ma encouragé qui a été toujours à mes côtés durant mon chemin d'études, Hichem.*

*H. Nassia*

# Dédicaces

A Nadjim, qui me soutient toujours dans le meilleur et dans le pire

A mes chères parents, qui présentent un exemple pour moi,  
que dieu les protèges

A ma petite nièce nounous

A mes chères sœurs Kami, Mima, ma cousine Amel

A mon petit frère Bislam

A toute l'équipe de la HT en particulier Nassia

Au groupe R-E et à tous mes enseignants que je  
remercie pour le plus qui m'ont apporté  
et à qui je dédie ce travail

H. Meriem





# *Remerciement*

# *Remerciement*

*Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance au bon DIEU de nous avoir donné le courage et la force durant nos études.*

*Concernant notre projet de fin d'étude, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre travail et qui nous ont aidé lors de la rédaction de notre mémoire.*

*Nous adressons dans un premier temps nos sincères remerciements à notre promoteur R. BONDISSA, professeur à l'université de Bejaia, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Son exigence nous a grandement stimulé.*

*Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de l'université de Bejaia, qui nous a permis d'utiliser leurs matériels durant la réalisation de nos essais.*

*Nous tenons aussi à remercier notre Co-promoteur F. HAMOUR d'avoir répondu à nos questions durant tous les travaux. Il a été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.*

*Nos parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.*

*Nous aimerions exprimer notre gratitude aux membres de jury qui ont pris le temps de discuter et juger notre travail.*



# *Sommaire*

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I: Surfaces superhydrophobes et travaux antérieurs sur leur performance électrique sous tension alternative</b>	
I. 1 Introduction.....	2
I. 2 Surfaces superhydrophobes .....	2
I. 2. 1 Définitions .....	2
I. 2. 1. 1 Mouillabilité .....	2
I. 2. 1. 2 Non mouillabilité.....	2
I. 2. 1. 3 Angle de contact $\theta$ .....	2
I. 2. 2 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact .....	2
I. 2. 2. 1 Surface superhydrophile .....	2
I. 2. 2. 2 Surface hydrophile .....	2
I. 2. 2. 3 Surface hydrophobe .....	2
I. 2. 2. 4 Surface Superhydrophobe.....	3
I. 2. 3 Angle de glissement .....	3
I. 2. 3. 1 Effet Wenzel.....	4
I. 2. 3. 2 Effet Cassis-Baxter.....	4
I. 2. 4 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles .....	4
I. 2. 4. 1 Surfaces superhydrophobes naturelles .....	4
I. 2. 4. 1. 1 Insectes .....	5
I. 2. 4. 1. 2 Animaux .....	6
I. 2. 4. 1. 3 Végétaux.....	7
I. 2. 5 Matériaux superhydrophobes artificiels.....	8
I. 2. 6 Propriétés électriques .....	10

I. 2. 6. 1 Permittivité .....	10
I. 2. 6. 2 Rigidité diélectrique .....	11
I. 2. 6. 3 Résistance d'isolement.....	11
I. 2. 6. 3. 1 Résistance transversale ou volumique ( $R_v$ ) .....	11
I. 2. 6. 3. 2 Résistance superficielle ( $R_s$ ).....	11
I. 2. 6. 3. 3 Résistance d'isolement ( $R_i$ ) .....	11
I. 2. 7 Facteur de pertes.....	12
I. 2. 8 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes.....	12
I. 2. 8. 1 Dépôt par vapeur chimique.....	12
I. 2. 8. 2 Dépôt électrochimique .....	12
I. 2. 8. 3 Photolithographie .....	12
I. 2. 9 Techniques utilisant le plasma....	12
I. 2. 10 Applications .....	12
I. 2. 10. 1 Béton intelligent .....	13
I. 2. 10. 2 Ultra - Ever Dry.....	13
I. 2. 10. 3 Sto-Lotusan .....	13
I. 2. 10. 4 Transport maritime .....	14
I. 3 Travaux antérieurs et leur performance sous tension alternative .....	15
I. 3. 1 Faible adhérence de la surface superhydrophobe, les caractéristiques de contournement et le comportement électrohydrodynamique des gouttelettes d'eau.....	15
I. 3. 2 Géométrie des électrodes haute tension et terre .....	21
I. 3. 3 Mouvement des gouttes d'eau en variant la position interélectrode, l'arrangement, le nombre de goutte, le volume, la conductivité et la masse du kaolin ajoutée à la solution .....	22
I. 4 Conclusion .....	25

**Chapitre II:** pollution des isolations superhydrophobes

II. 1 Introduction .....	26
II. 2 Définitions et significations .....	26
II. 2. 1 Pollution.....	26
II. 2. 2 Salinité .....	26
II. 2. 3 Couche de pollution .....	26
II. 2. 4 Degré de pollution.....	27
II. 3 Sources de pollution.....	27
II. 3. 1 Pollution naturelle .....	27
II. 3. 1. 1 Pollution désertique .....	27
II. 3. 1. 2 Pollution marine.....	27
II. 3. 1. 3 Poussières du sol et zones agricoles .....	27
II. 3. 1. 4 Autres types de pollution naturelle .....	27
II. 3. 2 Pollution industrielle.....	28
II. 3. 3 Pollution mixte .....	28
II. 4 Classification des sites pollués.....	28
II. 4. 1 Faible (0.06 mg/cm <sup>2</sup> ) .....	28
II. 4. 2 Moyenne (0.20 mg/cm <sup>2</sup> ).....	29
II. 4. 3 Forte (0.60 mg/cm <sup>2</sup> ).....	29
II. 4. 4 Très forte (>0.60 mg/cm <sup>2</sup> ) .....	29
II. 5 Formation et la répartition de la couche de pollution .....	29
II. 5. 1 Non-uniformité longitudinale par groupe.....	30
II. 5. 2 Non-uniformité transversale.....	30
II. 5. 3 Non-uniformité longitudinale périodique.....	30

II. 6 Impact de la pollution .....	30
II. 6. 1 Arc non localisé.....	30
II. 6. 2 Arc fixe .....	31
II. 7 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués .....	31
II. 7. 1 Le vent .....	31
II. 7. 2 La pluie .....	31
II. 7. 3 L'humidité .....	31
II. 7. 4 La température .....	31
II. 8 Conséquences de la pollution sur les équipements électriques .....	32
II. 8. 1 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe .....	32
II. 8. 1. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale .....	32
II. 8. 1. 2 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20° .....	32
II. 9 Techniques de lutte contre la pollution.....	34
II. 9. 1 Allongement de la ligne de fuite .....	34
II. 9. 2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables) .....	35
II. 9. 3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes) .....	35
II. 9. 4 Revêtements à base de silicones .....	35
II. 9. 5 Nettoyages sous ou hors tension .....	35
II. 9. 6 Les isolateurs composites.....	35
II. 10 Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	36
II. 10. 1 Conductance superficielle .....	36
II. 10. 2 Mesure optique.....	36

II. 10. 3	Mesure de la pollution de l'air .....	36
II. 10. 4	Densité du dépôt non soluble (DDNS).....	36
II. 10. 5	Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	37
II. 11	Méthodes d'essais sous pollution.....	38
II. 11. 1	Essai sous pollution naturelle.....	38
II. 11. 2	Essais sous pollution artificielle.....	38
II. 11. 2. 1	Méthode de la couche solide .....	38
II. 11. 2. 2	Méthode du brouillard salin .....	39
II. 11. 2. 3	Méthode de pollution liquide .....	39
II. 12	Conclusion.....	39

**Chapitre III: Partie expérimentale**

III. 1	Introduction .....	40
III. 2	Modèle expérimental et techniques de mesure .....	40
III. 2. 1	Modèle expérimental.....	40
III. 2. 2	Préparation d'une isolation à surface superhydrophobe .....	41
III. 2. 3	Volume des gouttes d'eau et leur angle de contact .....	42
III. 2. 4	Arrangement des gouttes d'eau .....	43
III. 2. 5	Volume des gouttes d'eau.....	44
III. 2. 6	Conductivités des gouttes d'eau et masse de kaolin ajoutée à la solution .....	45
III. 2. 7	Tension d'évacuation des gouttes d'eau.....	46
III. 3	Résultats et discussion.....	47
III. 3. 1	Mode d'expulsion des gouttes d'eaux en dehors de l'isolation superhydrophobe .....	47
III. 3. 2	Nombre de rangées de gouttes d'eau et leur localisation sur l'isolation.....	50
III. 3. 3	Volume des gouttes d'eau, leur arrangement et la position de la rangée .....	53
III. 3. 4	Conductivité électrique des gouttes d'eau .....	61



III. 3. 5 Concentrations en kaolin de la solution polluante.....	70
III. 4 Conclusion.....	75
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>77</b>



# *Liste des figures*

<b>Fig. I. 1:</b> Comportement d'une goutte sur une surface.....	3
<b>Fig. I. 2:</b> Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface .....	3
<b>Fig. I. 3:</b> Angle de glissement.....	3
<b>Fig. I. 4:</b> Modèles de Wenzel et de Cassie.....	4
<b>Fig. I. 5:</b> Dolomède.....	5
<b>Fig. I. 6:</b> Trichoptère .....	5
<b>Fig. I. 7:</b> Ailes du Libellule superhydrophobe.....	6
<b>Fig. I. 8:</b> Canetons dans l'eau .....	6
<b>Fig. I. 9:</b> Grenouille arboricole accroché sur une branche.....	7
<b>Fig. I. 10:</b> Notonecte sous l'eau.....	7
<b>Fig. I. 11:</b> Gouttes d'eau sur le roseau .....	7
<b>Fig. I. 12:</b> Feuille et la fleur du lupin .....	8
<b>Fig. I. 13:</b> Salvinia Molesta et les fouets sur sa surface .....	8
<b>Fig. I. 14:</b> Cellule polymère fluorée sous microscope .....	9
<b>Fig. I. 15:</b> Céramique microscopique.....	10
<b>Fig. I. 16:</b> Plot de taille micrométrique sur le téflon .....	10
<b>Fig. I. 17:</b> Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension.....	10
<b>Fig. I. 18:</b> Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement) .....	11
<b>Fig. I. 19:</b> Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique.....	11
<b>Fig. I. 20:</b> Circuit électrique équivalent série et parallèle .....	12
<b>Fig. I. 21:</b> Béton intelligent.....	13
<b>Fig. I. 22:</b> Traitement Ultra-ever dry sur des gants et des chaussures .....	13
<b>Fig. I. 23:</b> Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus.....	14

- Fig. I. 24:** (a): sphère d'aluminium sans revêtement, (b): sphère superhydrophobe, Chute d'environ 0,15 m, (c): une sphère en aluminium et (d): une sphère superhydrophobe..... 14
- Fig. I. 25:** Images AFM et courbes de rugosité du profil en coupe de la surface superhydrophobe (a, c) et de la surface du caoutchouc de silicone RTV (b, d)..... 15
- Fig. I. 26:** Angle de contact des gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe . . . . . 15
- Fig. I. 27:** Comportement électrohydrodynamique des gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe et la surface en silicone RTV . . . . . 16
- Fig. I. 28:** Effet auto-nettoyant électrohydrodynamique pour les particules hydrosolubles (particules de  $\text{KMnO}_4$ ) sur la surface superhydrophobe horizontale . . . . . 16
- Fig. I. 29:** Processus de contournement de la surface en silicone superhydrophobe avec une gouttelette de 20  $\mu\text{l}$  (a: Absence de tension, b: Glissement de la gouttelette, c: Juste avant le contournement, d: Contournement) ..... 17
- Fig. I. 30:** Processus de contournement sur une surface en silicone avec une gouttelette de 20  $\mu\text{l}$  (a: Aucune tension appliquée, b: Juste avant le contournement, c: Contournement, d: Après le contournement)..... 17
- Fig. I. 31:** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale (a – c: Coalescence de gouttelettes d'eau avec la tension croissante, d: Phénomène juste avant le contournement, e: Contournement) ..... 18
- Fig. I. 32:** Processus de contournement quand une surface de silicone commune a été placée horizontalement (a- c: Coalescence des gouttelettes d'eau avec la tension croissante, d: Phénomène juste avant le contournement, e: Contournement) ..... 18
- Fig. I. 33:** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20 ° (a- b: Coalescence des gouttelettes d'eau, c – d: Glissement des gouttelettes d'eau, e: Phénomène juste avant le contournement, f: Contournement)..... 19

<b>Fig. I. 34:</b> Processus de contournement d'une surface en silicone hydrophobe inclinée de 20 ° (a- b: Coalescence des gouttelettes d'eau, c – d: Glissement des gouttelettes d'eau, e: Phénomène juste avant le contournement, f: Contournement).....	19
<b>Fig. I. 35:</b> Processus de décharge sur l'échantillon de silicone hydrophobe pour la deuxième fois de l'application de la tension ( $U_i = 4$ kV): (a) Absence de tension U, (b) Décharge d'arc à 3,899 kV, (c) Electrodes de pontage de gouttelettes, (d) Evaporation des gouttelettes, (e) Extinction de la décharge d'arc .....	20
<b>Fig. I. 36:</b> Processus de décharge pour la quatrième fois d'application la tension : (a) Pas de tension appliquée U, (b) Décharge d'arc à 3,333 kV, (c) Electrodes de pontage de gouttelettes, (d) Evaporation des gouttelettes, (e) Arrêt de décharge d'arc .....	20
<b>Fig. I. 37:</b> Dégradation de surface hydrophobe .....	21
<b>Fig. I. 38:</b> Dégradations de surface superhydrophobe.....	21
<b>Fig. I. 39:</b> Systèmes d'électrodes utilisées.....	21
<b>Fig. I. 40:</b> Tension alternative d'expulsion de la dernière goutte d'eau en fonction de la géométrie des électrodes.....	22
<b>Fig. I. 41:</b> Tension alternative d'expulsion en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe.....	23
<b>Fig. I. 42:</b> Tension alternative d'expulsion en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe .....	24
<b>Fig. I. 43:</b> Tension alternative d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe .....	24
<b>Fig. I. 44:</b> Tension alternative d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe.....	25
<b>Fig. II. 1:</b> Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale et recouverte de gouttes d'eau (a – c : Coalescence de gouttelettes d'eau sous une	

tension croissante, d: Coalescence de gouttelettes d'eau et formation de multiples zones sèches sur la surface interélectrode, e: contournement de l'isolation) ..... 32

**Fig. II. 2:** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20° et recouverte de gouttes d'eau (a: Dépôt par pulvérisation de gouttes d'eau sur la surface hors tension, b: Mouvement et coalescence de quelques gouttes d'eau et formation de petites zones sèches, c: poursuite de la coalescence des gouttes d'eau et augmentation de la surface de zones sèches, d: Formation d'une grande zone sèche (indiquée sur la figure par un cercle rouge), e: Poursuite de l'agrandissement de la zone sèche interélectrode, diminution accrue du nombre de gouttelettes d'eau, f: Contournement de la surface isolante interélectrode)..... 33

**Fig. II. 3a:** Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction de leur Inclinaison ..... 33

**Fig. II. 3b:** Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction du volume des gouttes d'eau les recouvrant ..... 34

**Fig. II. 4:** Schéma et procédé de mesure de la DDNS ..... 37

**Fig. III. 1:** Modèle expérimental utilisé pour la réalisation des essais électriques ..... 41

**Fig. III. 2:** Phases de confectionnement d'une isolation superhydrophobe à base de silicone.....41

**Fig. III. 3:** Mesure du volume d'une goutte d'eau à l'aide d'une micropipette et son angle de contact..... 42

**Fig. III. 4:** Dessiccateur, balance électronique et conductimètre à sonde mobile..... 43

**Fig. III. 5:** Variation du nombre de rangées de gouttes d'eau sous arrangement en lignes droites..... 43

**Fig. III. 6:** Variation du nombre de rangées de gouttes d'eau sous arrangement en zigzag.... 44

**Fig. III. 7:** Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à volume variable sous un arrangement en ligne droite ..... 45

<b>Fig. III. 8:</b> Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à volume variable sous un arrangement en zigzag .....	45
<b>Fig. III. 9:</b> Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à conductivité variable sous un arrangement en ligne droite .....	45
<b>Fig. III. 10:</b> Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à conductivité variable sous un arrangement en zigzag .....	46
<b>Fig. III. 11:</b> Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à concentration en kaolin variable sous un arrangement en ligne droite .....	46
<b>Fig. III. 12:</b> Schémas de mesure de la tension d'évacuation des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes (Tr: Transformateur, UC: Appareil de commande de la tension, S <sub>sh</sub> : Surface superhydrophobe, Cam: Caméscope, PC: Ecran Ordinateur .....	47
<b>Fig. III. 13:</b> Phases essentielle d'évacuation groupo-individuelle et bidirectionnelle de 20 gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites (V <sub>d</sub> = 30 µl, C <sub>k</sub> = 0 g/l, σ <sub>v</sub> = 50 µS/cm) .....	49
<b>Fig. III. 14:</b> U <sub>eAC</sub> = f (N <sub>d</sub> ) pour un arrangement en lignes droites de 4 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface superhydrophobe (V <sub>d</sub> = 30 µl, C <sub>k</sub> = 0 g/l, σ <sub>v</sub> = 50 µS/cm) .....	49
<b>Fig. III. 15:</b> Etapes essentielle d'expulsion groupo-individuelle et bidirectionnelle de 20 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en zigzag (V <sub>d</sub> = 30 µl, C <sub>k</sub> = 0 g/l, σ <sub>v</sub> = 50 µS/cm) .....	50
<b>Fig. III. 16:</b> U <sub>eAC</sub> = f (N <sub>d</sub> ) pour un arrangement en zigzag de 4 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface superhydrophobe (V <sub>d</sub> = 30 µl, C <sub>k</sub> = 0 g/l, σ <sub>v</sub> = 50 µS/cm) .....	50
<b>Fig. III. 17:</b> Tension de refoulement des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction du nombre de rangées de celles-ci.....	51
<b>Fig. III. 18:</b> Tension de refoulement des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction du nombre de rangées de celles-ci.....	52

<b>Fig. III. 19:</b> Etapes essentielle d'expulsion individuelle et bidirectionnelle de 4 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0\text{g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) .....	52
<b>Fig. III. 20:</b> Etapes essentielle d'expulsion individuelle et bidirectionnelle de 4 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en zigzag ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) .....	52
<b>Fig. III. 21:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction du rang de la goutte d'eau sur la surface isolante .....	53
<b>Fig. III. 22:</b> Tension de libération de la surface isolante des gouttes d'eau en fonction du volume de celles-ci.....	54
<b>Fig. III. 23:</b> Tension d'évacuation des gouttes d'eau sur l'isolation en fonction du volume de celles-ci .....	55
<b>Fig. III. 24:</b> Tension d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation en fonction du volume de celles-ci .....	55
<b>Fig. III. 25:</b> Tension d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation en fonction du volume de celles-ci .....	56
<b>Fig. III. 26:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $V_d = 80 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) .....	56
<b>Fig. III. 27:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $V_d = 80 \mu\text{l}$ , $C_k = 0 \text{g/l}$ , $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) .....	57
<b>Fig. III. 28:</b> Principale phases d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume $80 \mu\text{l}$ déposée du côté HT sans couvert.....	57
<b>Fig. III. 29:</b> Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume $80 \mu\text{l}$ déposée du côté terre de l'isolation sans couvert.....	57
<b>Fig. III. 30:</b> Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume $80 \mu\text{l}$ déposée au milieu da la surface isolante sans couvert.....	58

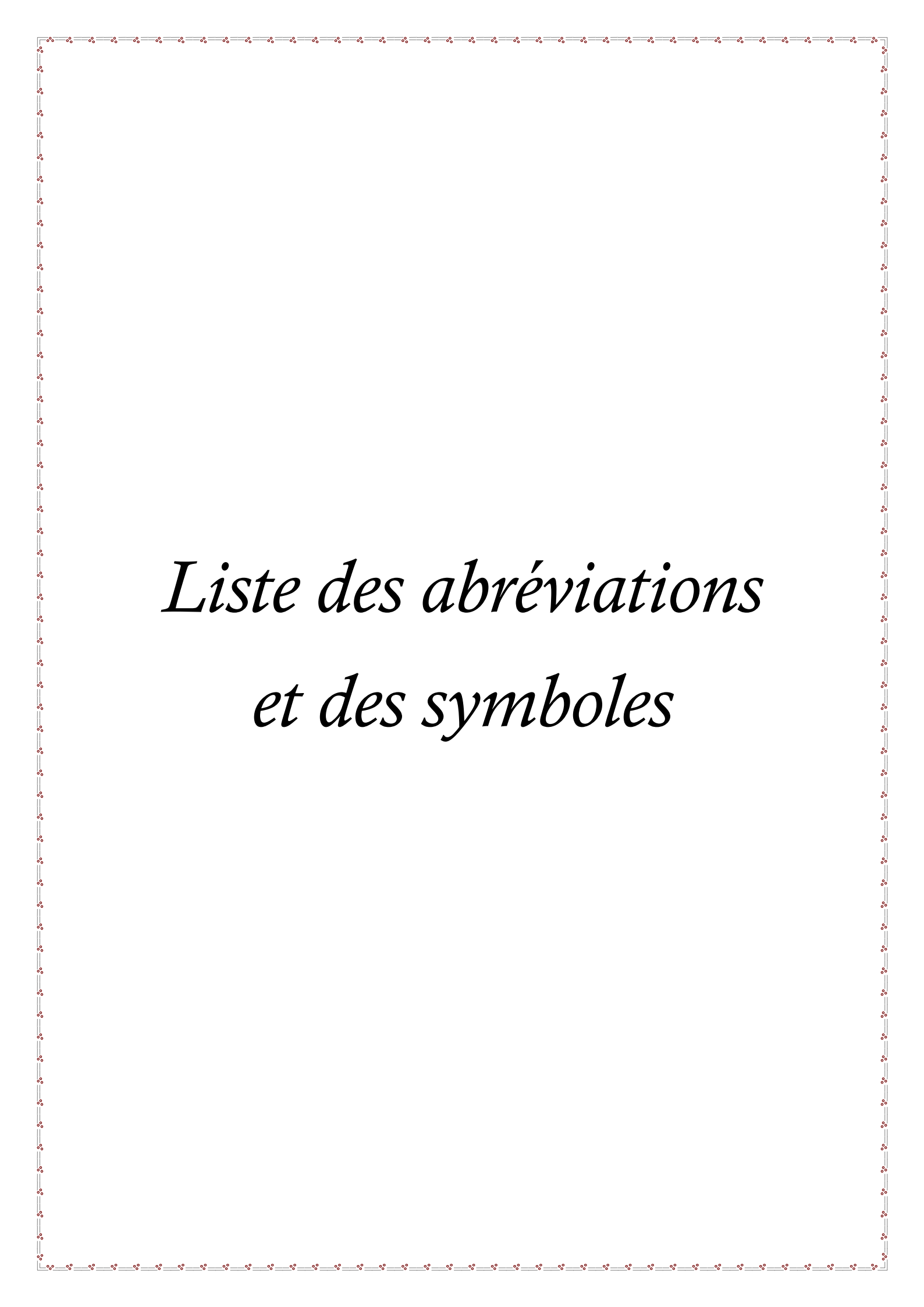


<b>Fig. III. 31:</b> Principales phases d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume 80 µl déposée au milieu de la surface isolante avec couvert .....	58
<b>Fig. III. 32:</b> Tension de libération de la surface isolante des gouttes d'eau en fonction de leur volume .....	58
<b>Fig. III. 33:</b> Tension de sortie des gouttes d'eau de l'isolation en fonction du volume de celles-ci .....	59
<b>Fig. III. 34:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation en fonction du volume de celles-ci.....	59
<b>Fig. III. 35:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction de leur volume .....	60
<b>Fig. III. 36:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation .....	60
<b>Fig. III. 37:</b> Principales phases d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80 µl déposée du côté HT de l'isolation sans couvert.....	61
<b>Fig. III. 38:</b> Phases essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80 µl déposée du côté terre de l'isolation sans couvert.....	61
<b>Fig. III. 39:</b> Phases essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80 µl déposée au milieu de la surface sans couvert.....	61
<b>Fig. III. 40:</b> Phases essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80 µl déposée au milieu de la surface avec couvert .....	61
<b>Fig. III. 41:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation.....	63
<b>Fig. III. 42:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau éjectées de l'isolation.....	63
<b>Fig. III. 43:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation..	64
<b>Fig. III. 44:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau évacuées de l'isolation ...	64

<b>Fig. III. 45:</b> Phases principales d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt du côté HT ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	.65
<b>Fig. III. 46:</b> Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt du côté terre ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	65
<b>Fig. III. 47:</b> Phases principales d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de celle-ci ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	.65
<b>Fig. III. 48:</b> Etapes essentielles d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de celle-ci avec couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	..65
<b>Fig. III. 49:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation..	66
<b>Fig. III. 50:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau éjectées de l'isolation.....	66
<b>Fig. III. 51:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau éjectées de l'isolation.....	67
<b>Fig. III. 52:</b> $U_{eAC} = f(\sigma_v)$ pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation..	67
<b>Fig. III. 53:</b> Phases principales d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt du côté HT sans couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	.68
<b>Fig. III. 54:</b> Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt du côté terre sans couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	.68
<b>Fig. III. 55:</b> Phases principales d'éviction des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de l'isolation sans couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	68
<b>Fig. III. 56:</b> Etapes essentielles d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de l'isolation avec couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	.68
<b>Fig. III. 57:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	69
<b>Fig. III. 58:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ ) .....	.69

<b>Fig. III. 59:</b> Tension d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ , $V_d = 60 \mu\text{l}$ ) .....	70
<b>Fig. III. 60:</b> Tension d'évacuation en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ , $V_d = 60 \mu\text{l}$ ).....	71
<b>Fig. III. 61:</b> Tension d'éjection en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ , $V_d = 60 \mu\text{l}$ ).....	71
<b>Fig. III. 62:</b> Tension d'évacuation en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ , $V_d = 60 \mu\text{l}$ ).....	72
<b>Fig. III. 63:</b> Tension d'expulsion des gouttes d'une rangée avec une concentration en kaolin ( $C_{k1} = 40 \text{ g/l}$ , $C_{k2} = 120 \text{ g/l}$ ) en fonction de sa position sur la ligne de fuite de l'isolation .....	73
<b>Fig. III. 64:</b> Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 40 g/l de kaolin en ligne droite du côté HT .....	73
<b>Fig. III. 65:</b> Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 40 g/l de kaolin en ligne droite du côté terre .....	73
<b>Fig. III. 66:</b> Phases essentielles d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 40 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation sans couvert.....	74
<b>Fig. III. 67:</b> Phases essentielles d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 40 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation avec couvert .....	74
<b>Fig. III. 68:</b> Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite du côté HT .....	74
<b>Fig. III. 69:</b> Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite du côté terre .....	74
<b>Fig. III. 70:</b> Phases essentielles d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation sans couvert.....	75
<b>Fig. III. 71:</b> Phases essentielles d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation avec couvert .....	75

**Tab. III. 1:** Tension de contournement de l'isolation à son état sec.....47



# *Liste des abréviations et des symboles*

$\theta$ : Angle de contact sans la rugosité.

$\gamma$ : Coefficient de tension superficielle.

$\gamma_{SL}$ : Tension de l'interface Solide Liquide.

$\gamma_{SG}$ : Tension de l'interface Solide Gaz.

$\gamma_{LG}$ : Tension de l'interface Liquide Gaz.

$\theta^*$ : Angle de contact avec la rugosité.

$\varphi$ : Fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose.

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

r: La rugosité.

$E_e$ : Champ électrique extérieur.

$E_p$ : Champ électrique propre.

$\epsilon_r$ : Permittivité relative.

RDT: La rigidité diélectrique transversale.

RDL: La rigidité diélectrique longitudinale.

$R_v$ : Résistance transversale ou volumique.

$R_s$ : Résistance superficielle.

$R_i$ : Résistance d'isolement.

RTV: Surface en caoutchouc de silicone.

G: Conductance superficielle.

I: Courant électrique qui traverse l'isolateur.

V: La tension d'alimentation de l'isolateur.

DDNS: Densité du dépôt non soluble.

$m_f$ : La masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg.

$m_i$ : La masse initiale du papier filtre en mg.

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

DDSE: Densité du dépôt de sel équivalent.

$V_g$ : Volume de la goutte.

$\alpha$ : Angle d'inclinaison.

$l_e$ : Largeur des électrodes.

$e_e$ : L'épaisseur des électrodes.

$L_e$ : La longueur des électrodes.

HT: Haute tension.

T: terre.

$R_a$ : Résistance d'affaiblissement de courant.

$V_{cr}$ : Voltmètre de crête.

$S_{sh}$ : Surface superhydrophobe isolante.

Tr: Transformateur.

UC: Appareil de commande de la tension.

Cam: Caméscope.

PC: Ecran Ordinateur.

$\sigma_v$ : Conductivité volumique de la solution polluante.

$N_d$ : Nombre de rangées de gouttes d'eau.

$V_d$ : Volume des gouttes d'eau.

$U_{eAC}$ : Tension d'expulsion des gouttes en tension alternative.

$C_k$ : Concentration en kaolin.



# *Introduction*

## *Générale*



Les lignes de transport d'énergie électrique se composent de plusieurs éléments, chacun joue un rôle important dans son fonctionnement ou dans la sécurité. L'isolateur est un composant électrotechnique indispensable dans une installation électrique. Il est constitué de matériau isolant, c'est-à-dire qui ne conduit pas l'électricité. On trouve les isolateurs en particulier sur les lignes à haute tension.

Le contournement des isolateurs par un arc électrique dû à la pollution atmosphérique est la cause principale des interruptions dans le réseau électrique de transport.

Ces interruptions ont lieu en grande majorité lorsqu'il y a humidité pendant les périodes sèches. Une étude effectuée montre que la maîtrise des conditions optimales du fonctionnement des lignes, commence par le choix d'isolateurs hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobes qui présentent les meilleures performances sous pollution. Il a été prouvé que l'isolateur hydrophobe est plus performant que l'isolateur hydrophile mais reste toujours l'isolateur superhydrophobe du meilleur type.

Et pour cette raison nous avons réalisé des recherches dans le but de découvrir plus le phénomène de la superhydrophobie dans une isolation et plus précisément le comportement des gouttes d'eau sur la surface superhydrophobe sous tension alternative. Durant ces études on est passé par plusieurs techniques en commençant par la confection d'une plaque en verre à base de silicone, puis après son rinçage et son séchage on a posé à l'aide d'une micropipette plusieurs gouttes de manière différente, en variant le nombre de rangées sur la ligne de fuite, le volume, la conductivité électrique et la masse du kaolin mélangée aux gouttes d'eau distillée. Nous avons réussi à déterminer l'influence des paramètres principaux tel que le nombre de gouttes, la nature des gouttes, la performance du support utilisé, en prenant comme exemple les électrodes suspendues sur la surface.

Pour cela nous avons subdivisé ce travail en trois chapitres:

Le premier chapitre présente le phénomène de la superhydrophobie par la définition de tous les paramètres qui la forme, les différents types de matériaux superhydrophobes naturels et artificiels, les propriétés électriques et spécifiques, le domaine d'application de celle-ci ainsi que la discussions des travaux antérieurs.

Le deuxième chapitre, traite les différentes sources de pollution, comment se forme la pollution, le degré de pollution, les conséquents de la pollution, technique de la lutte contre la pollution.

Le troisième chapitre est réservé pour la partie expérimentale dont on fait l'interprétation des résultats obtenus pendant nos essais au niveau du laboratoire, l'explication et la discussion des résultats.

Enfin la conclusion générale à la fin du travail résumant tous les travaux réalisés et les remarques qui sont déduites.

# *Chapitre I*

*Surfaces superhydrophobes et  
travaux antérieurs sur leur  
performance électrique sous  
tension alternative*

## **I. 1 Introduction**

L'objectif de ce premier chapitre consiste en la caractérisation de la superhydrophobicité d'une surface, son origine, la comparaison de sa propriété à celle des hydrophiles et hydrophobes naturelles et artificielles. Les domaines d'application de la superhydrophobicité seront décrits dans ce chapitre.

Les résultats de recherche concernant la performance électrique des surfaces superhydrophobes sous tension alternative seront pris en revue.

## **I. 2 Surfaces superhydrophobe**

### **I. 2. 1 Définitions**

#### **I. 2. 1. 1 Mouillabilité**

La mouillabilité représente l'étalonnage d'un liquide sur une surface solide. Elle est caractérisé par un facteur appelé angle de contact, entre le liquide et la surface solide [1].

#### **I. 2. 1. 2 Non mouillabilité**

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

#### **I. 2. 1. 3 Angle de contact $\theta$**

Représente l'angle formé par l'intersection de la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée et ses valeurs varient de 0 à 180 [2].

### **I. 2. 2 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact**

#### **I. 2. 2. 1 Surface superhydrophile [3]**

Si l'angle de contact est presque égale à 0 °, alors la surface ne repousse pas l'eau (Fig. I. 1a).

#### **I. 2. 2. 2 Surface hydrophile [4]**

Si l'angle de contact est inférieur à 90 °, et la surface ne repousse pas l'eau (Fig. I. 1b).

#### **I. 2. 2. 3 Surface hydrophobe [4]**

Si l'angle de contact est compris entre 90 ° et 150 °, alors la surface et la goutte d'eau forme un demi-cercle (Fig. I. 1c).

### I. 2. 2. 4 Surface Superhydrophobe [1]

Si l'angle de contact est compris entre  $150^\circ$  et  $180^\circ$ , la goutte d'eau sera presque sphérique (Fig. I. 1d).

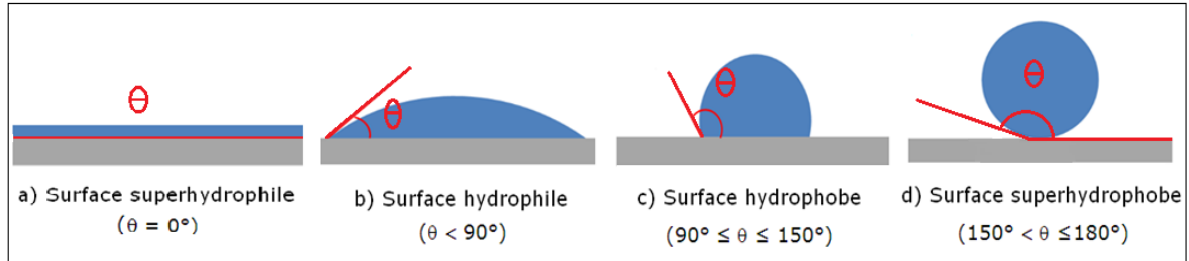


Fig. I. 1: Comportement d'une goutte sur une surface [5]

L'équation de Young qui décrit la forme de la goutte déposée est de la forme (Fig. I. 2) [4]:

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

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

$\gamma$ : Coefficient de tension superficielle;

$\gamma_{SL}$ : Tension de l'interface Solide Liquide;

$\gamma_{SG}$ : Tension de l'interface Solide Gaz;

$\gamma_{LG}$ : Tension de l'interface Liquide Gaz;

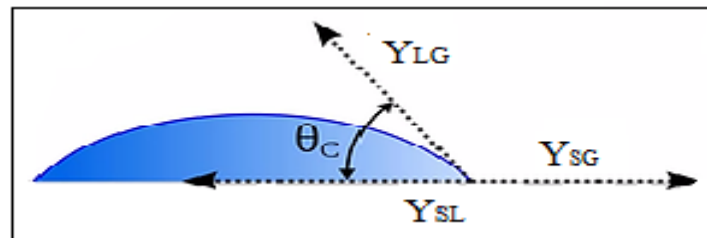


Fig. I. 2: Angle de contact d'une goutte d'eau en équilibre sur une surface

### I. 2. 3 Angle de glissement

Si cet angle est inférieur à 10 degrés, on est dans le cas Cassie Baxter et s'il est supérieur à 20 degrés c'est le cas de Wenzel (Fig. I. 3).

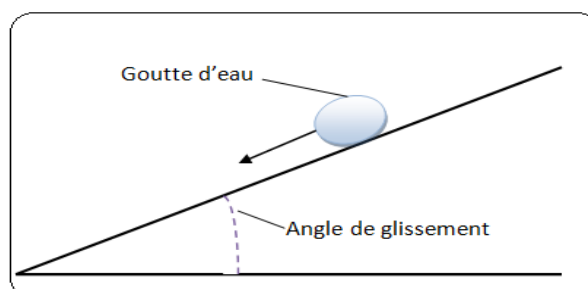


Fig. I. 3: Angle de glissement

### I. 2. 3. 1 Effet Wenzel [6]

Lorsqu'on pose une goutte d'eau sur une surface présentant une faible densité d'aspérités, elle retient la goutte sur son support, dans ce cas, le mouillage est partiel (Fig. I. 4).

La relation de Wenzel est de la forme:

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

$\theta$ : Angle de contact sans la rugosité;

$\theta^*$ : Angle de contact avec la rugosité;

$r$  (la rugosité) = (Surface réelle/surface apparente)  $\geq 1$

### I. 2. 3. 2 Effet Cassis-Baxter [7]

Une goutte posée sur une surface ayant un grand nombre d'aspérités sera en contact avec leurs sommets. Sans qu'elle s'accroche à son support, grâce aux poches d'air produite entre le solide et le liquide (Fig. I. 4).

Equation de Cassis est la suivante:

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

Avec

$\theta$ : Angle de contact sans la rugosité;

$\theta^*$ : Angle de contact avec la rugosité;

$\varphi$ : Fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose;

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

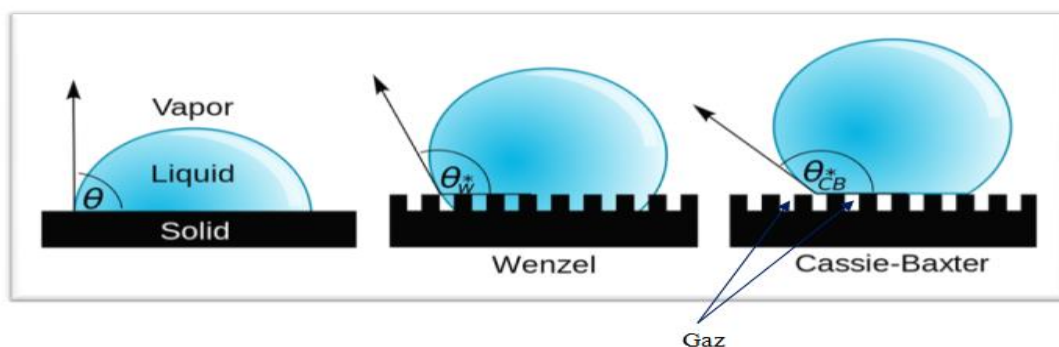


Fig. I. 4: Modèles de Wenzel et de Cassie [8]

## I. 2. 4 Différents types de surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles

### I. 2. 4. 1 Surfaces superhydrophobe naturelles

La nature est une source de nombreuses espèces superhydrophobe: insectes, animaux et végétaux. Parmi ces espèces, on citera: Trichoptère, Libellule, Caneton, Notonecte.

### I. 2. 4. 1. 1 Insectes

#### a) Dolomède des marais [9]

Les dolomèdes sont des araignées aquatiques. Elles peuvent rester sèches sur l'eau grâce à leurs poils minuscules qui empêchent l'eau d'entrer en contact avec leur corps. Ces poils produisent des sommets hérissés séparés par des espaces en forme de vallées qui, lorsqu'ils sont couverts, créent une bulle entre la surface de la matière et les pointes, tandis que l'air, les gaz dissous dans l'eau sont piégés en dessous, agissant comme une barrière entre la surface et l'eau (Fig. I.5).

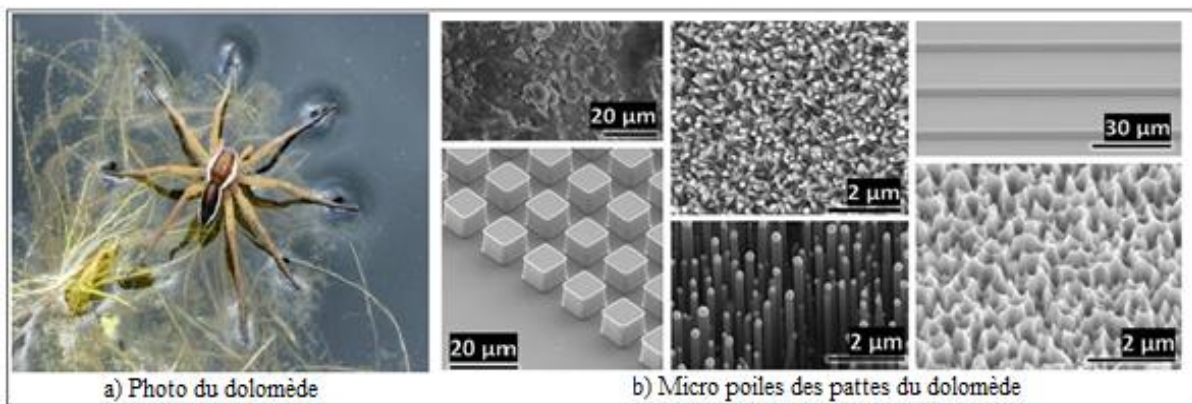


Fig. I. 5: Dolomède

#### b) Trichoptères [10]

Les trichoptères ressemblent à un petit papillon dont les ailes sont repliées en toile par-dessus le corps, ce qui crée une barrière entre sa peau et l'eau (Fig. I. 6).



Fig. I. 6: Trichoptère

#### c) Libellule [11]

Vie dans des espaces aquatiques (Fig. I. 7). Ces ailes sont revêtues de plots micro et nanostructures, formant une surface superhydrophobe (les gouttes d'eau roulent et évacuent la poussière sans mouiller ces surfaces).





**Fig. I. 7:** Ailes du Libellule superhydrophobe

#### I. 2. 4. 1. 2 Animaux

##### a) les Canetons [12]

Ils sont caractérisés par leurs plumes et leur pelage superhydrophobe qui permet à ces animaux, de sécher rapidement leur pelage afin d'éviter toute perte de chaleur. Les plumes des canetons comportent une deuxième couche de poils recouverts d'une couche de graisse et de poils orientés dans le même sens pour ne pas se mouiller en sortant de l'eau (Fig. I. 8).

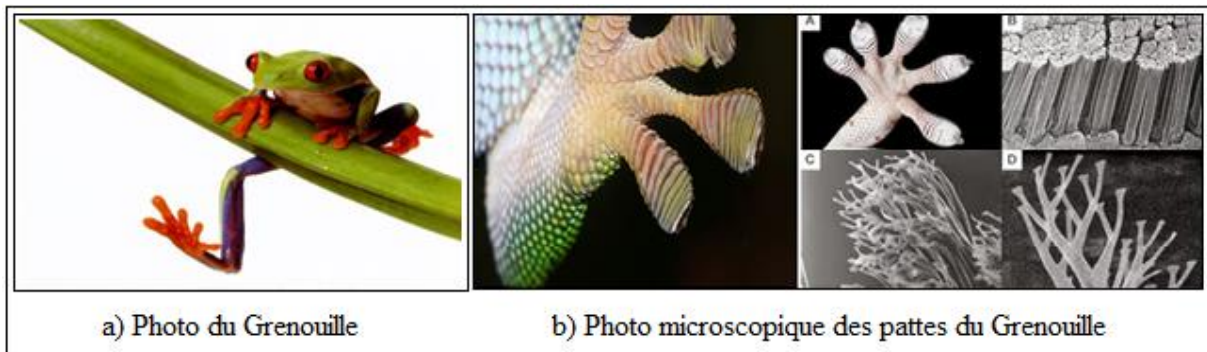


**Fig. I. 8:** Caneton dans l'eau

##### b) Grenouille arboricole [13]

Grenouille arboricole adhère bien sur les arbres grâce aux ventouses circulaires qu'elle a au bout des doigts de ses pattes postérieures et antérieures (Fig. I. 9).

Les surfaces de ses orteils sont donc pourvues de motifs avec une structure très fine de cellules hexagonales comportant des canaux entre chacune d'elles. Chacune des cellules est couverte de petites protubérances à l'échelle nanométrique.



**Fig. I. 9:** Grenouille arboricole accroché sur une branche

### c) Le notonecte

Il respire sous l'eau. Lorsque le notonecte remonte à la surface de l'eau il emprisonne des bulles d'air sous des poils hydrophobes nommés élytres. Le notonecte pourra donc rester ainsi sous l'eau avec sa réserve d'oxygène et les bulles d'air emprisonnées provoqueront un effet de miroir sur l'abdomen de l'insecte (Fig. I. 10).



**Fig. I. 10:** Notonecte sous l'eau

### I. 2. 4. 1. 3 Végétaux

#### a) Le roseau [14]

En figure I. 11 on remarque que des gouttes d'eau rondes se forment sur les feuilles tandis que le roseau reste sec. Ces gouttes ont une faible surface de contact avec les feuilles et glissent donc facilement et emportent avec elles les poussières et particules.



**Fig. I. 11:** Gouttes d'eau sur le roseau



## b) Lupin

Les lupins sont des plantes qui ont une forte teneur en protéines (43 %) et contiennent aussi des fibres (25,5 %), des sucres (13,5 %), des matières grasses (12,5 %) et des minéraux (5,5 %). Grâce à ses composants, le lupin tient toujours sa surface sèche.

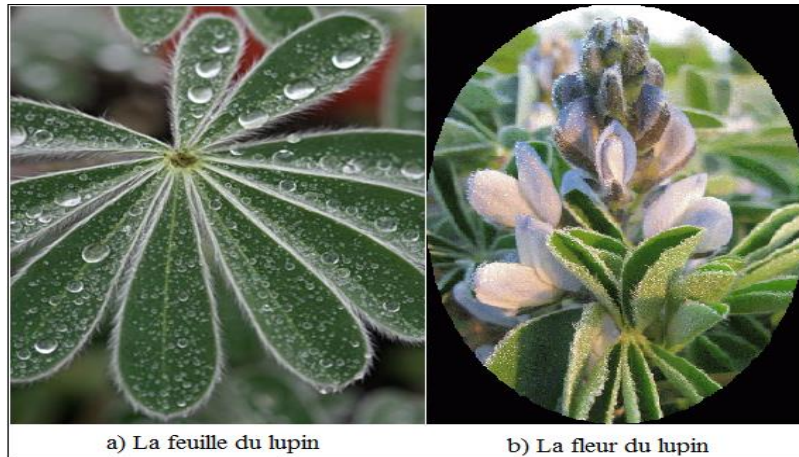


Fig. I. 12: Feuille et la fleur du lupin

## c) *Salvinia molesta* [15]

La *salvinia molesta* flotte sur la surface de l'eau en restant sèche, car la plante se recouvre d'une couche d'air quand elle pénètre dans l'eau. Cette couche d'air lui permet de ne pas entrer en contact avec le liquide. La surface des feuilles est recouverte de petits capillaires hydrophobes en forme de fouets de cuisine fixant l'eau sur leurs pointes hydrophiles à intervalles réguliers, de manière à piéger les bulles d'air à l'intérieur de ces capillaires.



Fig. I. 13: *Salvinia Molesta* et les fouets sur sa surface

## I. 2. 5 Matériaux superhydrophobes artificiels [16]

### a) Métal superhydrophobe

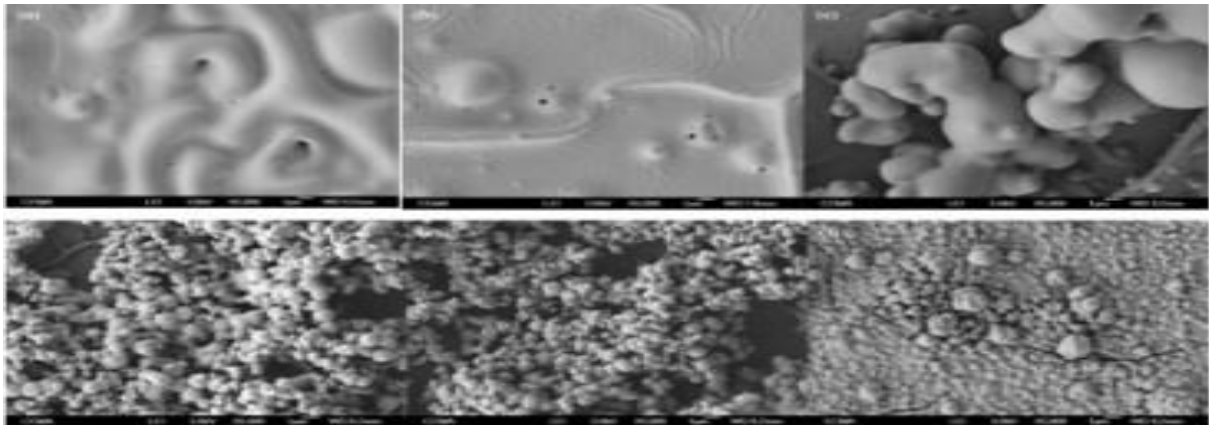
Les deux chercheurs Anatoliy Vorobyev et Chunlei Guo ont créé des plaques de métal superhydrophobe. Ils ont gravé dans des plaques de platine, de titane et de cuivre des rainures

parallèles espacées de 100 micromètres et profondes de 75 micromètres. Ils ont ajouté un deuxième niveau de stries de 5 à 10 nanomètres de longueur. Alors la goutte d'eau peut glisser sur la plaque. Ces plaques sont utilisées dans les panneaux solaires ou des chaudières solaires et la formation des ailes d'avion, mais restent sensibles aux liquides gras.

### **b) Polymères fluorés**

L'angle de contact est clairement mis en valeur lorsque le polymère est composé de fluor, c'est l'état de la surface superhydrophobe avec un angle maximal de  $160^\circ$ . Cela a été observé dans les travaux de Mr Thierry Darmanin (Fig. I. 14).

L'imperméabilité des polymères fluorés repose sur la diminution de l'énergie de surface du matériau traité. Ce qui permet aux forces d'attraction de la goutte d'être prépondérantes et la goutte aura tendance à minimiser la surface de contact avec le solide. Cette propriété est apportée par les atomes de fluor, qui confère une tension superficielle très basse au support.



**Fig. I. 14:** Cellule polymère fluorée sous microscope

### **c) Céramique et le NeverWet**

En passant un morceau de céramique au-dessus de la flamme de l'allumette, il noircit en se couvrant de suie. La suie étant un agglomérat de microparticules de carbone qui structure donc la surface du verre tout en la rendant superhydrophobe. De ce fait, une goutte d'eau posée sur la suie atteint un angle de l'ordre de  $160^\circ$  à  $170^\circ$ .

Il existe aussi un spray, NeverWet. C'est un système de produit destiné à créer une barrière d'humidité à effet répulsif sur une variété de surfaces. Il est adapté pour une utilisation sur l'aluminium, PVC, les plastiques (Fig. I. 15).

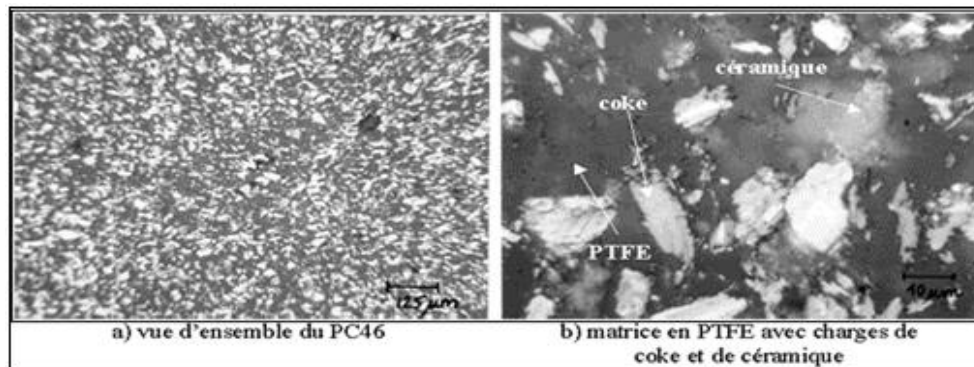


Fig. I. 15: Céramique microscopique

#### d) Téflon [17]

Lorsqu'une goutte d'eau est posée sur une surface hydrophobe lisse comme le téflon, l'angle de contact entre la goutte et la surface est à peine supérieur à  $90^\circ$ . Cet angle atteint  $160^\circ$  sur la deuxième et la troisième surface, hérissée d'un réseau ordonné de plot de taille micrométrique, ce qui rendent la surface superhydrophobe (Fig. I. 16).

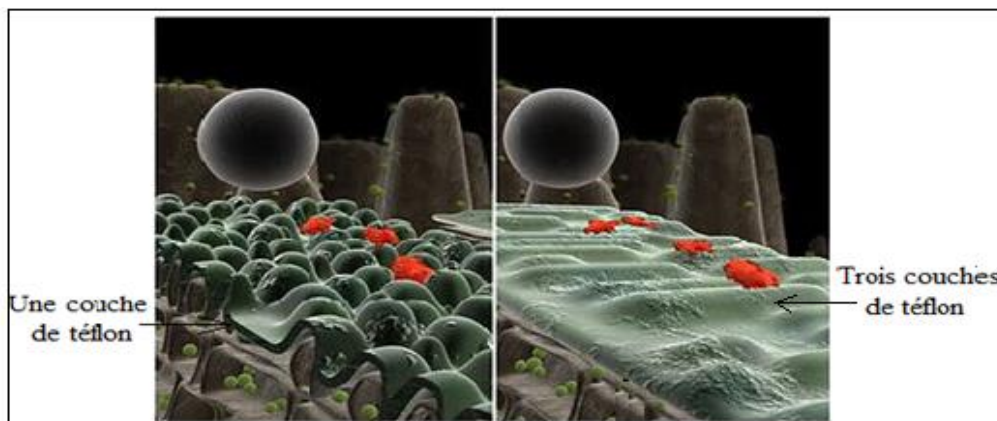


Fig. I. 16: Plot de taille micrométrique sur le téflon

### I. 2. 6 Propriétés électriques [18]

#### I. 2. 6. 1 Permittivité

Un diélectrique soumis à un champ électrique ( $E_e$ ), crée un champ électrique opposés ( $E_p$ ) à l'intérieur de la substance (Fig. I. 17). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ .

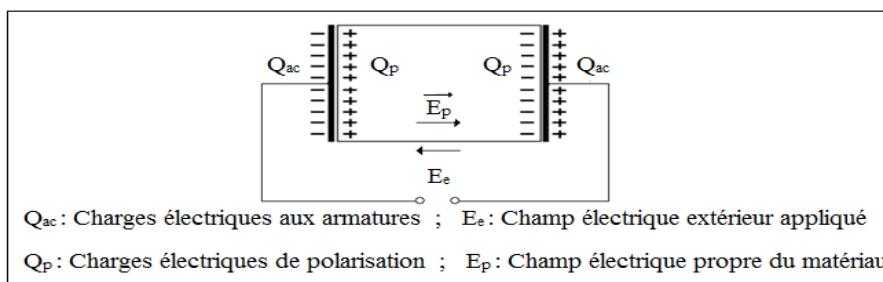


Fig. I. 17: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

### I. 2. 6. 2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant est la valeur maximale du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique. La rigidité diélectrique est le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

Il existe deux types de rigidité:

- la rigidité diélectrique transversale (RDT), lorsque le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau.
- la rigidité diélectrique longitudinale (RDL) est obtenue entre deux conducteurs (Fig. I. 18).

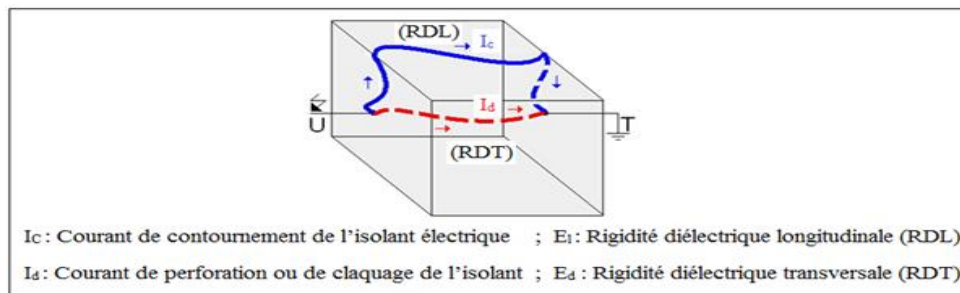


Fig. I. 18: Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)

### I. 2. 6. 3 Résistance d'isolement

On distingue trois types de résistances (Fig. I. 19)

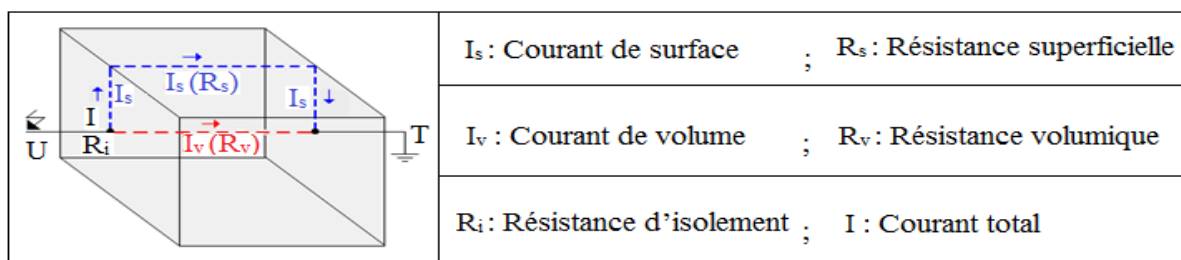


Fig. I. 19: Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique

#### I. 2. 6. 3. 1 Résistance transversale ou volumique ( $R_v$ )

Pour la déterminer on applique un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et on mesure le courant transversal résultant. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

#### I. 2. 6. 3. 2 Résistance superficielle ( $R_s$ )

Elle intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante.

#### I. 2. 6. 3. 3 Résistance d'isolement ( $R_i$ )

Elle fait appel aux deux résistances transversale et superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.



### I. 2. 7 Facteur des pertes

Les pertes diélectriques peuvent être engendrées par le passage des courants de conduction et d'absorption dans un isolant soumis à un champ électrique alternatif. Le diélectrique réel est représenté par les schémas équivalents suivants (Fig. I. 20).

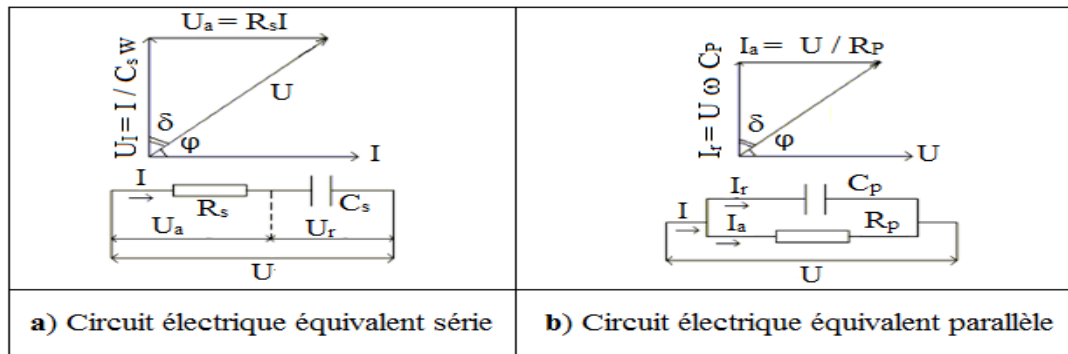


Fig. I. 20: Circuit électrique équivalent série et parallèle

### I. 2. 8 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes

#### I. 2. 8. 1 Dépôt par vapeur chimique

Cette technique [19] consiste à exposer un substrat à une vapeur chimique produisant un certain dépôt désiré qui se décompose ou réagit à la surface, dans la pression et la température désirée.

#### I. 2. 8. 2 Dépôt électrochimique

Cette méthode [20] consiste à déposer deux substrats dans un liquide, l'un est considéré anode et l'autre joue le rôle d'une cathode. Le substrat (anode ou cathode) détermine la nature et la forme des composés déposés sur la surface.

#### I. 2. 8. 3 Photolithographie

Permettant d'obtenir des topographies continues [21]. Il consiste à couvrir une surface d'un film mince de photo résine ou de polymère, puis la radier avec un faisceau lumineux de haute précision.

### I. 2. 9 Techniques utilisant le plasma

Le plasma [22] est une technique de déposition (les ions déposent ceux pris dans un bain de vapeurs chimiques sur la surface) ou d'arrachement de matière (nano-fabrication des surfaces).

### I. 2. 10 Applications

Les industriels s'intéressent de plus en plus au phénomène de la superhydrophobie car elle doit servir dans de nombreux besoins et problèmes des industriels et consommateurs.

### **I. 2. 10. 1 Béton intelligent [23]**

Des chercheurs américains ont mis au point un type de béton qui résiste à l'eau et aux fissures. Ce béton est intelligent grâce à sa composition moléculaire (une surface "pointue") le rendant presque complètement étanche. En versant de l'eau sur ce type de béton, elle forme des gouttelettes qui roulent hors de sa surface (Fig. I. 21).



**Fig. I. 21:** Béton intelligent

### **I. 2. 10. 2 Ultra - Ever Dry**

Ultra-Ever Dry est un revêtement superhydrophobe qui repousse la majorité des liquides. Ce produit crée une barrière d'air sur la surface d'un objet. Cette barrière repousse l'eau, l'huile, le béton humide et autres liquides (Fig. I. 22).

Ultra Ever Dry s'applique en 2 couches par vaporisation, ce produit est adapté à un usage intérieur et extérieur, on peut citer: Anti humidité, anti corrosion, anti gel, anti contamination.



**Fig. I. 22:** Traitement Ultra-Ever dry sur des gants et des chaussures [24]

### **I. 2. 10. 3 Sto-Lotusan [25]**

On peut l'utiliser sous forme de revêtement de façade extérieure avec effet lotus (en béton, en ciment) (Fig. I. 23).



Fig. I. 23: Double fonction pour les revêtements de façade avec effet lotus

#### I. 2. 10. 4 Transport maritime

Afin de diminuer la consommation de carburants fossiles, des modifications sont attribuées pour obtenir des alliages plus légers, ou encore des géométries plus aéro- hydrodynamiques, en utilisant un revêtement de surface superhydrophobe offrant une mouillabilité faible. En effet, une surface de contact réduite entre l'eau et le solide en addition à une affinité chimique réduite avec l'eau pourrait diminuer la friction en surface. Lorsqu'on émerge une sphère superhydrophobe dans l'eau, un film d'air se crée autour d'elle (fig. I. 24b) et diminue la friction, ce qui lui permet de se déplacer plus rapidement qu'une sphère ordinaire (fig. I. 24a), qui au contact avec l'eau, elle se retrouve enduite. Cette propriété reste conservée même lors d'une chute d'environ 0,15 m comme le montrent les figures (I. 24c et I. 24d).

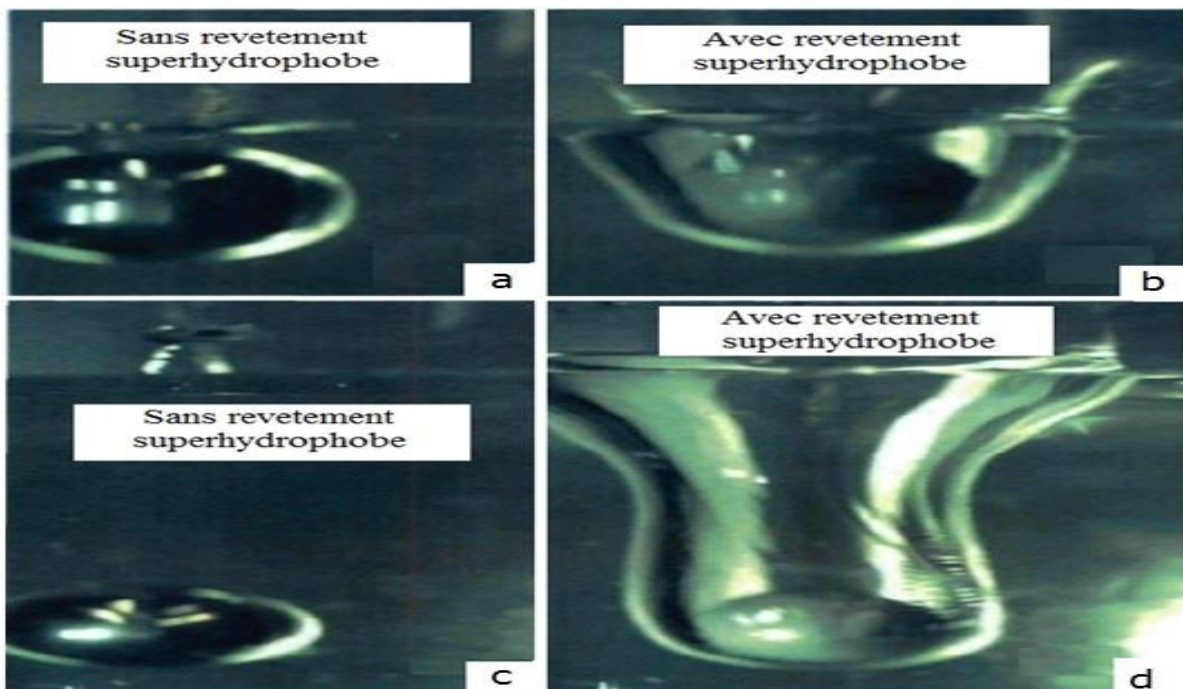


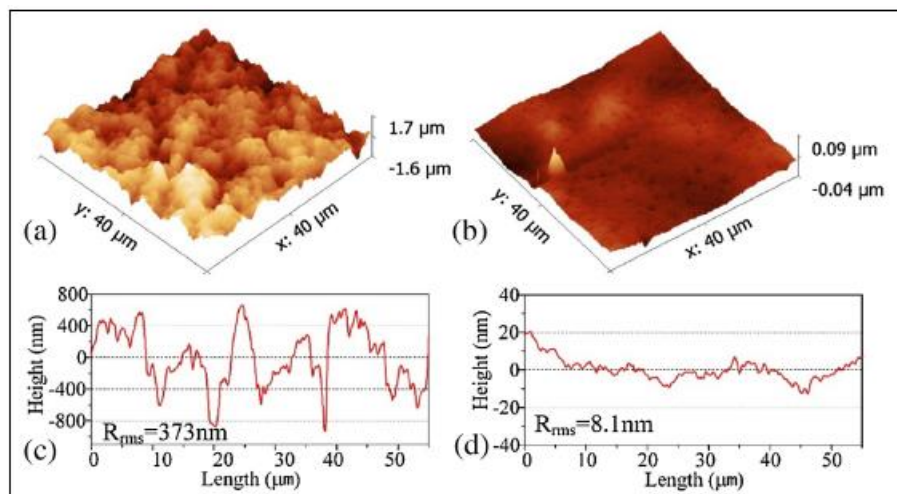
Fig. I. 24: (a): sphère d'aluminium sans revêtement (b): sphère superhydrophobe, Chute d'environ 0,15 m (c): une sphère en aluminium et (d): une sphère superhydrophobe

### I. 3 Travaux antérieurs et leur performance sous tension alternative

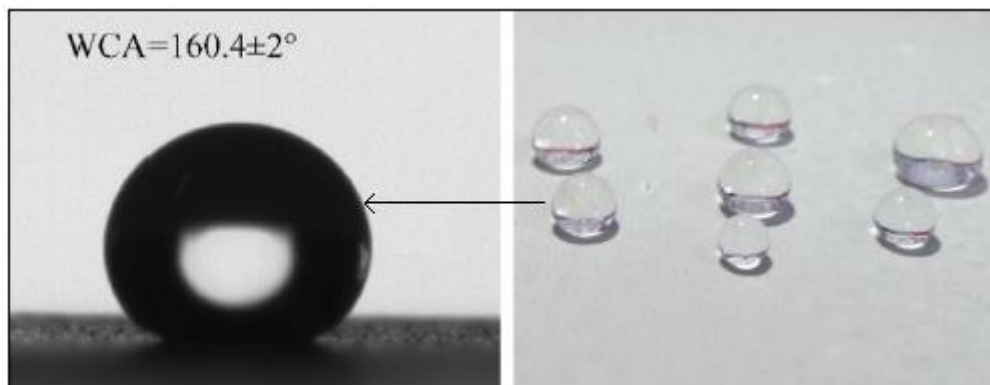
#### I. 3. 1 Faible adhérence de la surface superhydrophobe, les caractéristiques de contournement et le comportement électrohydrodynamique des gouttelettes d'eau

Y. Li et al ont fait des recherches sur les trois sujets suivants:

Pendant le premier sujet J. li et al [26] ont étudié le comportement électrohydrodynamique des gouttelettes d'eau sur une surface du caoutchouc de silicone RTV et une surface horizontale superhydrophobe et son auto-nettoyage. Dans cette étude, ils ont développé une méthode de fabrication d'une surface superhydrophobe à base de silice de taille nanométrique (particules de  $\text{SiO}_2$ ) et de copolymère méthacrylique perfluoroalkyle (PMC) (Fig. I. 25), il présente un angle de contact avec l'eau (WCA) de  $160,4 \pm 2^\circ$ , un angle de glissement (SA) inférieur à  $1^\circ$  (Fig. I. 26).



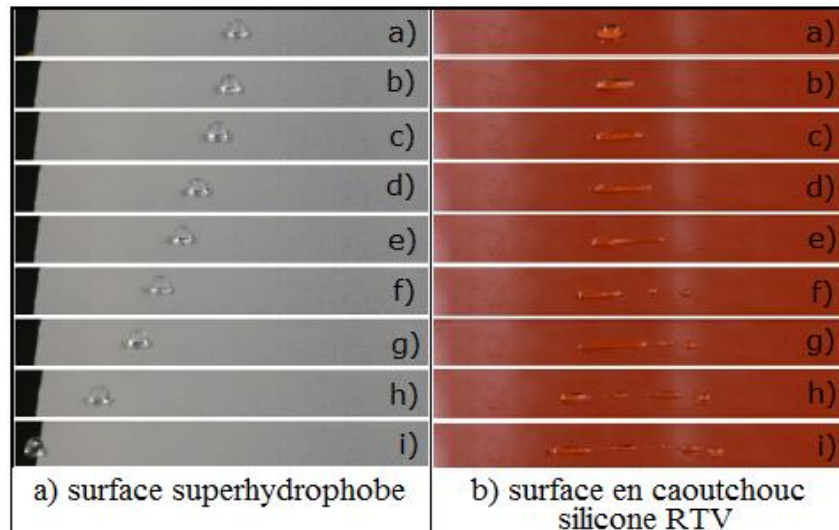
**Fig. I. 25:** Images AFM et courbes de rugosité du profil en coupe de la surface superhydrophobe (a, c) et de la surface du caoutchouc de silicone RTV (b, d)



**Fig. I.26:** Angle de contact des gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe

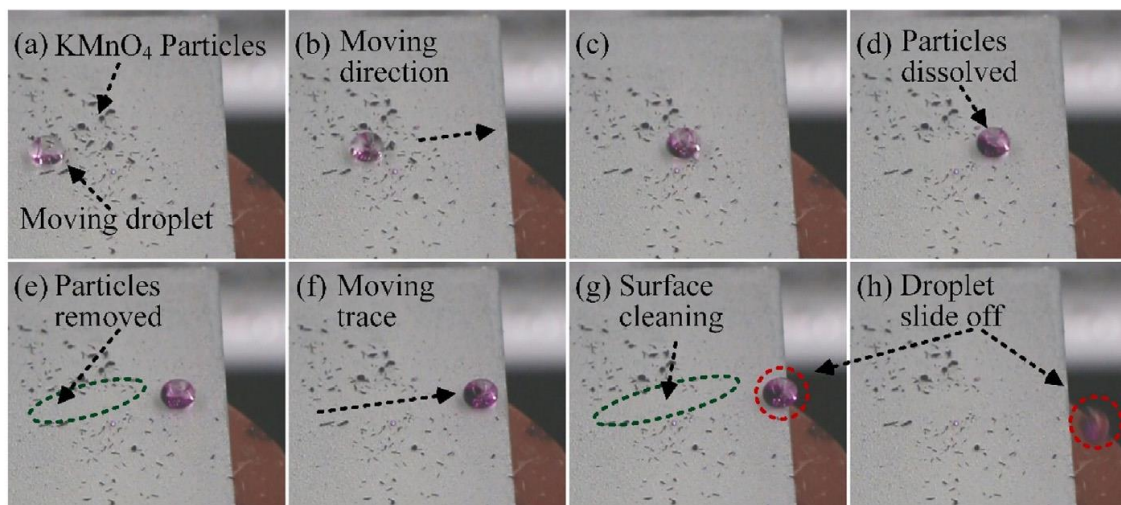


Les résultats montrent que la surface superhydrophobe telle que préparée présentait une rugosité de surface beaucoup plus grande que celle du caoutchouc silicone RTV. Lors de l'application d'un champ électrique tangentiel, les gouttelettes d'eau sur une surface superhydrophobe avait tendance à se déplacer facilement (Fig. I. 27a) tandis qu'elles avaient tendance à s'allonger sur une surface en caoutchouc silicone RTV (Fig. I. 27b).



**Fig. I. 27:** Comportement électrohydrodynamique de gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe et la surface en silicone RTV

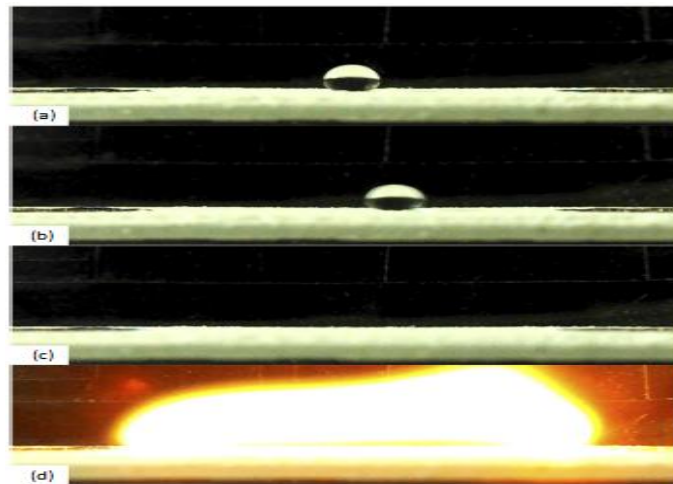
Le comportement électrohydrodynamique des gouttes d'eau était dû aux différences dans les micro/nano structures de surface et les composants chimiques. De plus, le mouvement des gouttelettes d'eau peut éliminer les contaminations hydrosolubles (Fig. I. 28) et non hydrosolubles sur la surface superhydrophobe. Cette étude a démontré un moyen d'auto-nettoyage de surface superhydrophobe en appliquant un champ électrique tangentiel.



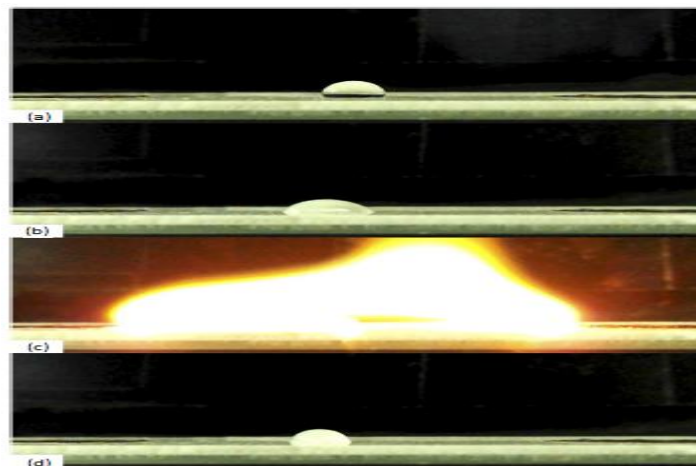
**Fig. I. 28:** Effet auto-nettoyant électrohydrodynamique pour les particules hydrosolubles (particules de  $\text{KMnO}_4$ ) sur la surface superhydrophobe horizontale

Dans le deuxième sujet [27], ils ont étudié l'influence de la faible adhérence de la surface superhydrophobe sur ses caractéristiques de contournement dans des conditions humides. La première consiste en un dépôt d'une gouttelette d'eau de volume constant sur la surface en silicone délimitée par deux électrodes.

Une comparaison des caractéristiques des surfaces hydrophobe et superhydrophobe a été faite. Une gouttelette d'eau reste sphérique sur une surface superhydrophobe et son angle de contact est supérieur. Et glisse sans s'allonger sur celle-ci en raison de sa faible adhérence (Fig. I. 29). Puis au moment du contournement la gouttelette d'eau quitte la surface. Par contre une goutte d'eau de même volume sur une surface hydrophobe de forme hémisphérique s'allonge vers les deux électrodes après application de la tension. Après le contournement, la gouttelette reste encore sur la surface (Fig. I. 30).



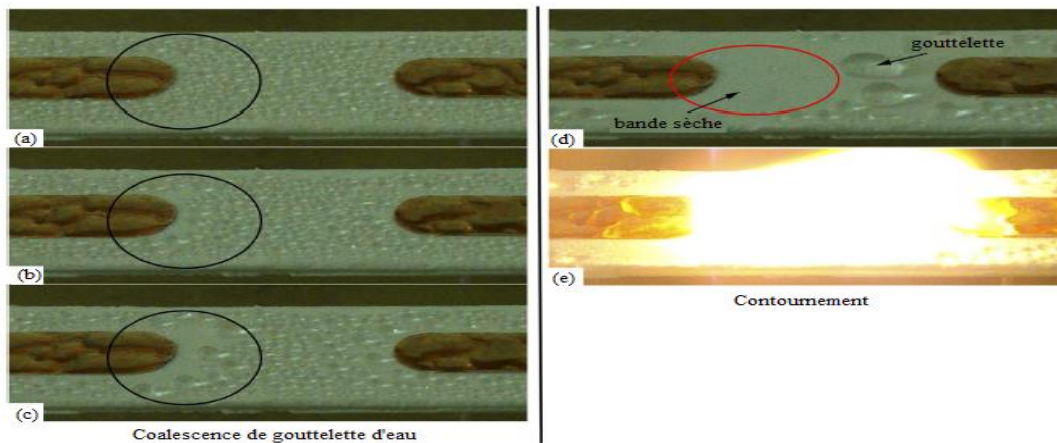
**Fig. I. 29:** Processus de contournement de la surface en silicone superhydrophobe avec une gouttelette de 20  $\mu\text{l}$  (a: Absence de tension, b: Glissement de la gouttelette, c: Juste avant le contournement, d: Contournement)



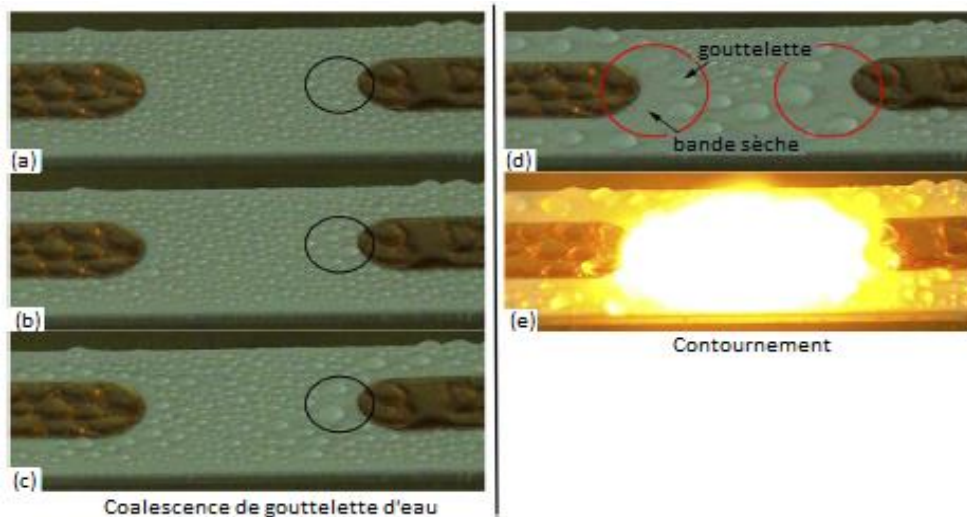
**Fig. I. 30:** Processus de contournement sur une surface en silicone hydrophobe avec une gouttelette de 20  $\mu\text{l}$  (a: Aucune tension appliquée, b: Juste avant le contournement, c: Contournement, d: Après le contournement)

Dans le deuxième cas la surface en silicone est mouillée par un brouillard salin:

Sous un brouillard salin, les gouttelettes atterrissant sur la surface superhydrophobe en position horizontale, se coalescent afin de diminuer leur nombre et augmenter leur volume et le contournement finit par se produire (Fig. I. 31). Contrairement à la surface hydrophobe en position horizontale, la coalisation des gouttes fait augmenter le nombre de zones sèches, mais reste inférieur au cas d'une surface superhydrophobe (Fig. I. 32).



**Fig. I. 31:** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale (a – c: Coalescence de gouttelettes d'eau avec la tension croissante, d: Phénomène juste avant le contournement, e: Contournement)

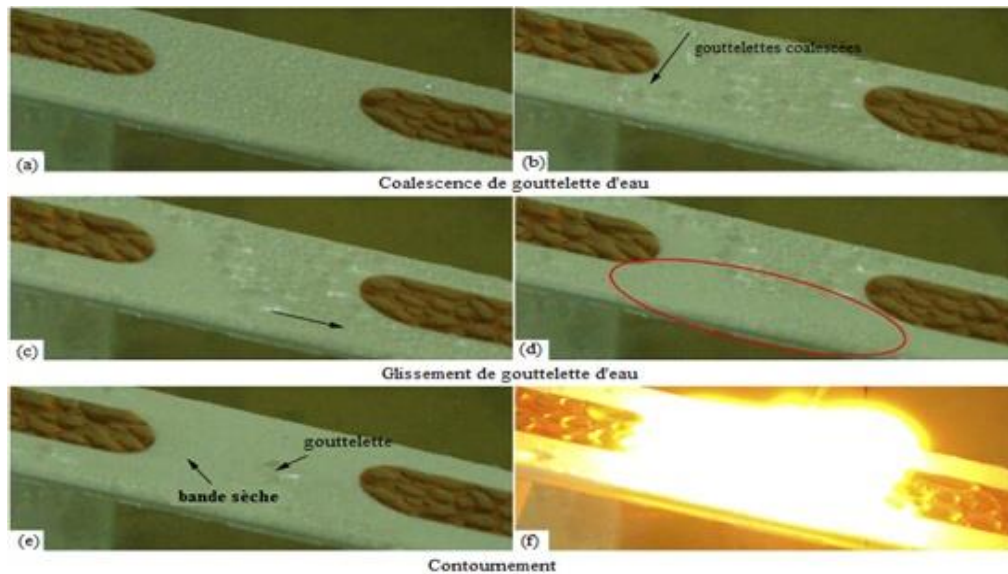


**Fig. I. 32:** Processus de contournement quand une surface de silicone a été placée horizontalement (a- c: Coalescence des gouttelettes d'eau avec la tension croissante, d: Phénomène juste avant le contournement, e: Contournement)

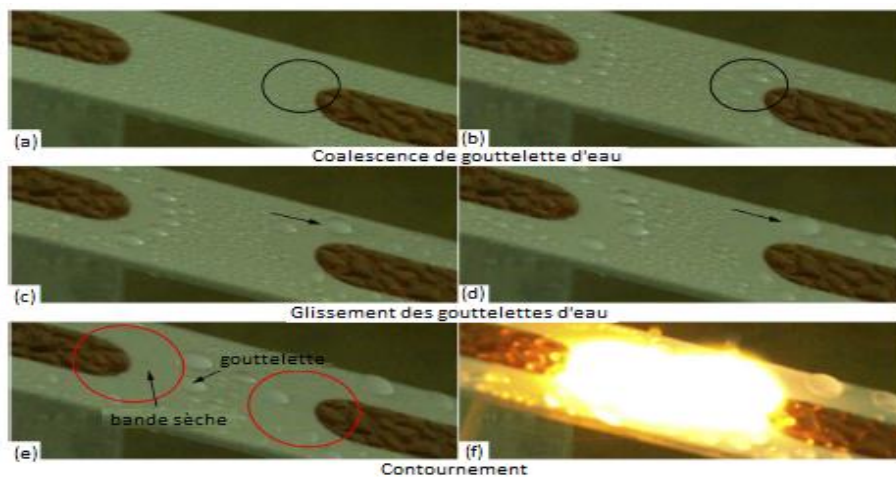
Ils ont aussi déduit que l'amorçage d'une surface superhydrophobe sous un angle d'inclinaison égal à  $20^\circ$  peut être décrit en trois parties: coalescence puis le glissement des



gouttelettes d'eau et le contournement de la surface. Au début, des gouttelettes d'eau coalescent. Cependant, en raison de la faible adhérence de la surface superhydrophobe, les gouttelettes coalescées glissent très facilement sur la surface, et puis beaucoup d'entre-elles quittent celle-ci (Fig. I. 33). Le même processus est appliqué pour la surface hydrophobe sous un même angle d'inclinaison. Mais le nombre de zones sèches reste inférieur par rapport à la surface superhydrophobe (Fig. I. 34).



**Fig. I. 33:** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de  $20^\circ$  (a- b: Coalescence des gouttelettes d'eau, c – d: Glissement des gouttelettes d'eau, e: Phénomène juste avant le contournement, f: Contournement)

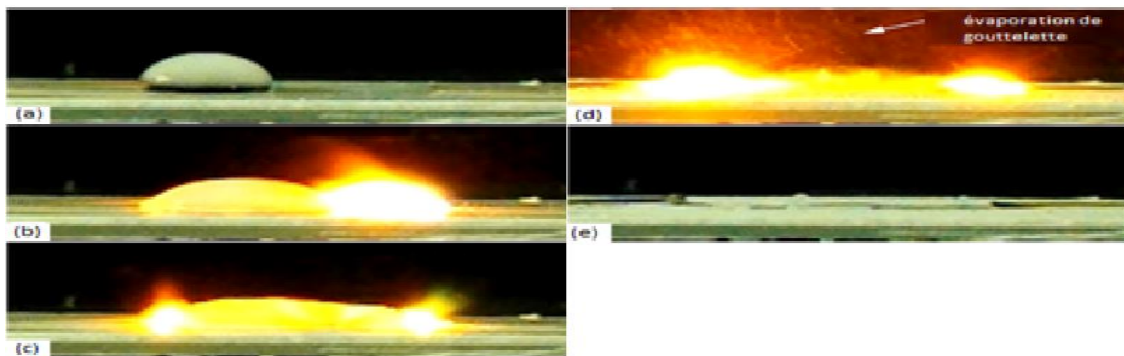


**Fig. I. 34:** Processus de contournement d'une surface en silicone hydrophobe inclinée de  $20^\circ$  (a- b: Coalescence des gouttelettes d'eau, c – d: Glissement des gouttelettes d'eau, e: Phénomène juste avant le contournement, f: Contournement)

Enfin dans le troisième travail Yufeng Li et all [28] ont étudié l'influence de la superhydrophobie sur la dégradation d'une isolation en silicone sous tension alternative. A

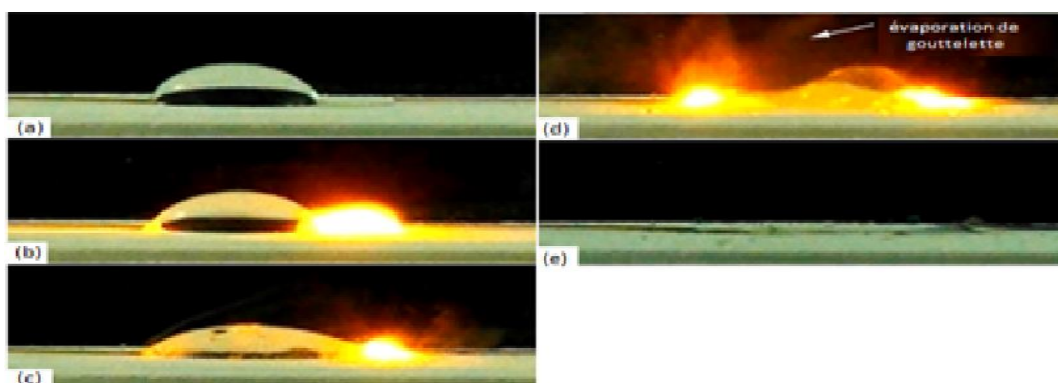
titre de comparaison, les auteurs ont étudié le degré de dégradation de deux surfaces hydrophobe et superhydrophobe, ils ont remarqué les phénomènes suivants:

- ❖ En plaçant une goutte sur la surface en silicone avec deux électrodes pointe-pointe, en augmentant la tension, la gouttelette s'allonge vers l'électrode et l'angle de contact diminue, alors une décharge d'arc s'est produite sur la surface et la gouttelette a ponté les électrodes (Fig. I. 35).



**Fig. I. 35:** Processus de décharge sur l'échantillon de silicone hydrophobe pour la deuxième fois de l'application de la tension ( $U_i = 4$  kV): (a) Absence de tension  $U$ , (b) Décharge d'arc à 3,899 kV, (c) Electrodes de pontage de gouttelettes, (d) Evaporation des gouttelettes, (e) Extinction de la décharge d'arc

- ❖ Concernant le processus de décharge pour l'application de la tension croissante, une décharge d'arc s'est produite sur la surface à 3,356 kV et l'évaporation de la gouttelette autour des électrodes (Fig. I. 36).



**Fig. I. 36:** Processus de décharge pour la quatrième fois d'application de la tension: (a) Pas de tension appliquée  $U$ , (b) Décharge d'arc à 3,333 kV, (c) Electrodes de pontage de gouttelettes, (d) Evaporation des gouttelettes, (e) Arrêt de décharge d'arc

- ❖ Quand la tension a été augmentée jusqu'à 6 kV, la décharge d'arc avait provoqué une dégradation de surface hydrophobe sur différents échantillons (Fig. I. 37). Par contre

les dégradations de surface superhydrophobe n'étaient pas présentes sur la surface lorsqu'Ui était de 4, 6 et 8 kV. Jusqu'à 10 kV, le suivi était présent sur la surface de silicone superhydrophobe (Fig. I. 38).

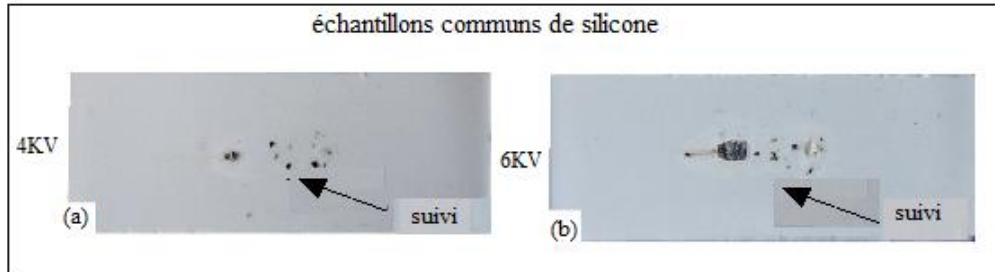


Fig. I. 37: Dégradation de surface hydrophobe

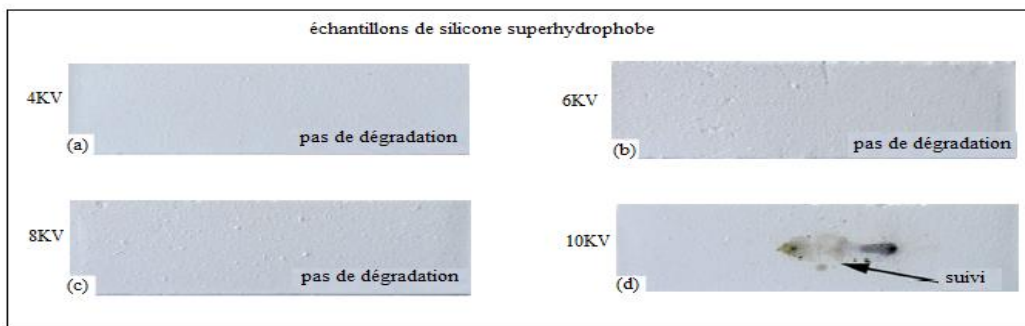


Fig. I. 38: Dégradations de surface superhydrophobe

### I. 3. 2 Géométrie des électrodes haute tension et terre

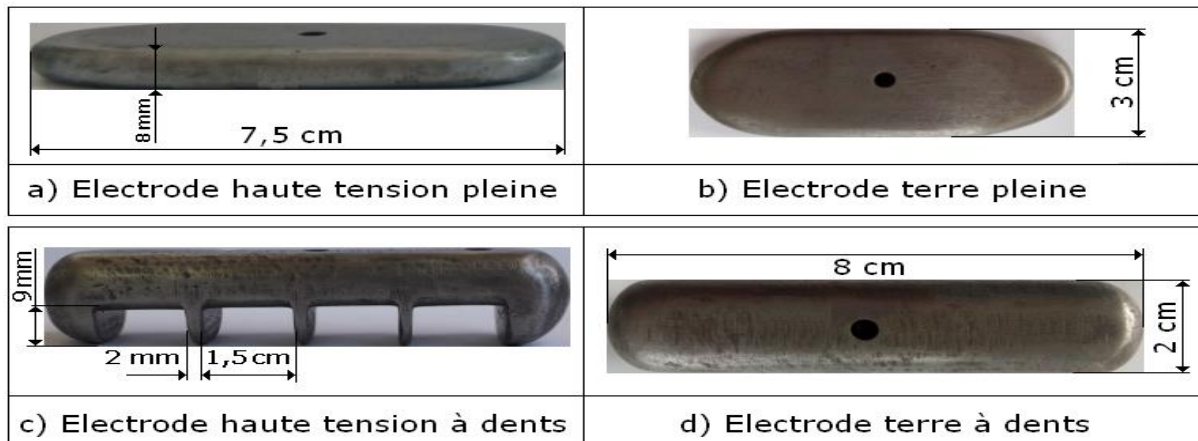


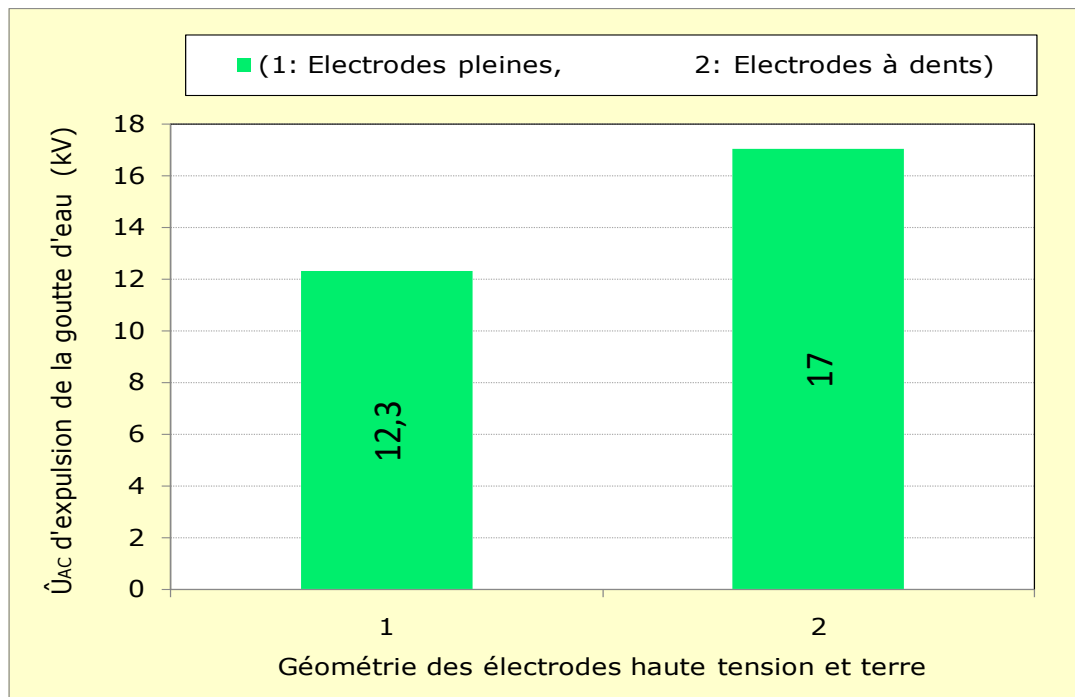
Fig. I. 39: Systèmes d'électrodes utilisés

Dans cette partie, les auteurs [29] ont utilisé deux géométries d'électrodes pleines et à dents (Fig. I. 39), afin de choisir le jeu d'électrodes empêchant l'apparition de décharges électriques partielles et de contournement des surfaces superhydrophobe utilisées dans cette étude.

1. Dans le cas d'une surface superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau délimitée par des électrodes pleines (Figs. I. 39a et I. 39b). Ils ont déduit qu'après application de la

tension, les gouttes d'eau expulsées vers les électrodes forment une flaque d'eau aux bords des électrodes. A ce moment-là deux décharges électriques proviennent de l'électrode sous tension et terre et s'amorcent dans l'intervalle d'air au-dessus de la zone humide comprise entre celles-ci.

2. Dans le cas d'une surface d'un matériau superhydrophobe sous électrodes à dents (Figs. I. 39c et I. 39d) recouverte de gouttes d'eau, ils ont trouvé que l'expulsion des gouttes d'eau après l'application de la tension produit des flaques d'eau au niveau des électrodes. Ces flaques d'eau entraînent le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation. A ce moment-là l'électrode sous tension provoque une décharge électrique et s'amorce dans l'intervalle d'air interélectrode et finit par le contournement de la surface isolante superhydrophobe.
3. La tension d'expulsion des gouttes obtenue avec les électrodes à dents est grande par rapport à celle obtenue avec les électrodes pleines (Fig. I. 40).
4. L'évacuation des gouttes d'eau se fait par groupes.



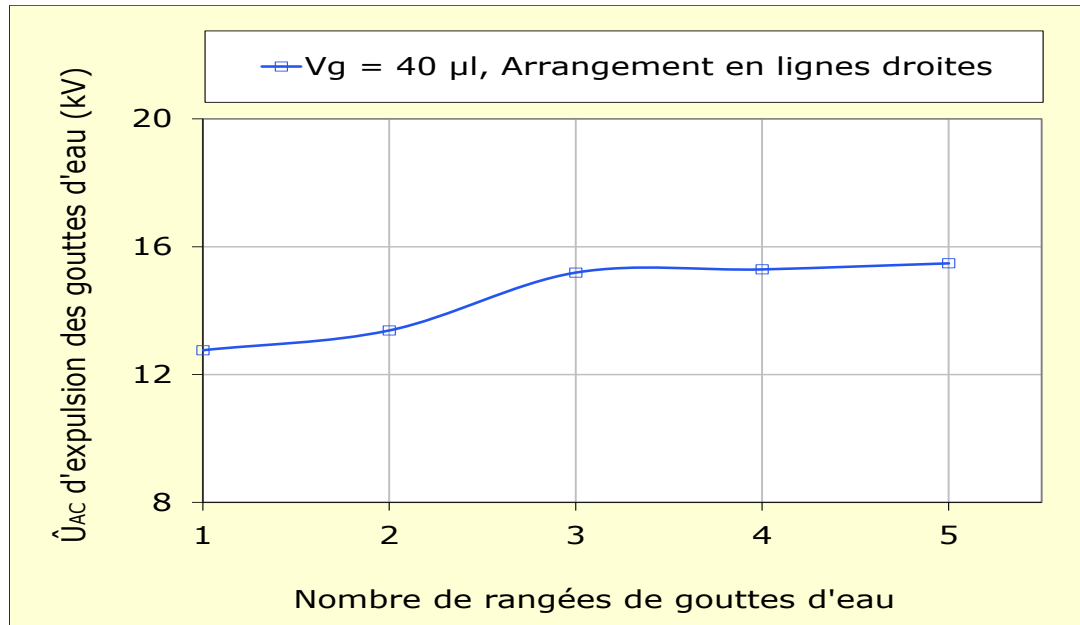
**Fig. I. 40:** Tension alternative d'expulsion de la dernière goutte d'eau en fonction de la géométrie des électrodes

### I. 3. 3 Mouvement des gouttes d'eau en variant la position interélectrode, l'arrangement, le nombre de goutte, le volume, la conductivité et la masse du kaolin ajoutée à la solution

1. D'après les résultats obtenus des expériences précédentes [29], lorsque les gouttes sont déposées sur trois positions différentes (à proximité de l'électrode haute tension, au

milieu et au voisinage de l'électrode terre), ils ont remarqué que la tension d'expulsion augmente en s'éloignant de l'électrode haute tension et atteint son maximum au milieu de la surface isolante.

2. Sous un arrangement de gouttes d'eau de 40  $\mu\text{l}$  en lignes droites déposées en plusieurs rangées, la tension d'expulsion est croissante jusqu'à la troisième rangée puis se stabilise quel que soit le nombre de rangées ajoutées (Fig. I. 41).



**Fig. I. 41:** Tension alternative d'expulsion en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe

3. Un arrangement en lignes droites des gouttes d'eau demande une tension d'expulsion plus élevée qu'en zigzag. Ceci peut être expliqué par le fait que les gouttes d'eau ont plus de liberté de mouvement en ligne droite qu'en zigzag.
4. Le faible volume de la goutte engendre la pénétration de cette dernière dans les aspérités de la surface et reste coincée, ce qui implique que son expulsion de la surface interélectrode de l'isolation superhydrophobe est difficile. Puis en augmentant le volume, la tension diminue et se stabilise à partir de 40  $\mu\text{l}$  quel que soit le volume rajouté (Fig. I. 42).
5. La tension diminue légèrement au début avec l'augmentation de la conductivité et à partir d'une certaine valeur elle devient stable pour toutes les autres valeurs de celle-ci (Fig. I. 43).
6. Concernant la viscosité des gouttes. Il en découle qu'avec l'élévation de la masse du kaolin, la tension d'expulsion croît. Ceci veut dire qu'en augmentant la masse du



kaolin la goutte devient lourde et s'introduit entre les aspérités de la surface puis elle se coince donc son évacuation est difficile par conséquent la tension de son expulsion est de plus en plus grande (Fig. I. 44).

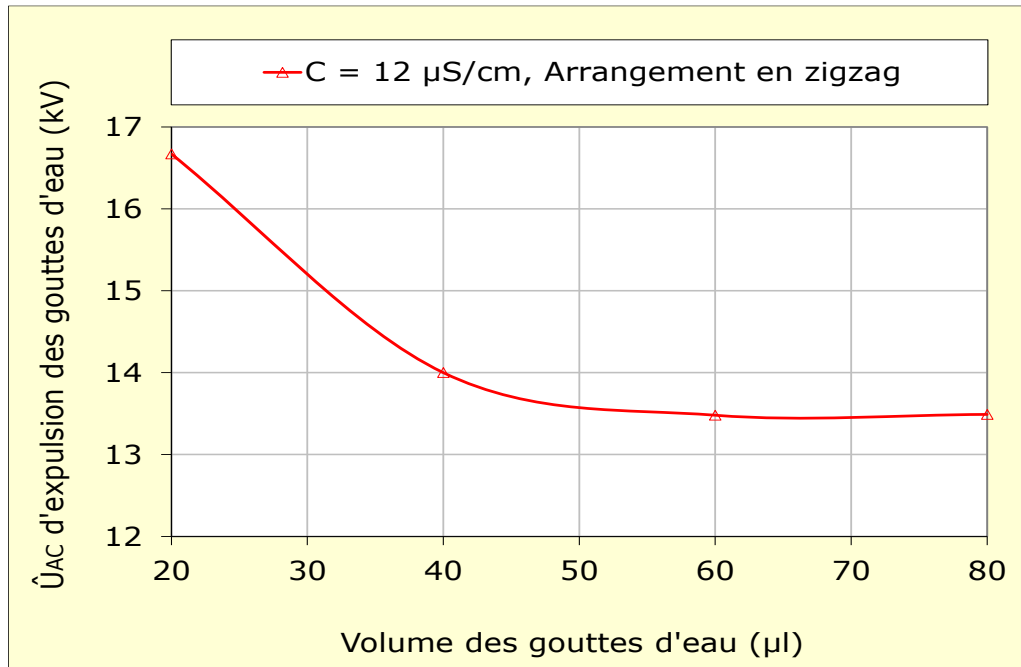


Fig. I. 42: Tension alternative d'expulsion en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

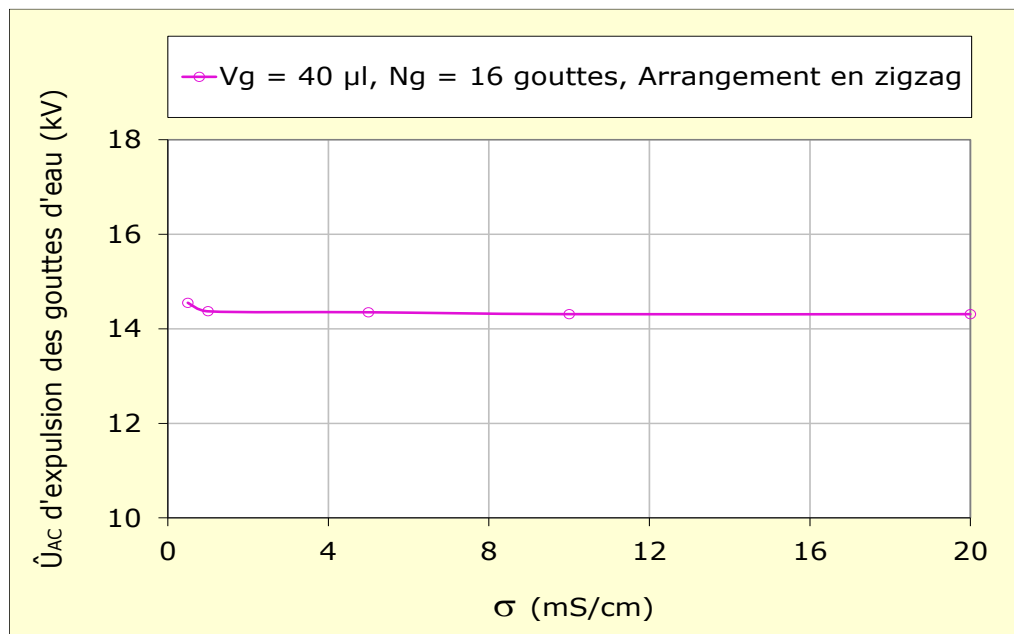
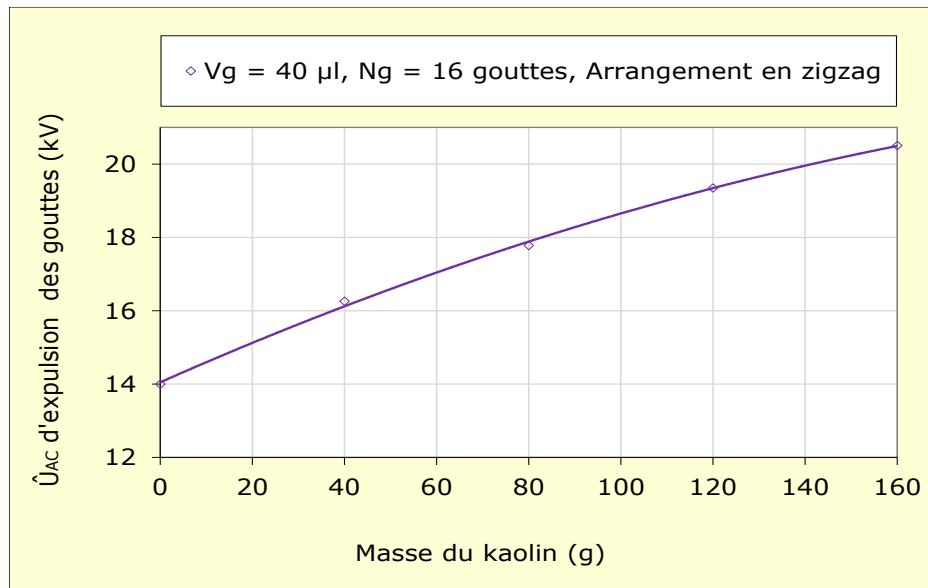


Fig. I. 43: Tension alternative d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe



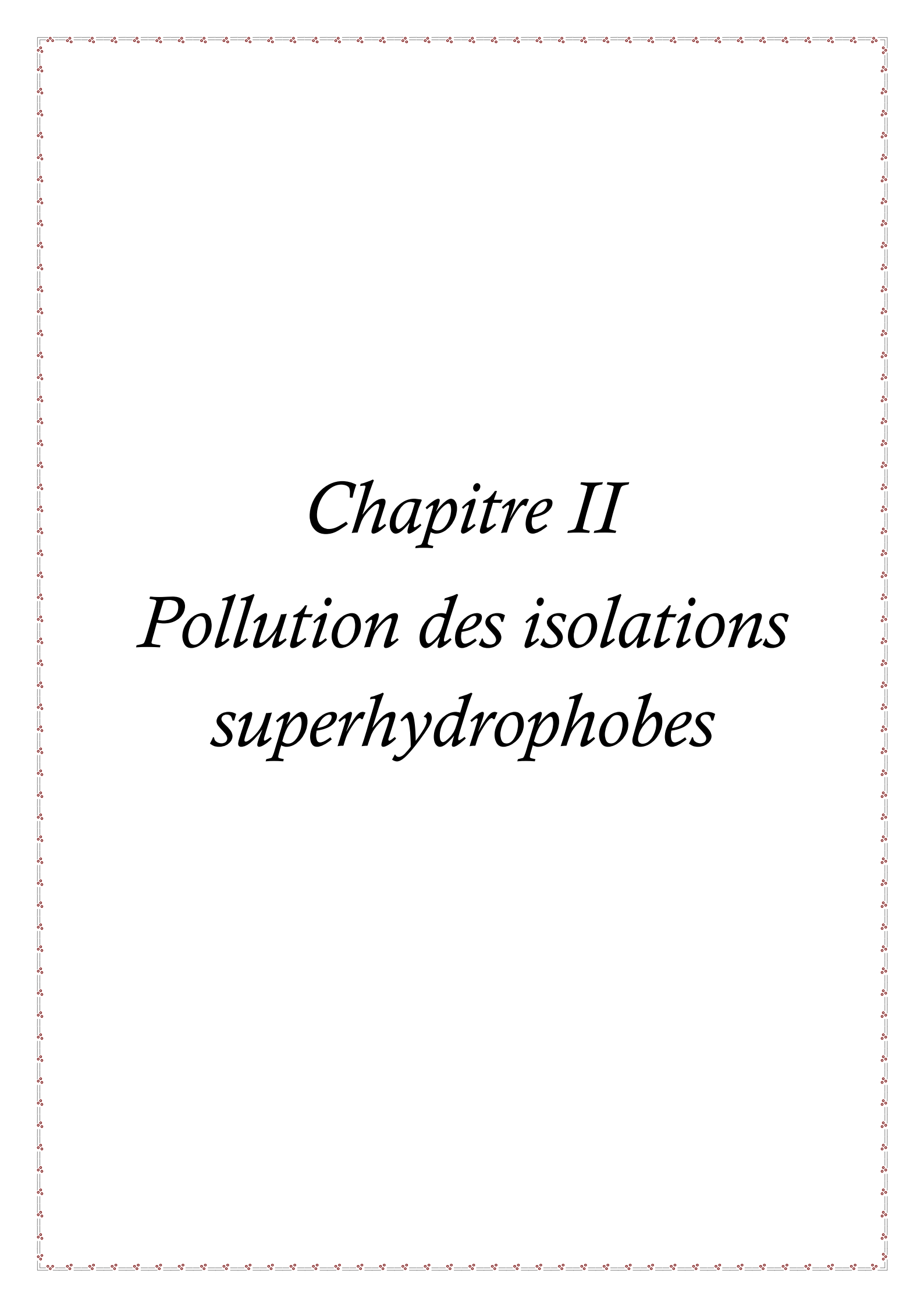
**Fig. I. 44:** Tension alternative d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

#### I. 4 Conclusion

D'après une caractérisation des surfaces superhydrophobes leur comparaison à celles hydrophiles, hydrophobes, et des exemples d'applications dans les différents domaines, et l'analyse des résultats émanant des investigations récentes de certains chercheurs sur la performance électrique des isolations hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobes sous la tension alternative, on abouti aux points essentiels suivants:

La pollution atmosphérique fait diminuer la performance électrique des isolateurs.

un isolateur hydrophobe plus performant à celui hydrophile grâce à son hydrophobicité, cette dernière peut être perdue totalement à cause des décharges partielles et de contournement de l'isolation. Il existe des résultats issus des travaux publiés sur la performance électrique des isolations superhydrophobes montrant que celle-ci est meilleure par rapport aux isolations hydrophobes et leur dégradation est fortement ralentie du fait que leur surface reste sèche même dans les zones très humides grâce au champ électrique caractérisé sur l'isolation sous tension de service.



*Chapitre II*

*Pollution des isolations  
superhydrophobes*

## **II. 1 Introduction**

La pollution des isolateurs conduit à la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension. Cette pollution déposée sur la surface isolante en présence d'humidité, devient plus ou moins conductrice. Ce qui engendre la diminution de la résistivité superficielle de la surface isolante et par suite la diminution de la tension de tenue de cette dernière. Par conséquent des arcs électriques se produisant à la surface isolante et peuvent se développer en provoquant le contournement.

La connaissance de la source de pollution, son degré et les facteurs climatiques sont nécessaires pour la détermination du bon emplacement d'un isolement dans une installation dans le but d'assurer la meilleure qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

Des études ont été réalisées par des chercheurs pour définir les meilleurs techniques de la lutte contre la pollution par des méthodes de simulation au niveau du laboratoire.

## **II. 2 Définitions et significations [30]**

### **II. 2. 1 Pollution**

La pollution est la dégradation défavorable d'un écosystème par l'introduction, généralement humaine, de substances ou de radiations altérant de manière plus ou moins importante l'environnement ou notre santé, La pollution s'attaque à l'air, à l'eau, au sol, à nos oreilles, à nos yeux...

Cette pollution est une diffusion directe ou indirecte dans l'environnement, comme les émissions des pots d'échappement ou des installations de combustion. Les déchets de produits de consommation courante (emballages, batteries usagées) jetés dans l'environnement biophysique et humain. Il peut aussi s'agir de phénomènes physiques (comme la chaleur, la lumière, la radioactivité, l'électromagnétisme, etc.).

### **II. 2. 2 Salinité**

La salinité désigne la quantité de sels décomposés dans un liquide, notamment l'eau qui est un puissant solvant pour de nombreux minéraux. Défini par le rapport entre la masse de sel sur le volume de la solution ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

### **II. 2. 3 Couche de pollution**

C'est une couche conductrice électrolytique posé sur la surface isolante. Elle est constituée principalement par le sel et les matériaux inertes.

#### **II. 2. 4 Degré de pollution**

Il est désigné par le degré de salinité, la conductivité de la couche et la densité du dépôt de sel appliquée sur l'isolateur en essai.

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

Les activités humaines constituent la principale source de pollution atmosphérique dans les grandes agglomérations. En cause, le fonctionnement de la ville, la densité de sa population, les activités qu'elle développe, les déplacements.

Il existe trois types de pollution: pollution naturelle, industrielle et mixte [31].

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

Cette pollution est constituée par: désertique, marine et tout ce qui provoque le dépôt de poussières transportées par le vent ou la pluie [31].

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

Les régions désertiques sont connues par leurs tempêtes de sable polluante. Ce sable contient du sel d'une densité très élevée et avec le peu d'humidité provoque la conduction sur la surface isolante [31].

###### **II. 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, et finissent toute leur surface par une couche de sel humidifiée par les embruns eux-mêmes, qui devient de plus en plus conductrice. Ceci donne naissance à des courants de fuite intenses, et des arcs qui provoquent le contournement total de l'isolant [31].

###### **II. 3. 1. 3 Poussières du sol et zones agricoles**

Les poussières du sol se constituent dans les régions qui manquent de végétation [32] puis le sol subit un dessèchement de sa couche superficielle. L'utilisation d'engrais par pulvérisation ou le labourage des terres conduit à la construction d'une couche de pollution fortement conductrice [33].

###### **II. 3. 1. 4 Autres types de pollution naturelle**

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 pas isolante, ce phénomène peut conduire au contournement appelé le contournement sous pluie.

### **II. 3. 2 Pollution industrielle**

Au voisinage des usines industrielles de pétrochimie, de cimenteries, ...etc. Les isolateurs se recouvrent de poussières dégagées par les fumées des machines, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopiques, à la présence d'une humidité intense. Le sel dans ces poussières abaisse la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles, on trouve l'insecticide engrais, grains de pollens, et la pollution domestique, est provoquée par les fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement et de transport [34-35].

### **II. 3. 3 Pollution mixte**

La pollution mixte résulte de la combinaison de plusieurs pollutions précitées, c'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. 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 variables. Ils ne provoquent pas la dégradation de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont à secs.

Enfin, l'humidification d'un dépôt solide accumulée constamment sur des surfaces isolantes, quelle que soit sa nature provoque la formation d'une couche électrolytique, caractérisant le phénomène de la pollution [36].

## **II. 4 Classification des sites pollués**

Les sites pollués peuvent être classés selon leur sévérité qui est définie par la norme CEI 81-5, dans le but de définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle. Les quatre classes de sévérité sont les suivantes [37- 38]:

### **II. 4. 1 Faible (0.06 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installations de chauffage

- Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumises fréquemment aux vents et/ou pluies.
- Régions agricoles et montagneuses.

#### **II. 4. 2 Moyenne (0.20 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipée d'installations de chauffage.
- Zones à forte densité d'habitations et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies.
- Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la côte.

#### **II. 4. 3 Forte (0.60 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installations de chauffage polluantes.
- Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.

#### **II. 4. 4 Très forte (> 0.60 mg/cm<sup>2</sup>)**

- Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices.
- Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer.
- Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.

### **II. 5 Formation et la répartition de la couche de pollution [39]**

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépendent de leur profil, de la hauteur et de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et de la tension appliquée. La couche de pollution se forme sur les éléments de la chaîne d'isolateurs au voisinage du conducteur de haute tension et dans les parties protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage. Il résulte que la répartition de la pollution sur les chaînes d'isolateurs n'est pas uniforme [NEU 59] et cette non-uniformité dépend de la longueur des chaînes d'isolateurs.

La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories [STR 83]:

### **II. 5. 1 Non-uniformité longitudinale par groupe**

Constitué d'un groupe d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, qui est constante dans chaque groupe.

Ce type de pollution existe dans les cas suivants:

- pendant le lavage sous tension, elle est momentanée,
- dans les chaînes d'isolateurs en forme de «T»,
- par effet du champ électrique lorsque la pollution se trouve sur les isolateurs proches de la borne haute tension.

### **II. 5. 2 Non-uniformité transversale**

Il est caractérisé par des secteurs de différentes conductivités superficielles de la couche polluante. Ces secteurs sont distribués autour de chaque isolateur de la chaîne d'une manière transversale et dans chaque secteur la conductivité est la même le long de la ligne de fuite. Ce type de pollution est dû à la présence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

### **II. 5. 3 Non-uniformité longitudinale périodique**

Ce type est le plus fréquent. Sa couche de pollution le long de la ligne de fuite a une conductivité qui varie périodiquement, mais elle garde une symétrie circulaire. Ces principales spécifications sont:

- la conductivité de la face inférieure d'isolateur est plus élevée que la face supérieure,
- augmentation du degré de pollution de la zone périphérique vers la zone centrale,
- la pollution est plus accentuée entre les nervures.

## **II. 6 Impact de la pollution**

Les couches polluantes sur la surface des isolateurs engendrent une conductivité électrique superficielle qui modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. La tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte sur la surface isolante provoquant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

### **II. 6. 1 Arc non localisé**

L'arc électrique s'éteint facilement, puis se réamorçage à un autre endroit. Ces arcs peuvent être dus à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un courant de fuite, ou ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur.



## **II. 6. 2 Arc fixe**

L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en se réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de dépôt et celle de la surface de l'isolateur sont en série avec l'arc, pour limiter le courant de l'arc et sa longueur. Ce type d'arc cause la dégradation du support isolant sous un effet thermique.

## **II. 7 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués**

La tenue électrique d'isolateurs dépend des facteurs météorologiques et parmi eux on cite:

### **II. 7. 1 Le vent**

Les particules de pollution sont généralement apportées par le vent, le régime laminaire de ce dernier est perturbé par la présence de l'isolateur qui contient un régime turbulent au niveau des nervures. Donc les particules de pollution vont s'accumuler et se concentrer entre ces nervures. Seule la pluie et la violence du vent peuvent modifier ce processus. Pourtant, un régime d'équilibre est atteint durant une certaine période qui correspond à la saturation de la couche contaminant.

### **II. 7. 2 La pluie**

Le meilleur nettoyage des surfaces polluées des isolateurs se fait en présence d'une forte pluie, par contre, les fines pluies peuvent mouiller les surfaces polluées, ce qui provoque le contournement [40].

### **II. 7. 3 L'humidité**

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

### **II. 7. 4 La température**

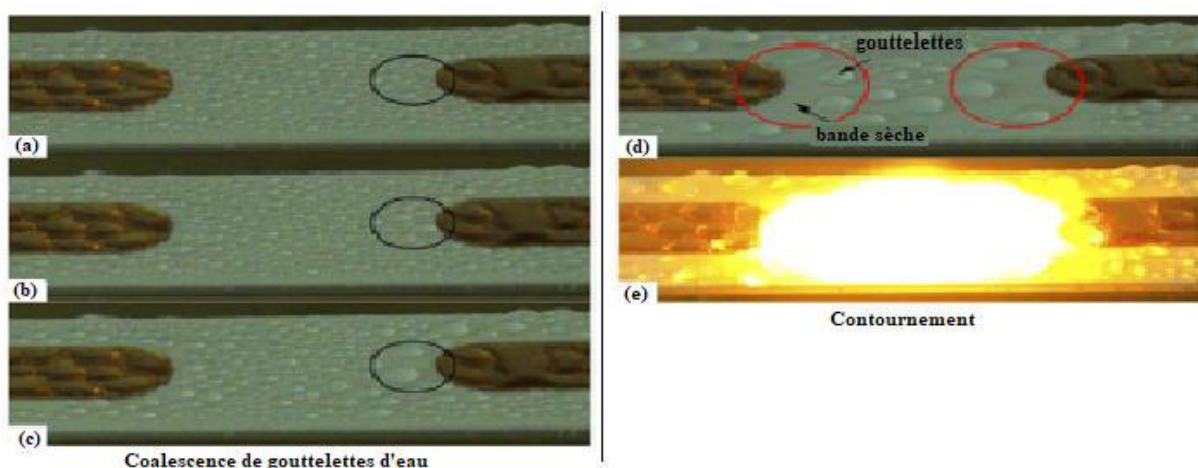
Contrairement à l'humidité, l'élévation de la température conduit à l'assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité, ce qui implique que la tenue des isolateurs contaminés devienne plus importante. Cependant, la variation de la température pendant la journée provoque le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

## II. 8 Conséquences de la pollution sur les équipements électriques

### II. 8. 1 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe [27]

#### II. 8. 1. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale

Le processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe placée horizontalement passe par 2 étapes: la coalescence de gouttelettes d'eau (Figs. II. 1a, 1b, 1c et 1d) et le contournement (Fig. II. 1e) de l'isolation. Après l'application de la tension, les petites gouttelettes, se coalescent et forment de grosses gouttelettes. L'élévation au niveau de la tension fait augmenter le volume de ces grosses gouttelettes d'eau après leur coalescence sur sa surface. Avec l'élévation du volume le nombre total des gouttelettes d'eau diminue. Par conséquent il en résulte la génération de plusieurs zones sèches réparties sur toute la surface de l'isolation.

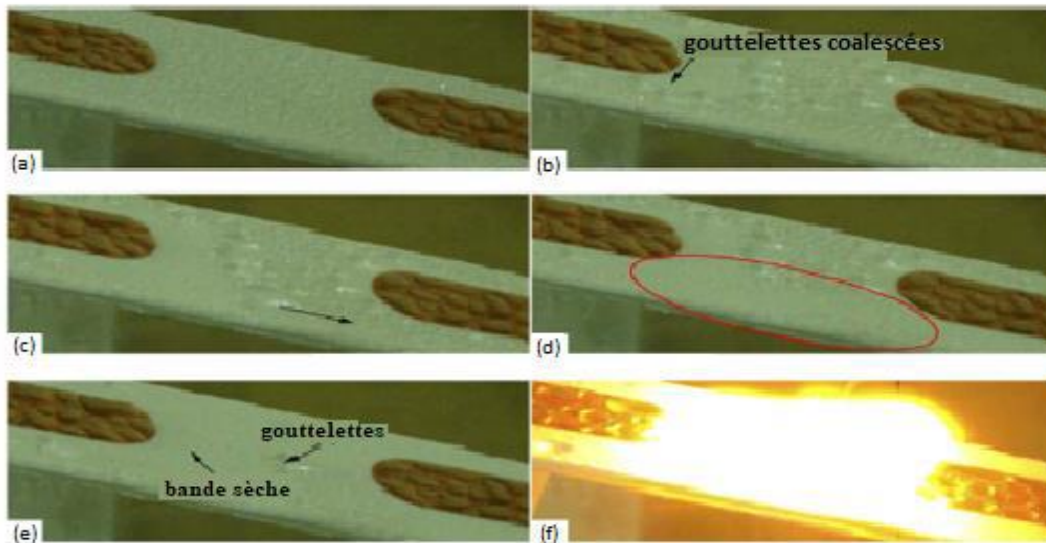


**Fig. II. 1:** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale et recouverte de gouttes d'eau (a – c: Coalescence de gouttelettes d'eau sous une tension croissante, d: Coalescence de gouttelettes d'eau et formation de multiples zones sèches sur la surface interélectrode, e: contournement de l'isolation)

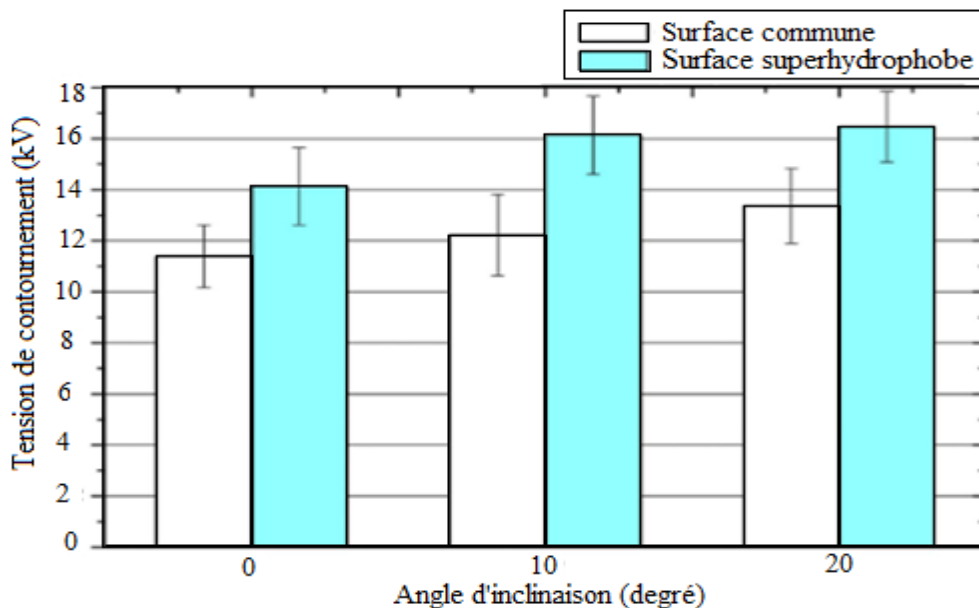
#### II. 8. 1. 2 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20 °

Le processus d'amorçage lorsqu'une surface superhydrophobe est inclinée de 20 °, contient trois parties: coalescence de gouttelettes d'eau, glissement des gouttelettes d'eau et contournement de l'isolation (Fig. II. 2f). En présence de tension, les gouttelettes d'eau coalescent pour former de grosses gouttelettes d'eau (Figs. II. 2b. 2c. 2d et 2e). Ces gouttelettes coalescées glissent très facilement sur la surface superhydrophobe, en raison de sa faible adhérence, et puis beaucoup de gouttelettes quittent la surface pour qu'il reste à la fin

Une petite quantité, et la bande sèche est plus grande que dans le cas d'une surface hydrophobe (Figs. II. 2d et 2e).

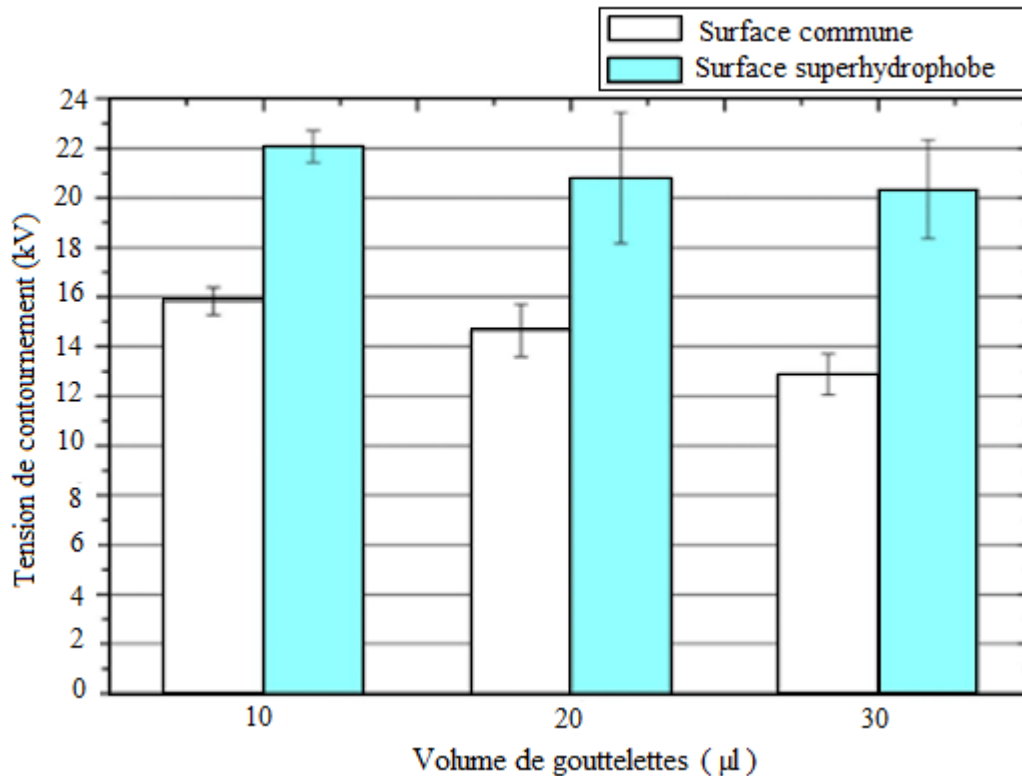


**Fig. II. 2 :** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de  $20^\circ$  et recouverte de gouttes d'eau (a: Dépôt par pulvérisation de gouttes d'eau sur la surface hors tension, b: Mouvement et coalescence de quelques gouttes d'eau et formation de petites zones sèches, c: Poursuite de la coalescence des gouttes d'eau et augmentation de la surface de zones sèches, d: Formation d'une grande zone sèche (indiquée sur la figure par un cercle rouge), e: Poursuite de l'agrandissement de la zone sèche interélectrode, diminution accrue du nombre de gouttelettes d'eau, f: Contournement de la surface isolante interélectrode)



**Fig. II. 3a:** Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction de leur inclinaison

Sous brouillard salin, la tension d'amorçage augmente en fonction de la croissance de l'angle d'inclinaison de l'isolation (Fig. II. 3a). La tension de contournement de l'isolation superhydrophobe ne dépend pas du volume des gouttes d'eau déposées sur sa surface (Fig. II. 3b). Enfin l'auteur a démontré que la tension de contournement d'une surface superhydrophobe est supérieure à celle hydrophobe.



**Fig. II. 3b:** Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction du volume des gouttes d'eau les recouvrant

## II. 9 Techniques de lutte contre la pollution

Elles permettent d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution.

### II. 9. 1 Allongement de la ligne de fuite

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

- 1- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite): c'est une opération très difficile à cause de son coût et sa complexité.
- 2- Prolonger la ligne de fuite en matériaux polymères collés sur la surface des isolateurs existants [41-42].

### **II. 9. 2 Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)**

Les isolateurs plats sont très utilisés car ils conduisent à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures peuvent accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont généralement utilisés dans les régions désertiques [43].

### **II. 9. 3 Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)**

Le graissage protège temporairement les isolateurs grâce à ses propriétés hydrophobes. La durée du graissage dépend à la fois de deux facteurs, l'environnement (pollution, conditions climatiques) et la qualité du produit utilisée. Elle est généralement d'une durée qui varie entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est difficile à réaliser, longue et coûteuse et nécessite une interruption de service [44].

### **II. 9. 4 Revêtements à base de silicones**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou avec un pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à une température ambiante à la surface des isolateurs. Le même principe que le graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [45].

### **II. 9. 5 Nettoyages sous ou hors tension**

Le nettoyage manuel (hors tension), peut être périodique, en particulier dans les postes. Ces méthodes nécessitent des interruptions de service long puisqu'elles se font hors tension. Afin d'éviter ces coupures on utilise le lavage sous tension qui permet de garder l'isolateur propre. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. On applique des règles concernant la qualité de l'eau de lavage, et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement durant le lavage. Le nettoyage des isolateurs se fait à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression. Cette technique est utilisée pour des pollutions très adhérentes (ciment) et la graisse sur les isolateurs [45].

### **II. 9. 6 Les isolateurs composites**

Ce type d'isolateurs est très avantageux car il est léger, avec une haute résistance mécanique et de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent résister aux conditions de pollutions très sévères. Ces isolateurs ont leurs caractéristiques qui changent au cours du

temps. Ils peuvent vieillir à cause des contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis lorsqu'ils sont en service.

## **II. 10 Mesure de la sévérité de pollution d'un site**

Afin de réaliser celle-là on passe par différentes méthodes basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées [44]. Les principales méthodes citées sont les suivantes:

### **II. 10. 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 II. 1.

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

Pour mesurer la conductivité superficielle on multipliera la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur [43]. Cette méthode caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche). Ainsi, la mesure de la conductance est utilisée pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général elle présente des résultats dispersés [35-46].

### **II. 10. 2 Mesure optique**

Afin de déterminer l'épaisseur de la couche polluante sur la surface de l'isolateur, on utilise un dispositif à rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, etc.) pour calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche [46]. La mesure de sévérité de la pollution peut être calculée facilement sans toucher la couche.

### **II. 10. 3 Mesure de la pollution de l'air**

Les mesures de la pollution de l'air permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air dans un site sur une période précise. Les méthodes de mesure sont choisies à partir du principe du phénomène de contournement, une relation 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 [47-48].

### **II. 10. 4 Densité du dépôt non soluble (DDNS) [49]**

La densité de dépôt non soluble représente la quantité de produits non solubles dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (Fig. II. 1) s'effectue comme suit:

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

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A}$$

II. 2

Où:

DDNS: La densité de dépôt non soluble en mg/cm<sup>2</sup> ;

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

m<sub>i</sub>: La masse initiale du papier filtre en mg ;

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

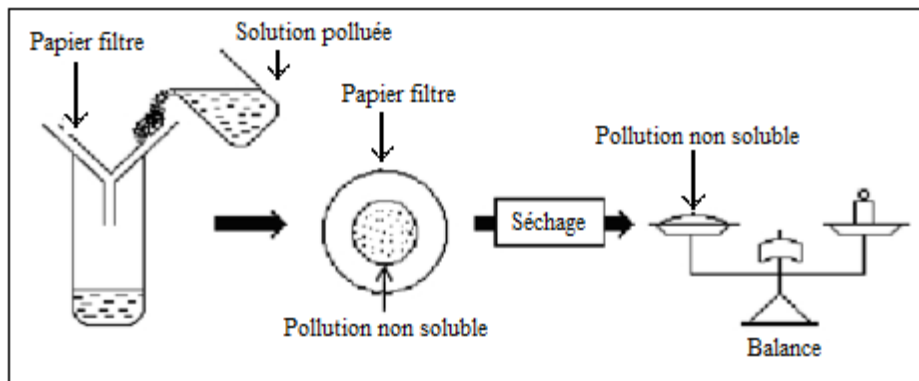


Fig. II. 4: Schéma et procédé de mesure de la DDNS

### II. 10. 5 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par cm<sup>2</sup> de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle lorsqu'il est mis dans la même quantité d'eau. Les échantillons de pollution retenus sur la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs sont récupérés par un lavage, à l'aide d'un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. La DDSE peut être déterminée à partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température. Pour déterminer la sévérité du site, les mesures sont répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel. Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage. Comme Elle peut présenter 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 considération [35].



## **II. 11 Méthodes d'essais sous pollution**

Afin de déterminer le meilleur comportement des isolateurs sous pollution, on effectue des essais, pour deux méthodes: une sous pollution naturelle et l'autre sous pollution artificielle. Ces essais peuvent être effectués sur site dans les conditions naturelles ou au laboratoire [48].

### **II. 11. 1 Essai sous pollution naturelle**

Dans ce type d'essai, on installe dans différents sites pollués, des stations dans le but de suivre le comportement d'une chaîne d'isolateurs. Comme la pollution naturelle est un phénomène à évolution lente, ses essais peuvent prendre beaucoup de temps ce qui est un inconvénient. La qualité des isolateurs est déterminée à partir de temps au contournement.

Ce type d'essais est nécessaire pour étudier les principales sources de pollution et leurs impacts sur l'isolement des ouvrages [48].

### **II. 11. 2 Essais sous pollution artificielle**

La reproduction de la couche de pollution durant les essais au laboratoire se fait par la répartition des solutions sur une surface isolante de conductivité différente. Afin de valider les essais sous pollution artificielle, on réalise une comparaison entre les performances des isolateurs utilisés au laboratoire et les isolateurs exploités dans des conditions naturelles. Une première approche consiste à rechercher la meilleure méthode pour la simulation des conditions naturelles de pollution répartie non uniformément.

Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faire une comparaison juste des performances des différents types d'isolateurs [48- 50].

#### **II. 11. 2. 1 Méthode de la couche solide**

Concernant ces méthodes, la surface isolante est recouverte d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. On règle la conductivité de cette solution en ajoutant une certaine quantité de chlorure de sodium. Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), la sévérité est déterminée par la densité de dépôt de sel en mg/cm<sup>2</sup>. Par contre, si l'humidification se fait avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante. Quelques chercheurs utilisent la couche semi-conductrice comme agent polluant [30].



### **II. 11. 2. 2 Méthode du brouillard salin**

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente la pollution marine contenant une quantité de matière insoluble. L'isolateur dans cette méthode soumis à la tension d'essai est placé dans un brouillard salin avec un taux de salinité déterminant la sévérité. Les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon la classification des sites pollués allant de 2.5 à 160 kg/m<sup>3</sup> [30].

### **II. 11. 2. 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. Ce qui implique que la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle contient de l'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Le même principe que la méthode de la couche solide, la conductivité est ajusté par addition de chlorure de sodium. Comme la surface de l'isolateur n'est pas séchée, la tension d'essai peut être appliquée sans humidification supplémentaire [30].

## **II. 12 Conclusion**

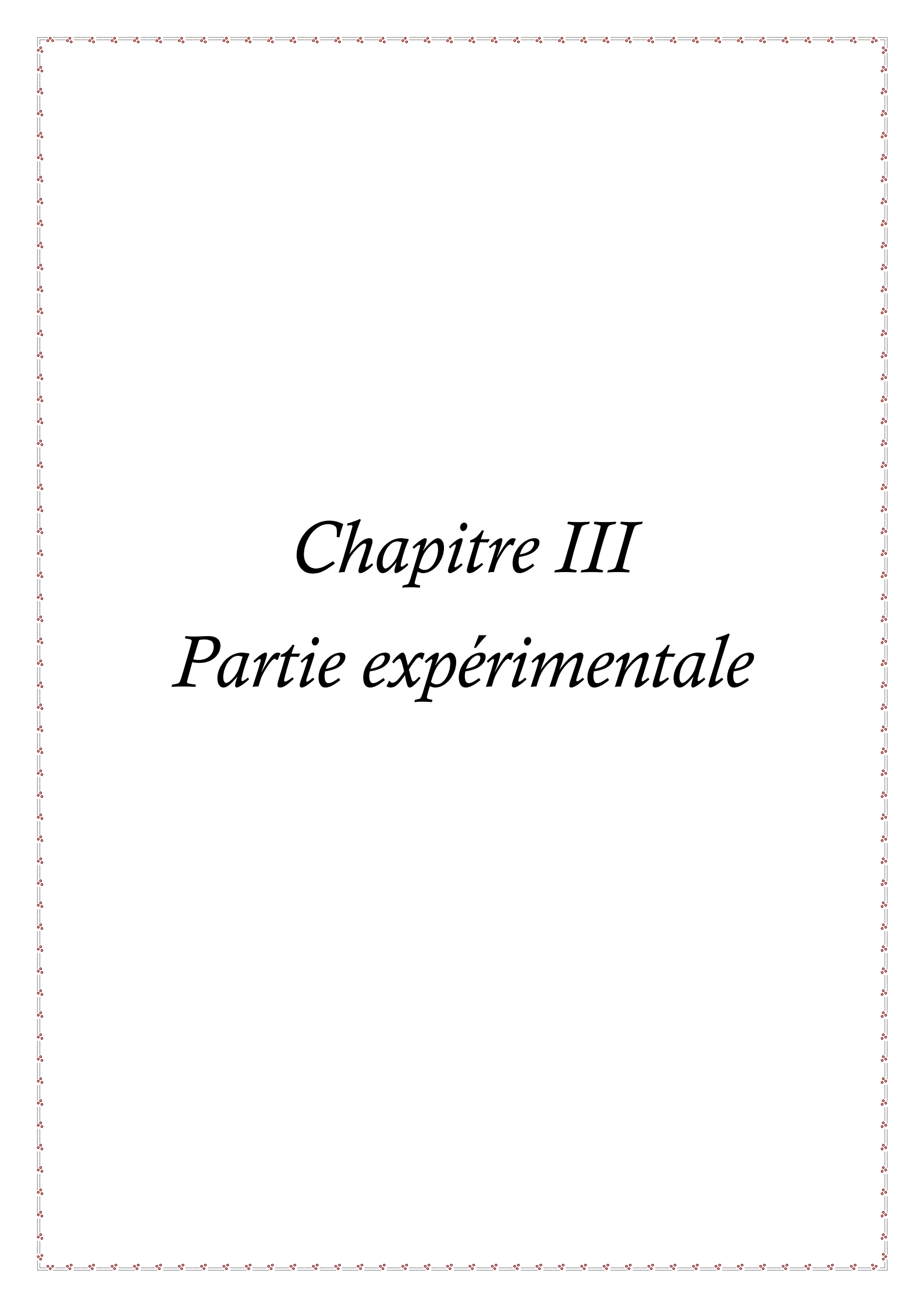
Le comportement des isolateurs des lignes aériennes, et l'isolement externe d'une manière générale, est souvent affecté par le phénomène du contournement dû à la pollution atmosphérique.

L'optimisation de l'isolement est importante pour minimiser les pertes occasionnées par le contournement. L'étape essentielle pour le dimensionnement d'une chaîne d'isolateur est la connaissance de la sévérité de la pollution des sites concernés, en effectuant une étude dans le but de déterminer les différents paramètres de la dégradation d'une isolation.

L'inconvénient de cette étude est sa temporisation qui peut durer trois ans au moins. Et pour cela la meilleure méthode est la méthode d'essai sous pollution artificielle qui se base sur la reproduction des conditions de pollution naturelle au laboratoire, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

Aujourd'hui plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont exploitées sur le terrain (graissage, lavage, revêtements hydrophobes...).

La performance électrique d'une isolation dans un milieu pollué et humidifié varie selon l'état de la surface de l'isolation (hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe).



# *Chapitre III*

## *Partie expérimentale*

### III. 1 Introduction

Durant les travaux antérieurs réalisés, trois géométries d'électrodes ont été utilisées, électrodes à dents, électrodes pleines et électrodes à pont. Seule ces dernières permettent l'expulsion des gouttes à l'extérieur de la surface superhydrophobe [51]. Pourtant certaines gouttes restent parfois coincées sous les électrodes lors de leur évacuation de la surface sous une tension alternative. Leur persistance et leur effilement sous un champ électrique entraîne le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de la surface isolante, ce qui donne naissance à des décharges électriques entre les électrodes et engendrent le contournement de l'isolation. Pour éviter ce phénomène nous avons recherché un autre profil d'électrodes et une autre manière de leur disposition sur l'isolation afin de pouvoir expulser toutes sortes de gouttes d'eau déposées sur sa surface quels que soient leurs paramètres électrogéométriques.

### III. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure

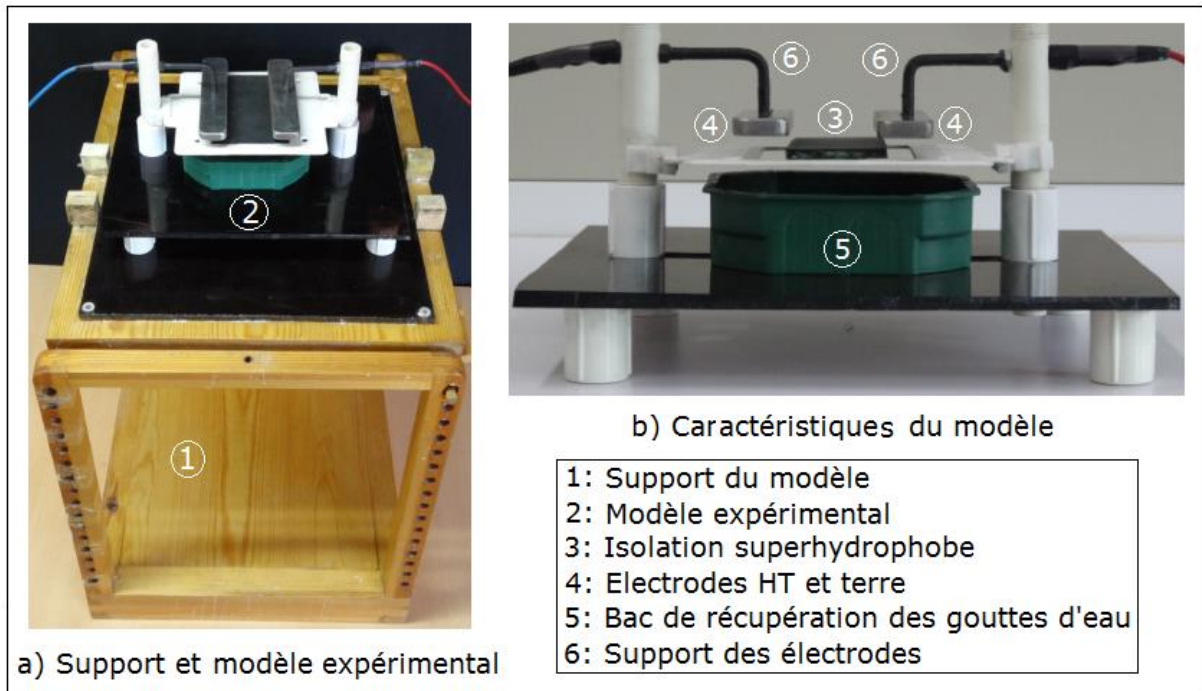
#### III. 2. 1 Modèle expérimental

Un support en bois à paroi supérieure mobile a été réalisé. Il a la forme d'un parallélépipède de dimensions: 500 mm x 500 mm x 400 mm. Sa face supérieure est reliée à une rotule lui permettant de prendre, par exemple, la position horizontale correspondant à un angle d'inclinaison  $\alpha = 0^\circ$  (Fig. III. 1a1). La fixation d'un angle d'inclinaison quelconque peut être effectuée à l'aide de deux tiges en bois vernissées. Celles-ci passent par des trous appropriés et réalisés spécialement sur les deux faces verticales opposées du support afin de la bloquer à une position correspondant à l'angle choisi.

Dans les travaux antérieurs [51], trois géométries d'électrodes parallélépipédiques pleines à bornes arrondies, cylindriques à dents et cylindriques à pont, ont été fabriquées. Parmi ces profils, seul le dernier facilite l'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation, avec un accrochage rare des gouttes d'eau aux pieds des électrodes à pont sous tension et terre. Leur persistance et leur effilement engendre la formation de décharges électriques partielles et/ou de contournement du matériau et par conséquent son vieillissement. Afin de contourner ce problème, les électrodes confectionnées dans le cadre de cette étude sont en acier inoxydable, de forme parallélépipédique et très arrondies à leurs extrémités. Leur largeur ( $l_e$ ) est de 3 cm (Fig. III. 5), leur longueur ( $L_e$ ) de 12 cm (Fig. III. 6) et leur épaisseur ( $e_e$ ) est égale à 0,8 cm [29]. La ligne de fuite de l'isolation est de 4 cm (Fig. III. 6).

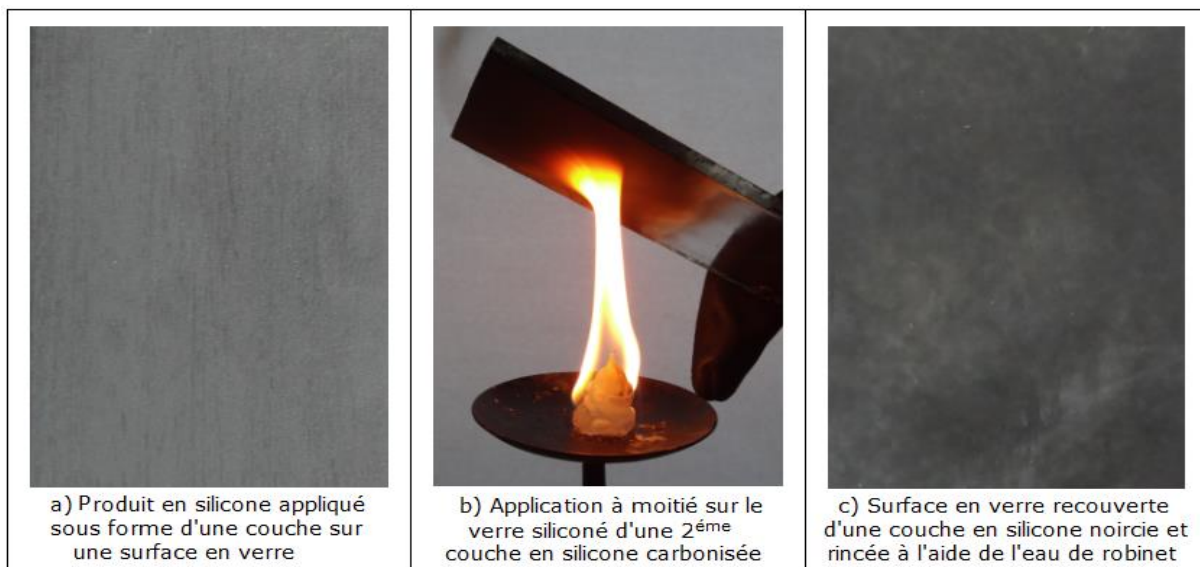
Elles sont suspendues à 10 mm de la surface de l'isolation superhydrophobe à l'aide de deux pitons. Cette ouverture facilite l'évacuation des gouttes d'eau de la surface de l'isolation et leur récupération par le bac en couleur verte et leur réutilisation (Fig. III. 1b5). Le support en

bois est peint de plusieurs couches de vernis afin de l'empêcher d'absorber les gouttes d'eau quittant la surface de l'isolation inclinée et atterrissant sur la paroi inférieure de celui-ci à la fin de chaque essai d'éjection des gouttes d'eau.



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

### III. 2. 2 Préparation d'une isolation à surface superhydrophobe

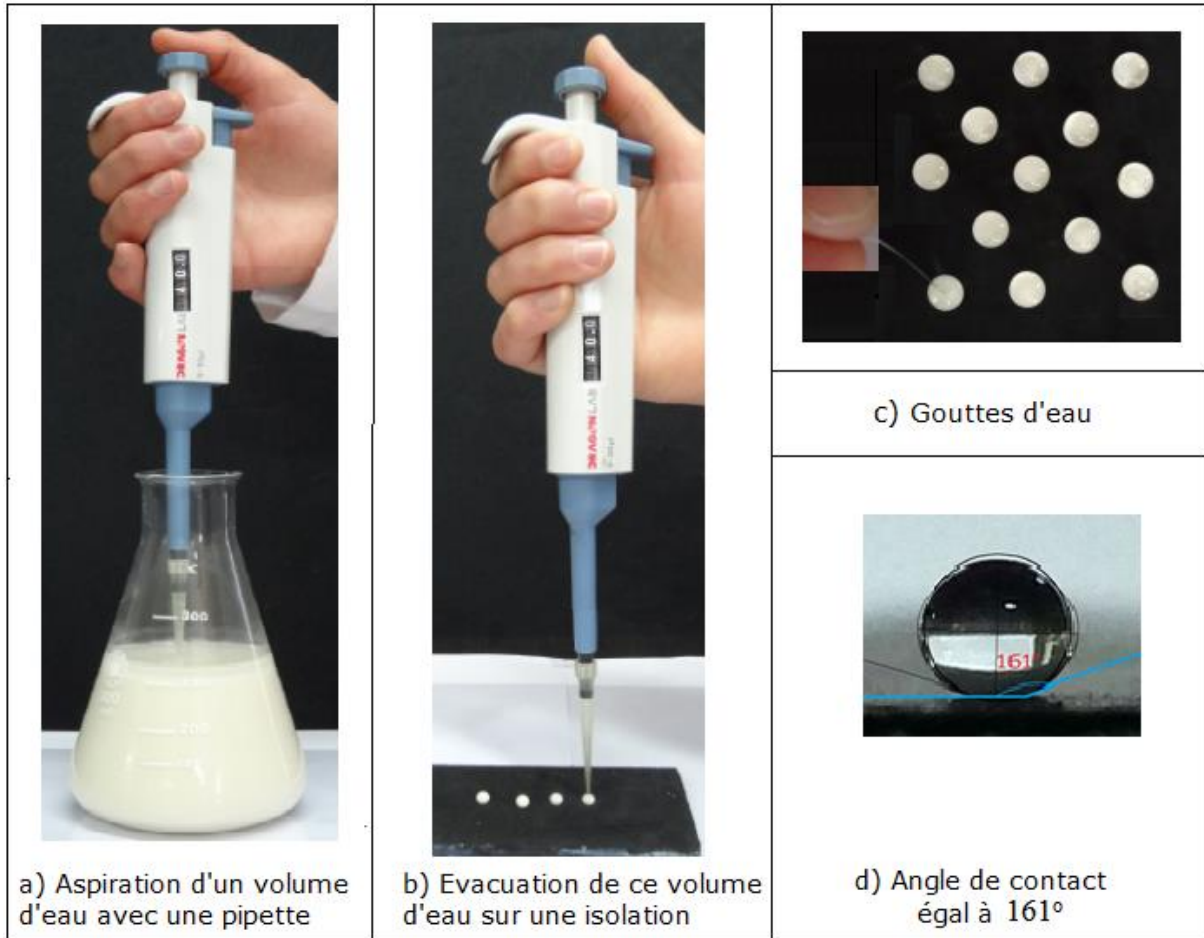


**Fig. III. 2:** Phases de confectionnement d'une isolation superhydrophobe à base de silicone

La figure III. 2 résume les étapes essentielles exploitées pour la confection d'une surface superhydrophobe à base de silicone. La figure III. 2a montre un produit en silicone utilisé sous forme d'une couche mince et apportée manuellement sur la plaque en verre. Sur la figure

III. 2b est indiqué la manière avec laquelle la surface suscitée est noircie à moitié à l'aide de la carbonisation d'une certaine quantité du même produit en silicone. La figure III. 2c illustre le noircissement total de la surface de l'isolation en verre munie d'une couche de silicone. L'image donnée sur cette figure correspond à une plaque recouverte d'une couche de suie lavée et rincée à l'eau de robinet.

### III. 2. 3 Volume des gouttes d'eau et leur angle de contact



**Fig. III. 3:** Mesure du volume d'une goutte d'eau à l'aide d'une micropipette et son angle de contact

Le volume des gouttes d'eau est mesuré à l'aide d'une micropipette, graduée de 5 à 100  $\mu\text{l}$ . Le choix de la quantité d'eau à aspirer d'un bécher par la pipette est réglé grâce à son compteur (Figs. III. 3a et III.3b). Cette même quantité d'eau est déposée sous forme de gouttes d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. III. 3c). La mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau sur la surface superhydrophobe préparée est effectuée au moyen d'un logiciel (Image J) disponible sur internet. Sa valeur est de l'ordre de 161 ° (Figs. III. 3c et III. 3d).

Plusieurs échantillons ont été confectionnés de la même manière et mis dans un dessiccateur afin de les conserver à l’abris de toute humidité régnant au laboratoire d’essai ou leur enlever celle accumulée sur leur surface durant la période de leur essai sous tension alternative (Fig. III. 4a).

Plusieurs solutions avec ou sans kaolin ont été préparées et mises en bouteilles. Ces solutions contiennent de l’eau distillée et du sel de cuisine. La masse de kaolin ajoutée à la solution est mesurée à l’aide d’une balance électronique (Fig. III. 4b) et sa conductivité électrique au moyen d’un conductimètre à sonde mobile (Fig. III. 4c).

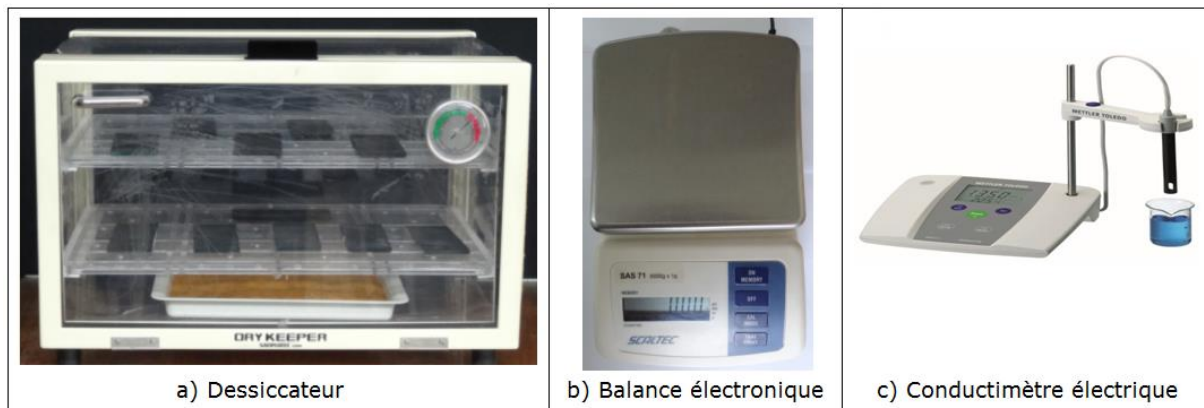


Fig. III. 4: Dessiccateur, balance électronique et conductimètre à sonde mobile

### III. 2. 4 Arrangement des gouttes d’eau

Dans le cadre de cette investigation deux types d’arrangements en lignes droites et en zigzag de plusieurs rangées de gouttes d’eau sur la surface de l’isolation ont été exploités (Figs. III. 5 et III. 6).

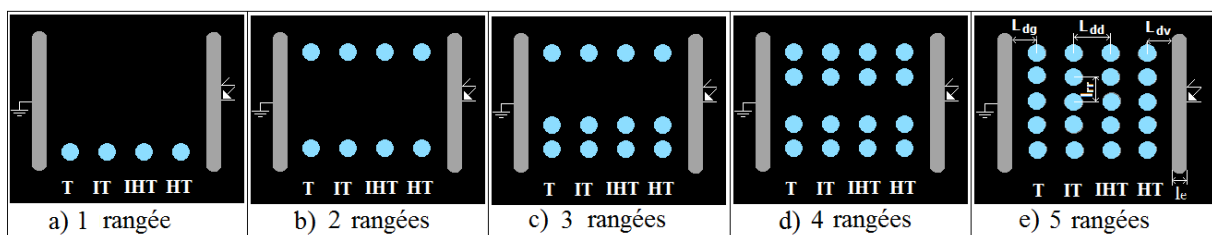
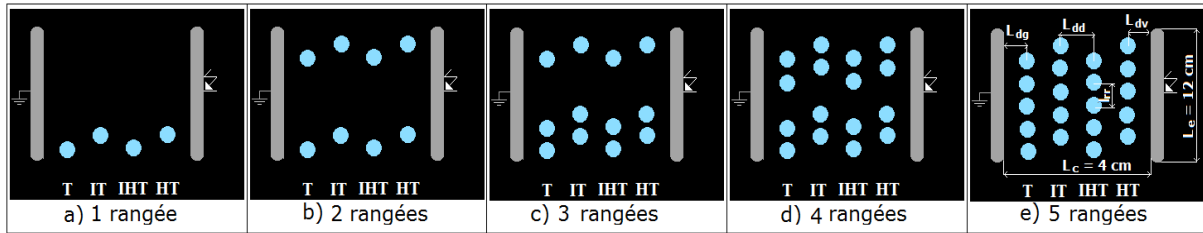


Fig. III. 5: Variation du nombre de rangées de gouttes d’eau sous arrangement en lignes droites

Les rangées disposées en lignes droites le long de la ligne de fuite de l’isolation (Fig. III. 5) sont composées chacune d’un ensemble de 4 gouttes alignées de telle sorte que les distances entre les centres de celle-ci et les électrodes sous tension  $L_{dv}$  et terre  $L_{dg}$  ainsi que celle séparant les centres des deux gouttes d’eau adjacentes sur la ligne de fuite  $L_{dd}$  ou le long des électrodes  $L_{TT}$  sont maintenues constantes tout au long de l’expérimentation. Les rangées en zigzag comprennent chacune d’elle un ensemble de 4 gouttes déposées en décalage l’une par



rapport à l'autre le long de sa ligne de fuite de telle manière que le chemin de leur liaison à travers leur centre ressemble à la lettre W ou M (Fig. III. 6). Quel que soit le mode d'arrangement, le nombre de rangées de gouttes est varié entre 1 et 5 (Figs. III. 5 et III.6).



**Fig. III. 6:** Variation du nombre de rangées de gouttes d'eau sous arrangement en zigzag

Le choix de ces deux types d'arrangement est justifié par le fait que l'arrangement en zigzag des gouttes d'eau est le plus proche de celui rencontré dans la nature lors des phénomènes de condensation ou de pluie naturelle [52]. Par contre l'arrangement en ligne droite est choisi afin de simuler le phénomène de coalescence de gouttes d'eau lors de leur évacuation de la surface de l'isolation superhydrophobe.

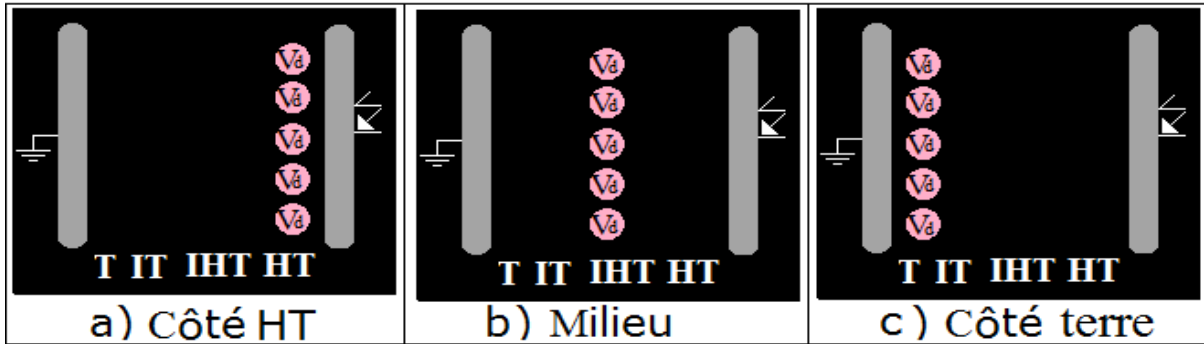
Concernant l'emplacement de la première rangée de gouttes d'eau, il existe plusieurs possibilités. Celle-ci peut être tout d'abord placée parallèlement (dans le cas des trois paramètres: volume (Figs. III. 7 et III.8) conductivité (Figs. III.9 et III.10), concentration en kaolin (Fig. III. 11), ou perpendiculairement aux électrodes sous tension et terre. Dans le premier cas, la rangée peut être déposée au voisinage proche de l'électrode HT ou terre ou bien dans la zone intermédiaire.

Dans le deuxième cas, la première rangée peut être apportée aux extrémités droite ou gauche de l'isolation ou bien dans la zone intermédiaire parallèle à la ligne de fuite de celle-ci (Figs. III. 5 et III. 6). Le but recherché à travers cette configuration consiste en la création et la simulation de deux zones l'une humide et l'autre sèche et leur position sur la surface de l'isolation.

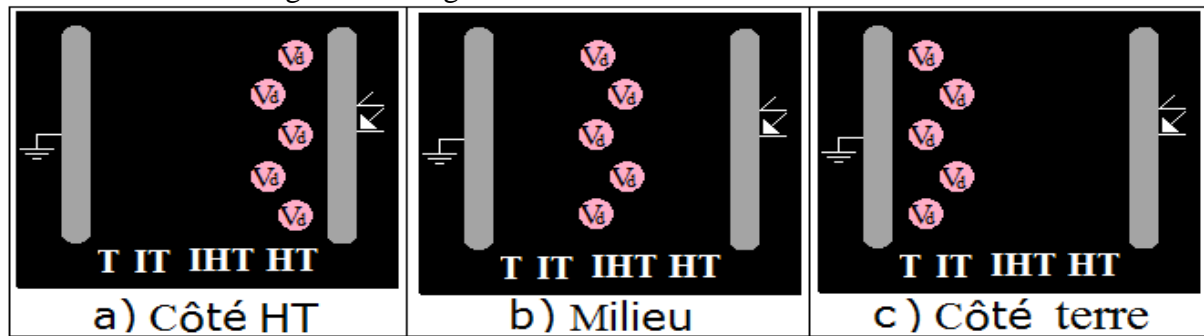
### III. 2. 5 Volume des gouttes d'eau

L'étude de l'effet des valeurs du volume des gouttes d'eau sur la performance électrique de l'isolation superhydrophobe est effectuée en prenant une seule rangée de 5 gouttes d'eau et en choisissant des valeurs de leur volume égales à (10, 20, 30, 40, 60 et 80)  $\mu\text{l}$ . La prise en considération de ces valeurs est justifiée par le fait que la taille des gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle est très différente. La position de la rangée des côtés HT, terre et au milieu de l'isolation a été prise en considération.





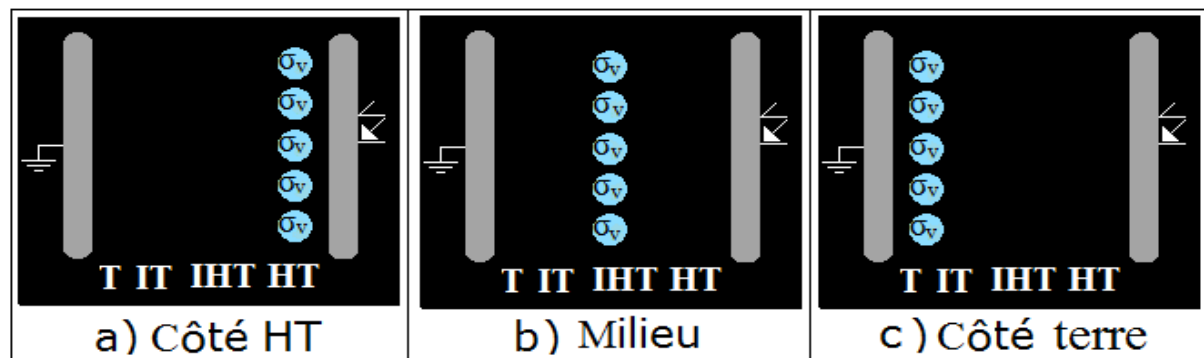
**Fig. III. 7:** Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à volume variable sous un arrangement en ligne droite



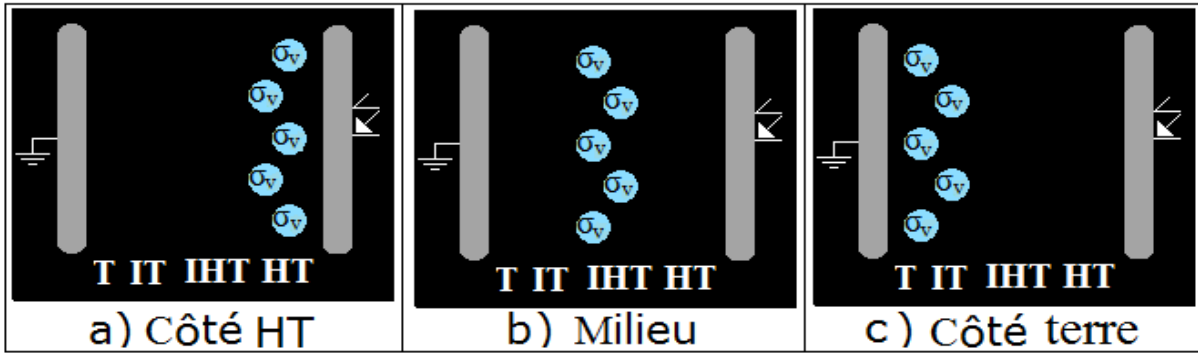
**Fig. III. 8:** Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à volume variable sous un arrangement en zigzag

### III. 2. 6 Conductivités des gouttes d'eau et masse de kaolin ajoutée à la solution

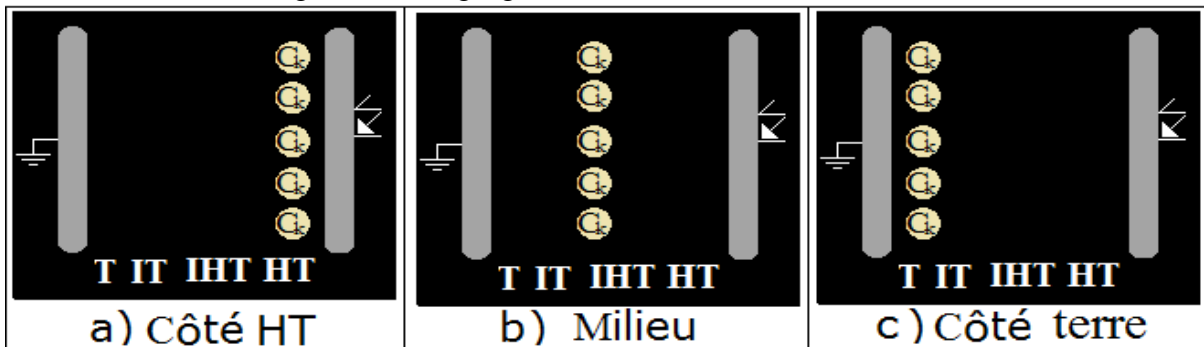
L'eau utilisée dans cette étude n'est pas pure. Selon les divers paramètres d'influence de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la dite isolation, la solution employée peut contenir en plus de l'eau, du chlorure de sodium de telle sorte à varier la conductivité électrique des gouttes d'eau. L'intervalle de conductivité électrique de la solution polluante est variée entre 0.5 mS/cm et 20 mS/cm (Figs. III. 9 et III. 10) de telle sorte à simuler les niveaux de pollution des sites compris entre un niveau de contamination très léger et un celui très fortement contaminé, ou du kaolin dont la masse est variée entre 0 et 120 g (Fig. III. 11) pour l'épaississement de la couche polluante.



**Fig. III. 9:** Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à conductivité variable sous un arrangement en ligne droite



**Fig. III. 10:** Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à conductivité variable sous un arrangement en zigzag

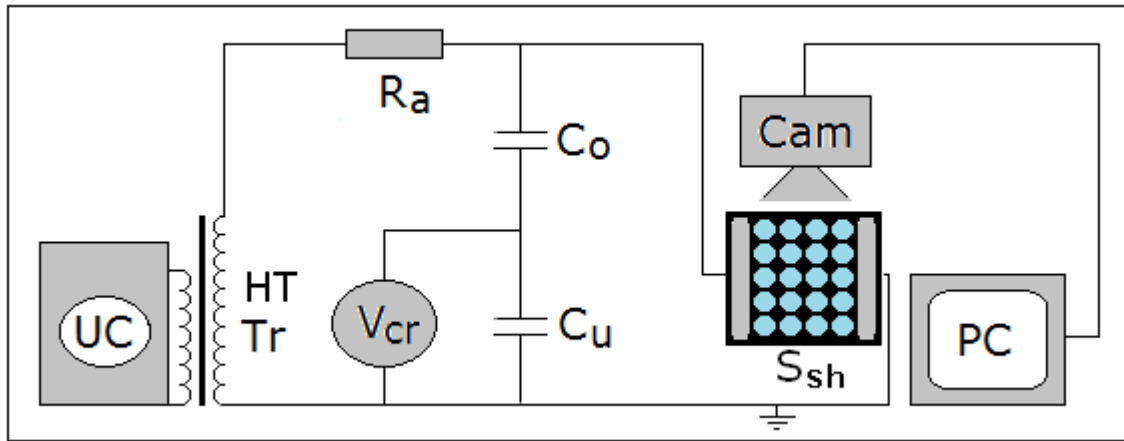


**Fig. III. 11:** Position d'une rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation à concentration en kaolin variable sous un arrangement en ligne droite

### III. 2. 7 Tension d'évacuation des gouttes d'eau

Le schéma de la figure III. 12 est composé d'un circuit de mesure de la tension de contournement d'une surface isolante superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau et d'un circuit de visualisation de l'évacuation des gouttes d'eau de la surface d'une telle isolation. La station d'essai est constituée d'un transformateur haute tension (0,08A/135kV) et une résistance d'affaiblissement de courant  $R_a$ , un diviseur de tension capacitif ( $C_o/C_u$ ), un voltmètre de crête ( $V_{cr}$ ) à affichage numérique et une surface superhydrophobe isolante ( $S_{sh}$ ). Le circuit de visualisation comprend une caméra rapide (Cam) pour l'enregistrement des différentes séquences de développement de la décharge électrique évoluant sur la surface superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau et un PC pour le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Free Vidéo.

Sur cette station une série de 20 essais a été réalisée pour chaque paramètre étudié. La valeur de la tension d'évacuation de chaque goutte quittant la surface est déterminée à partir du calcul de la moyenne arithmétique de l'ensemble de tensions trouvées dans tous les essais. Moyennant la très bonne répétitivité des techniques de mesure exploitées dans cette étude, l'erreur maximale relative obtenue est égale à 5 % de cette valeur moyenne [53-54].



**Fig. III. 12:** Schéma de mesure de la tension d'évacuation des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes (Tr: Transformateur, UC: Appareil de commande de la tension, S<sub>sh</sub>: Surface superhydrophobe, Cam: Caméscope, PC: Ecran Ordinateur)

### III. 3 Résultats et discussion

#### III. 3. 1 Mode d'expulsion des gouttes d'eaux en dehors de l'isolation superhydrophobe

Surface superhydrophobe sans gouttes d'eau	Nombre d'essais	Tension de contournement à sec (valeur efficace)	Conditions atmosphériques
Plaque n°1	22	38.3 kV	P <sub>a</sub> = 1009 hPa, H <sub>r</sub> =54 %, T = 23 °C

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

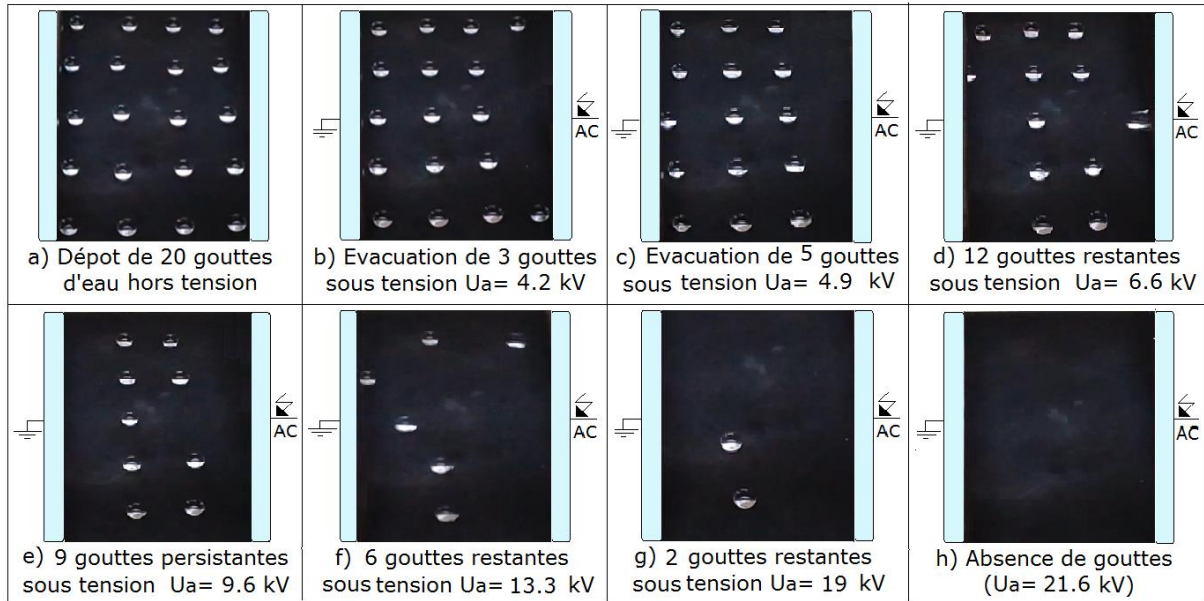
Trois modes d'évacuation des gouttes d'eau sous arrangements en zigzag et en lignes droites en dehors de la surface de l'isolation superhydrophobe ont été répertoriés: éjection individuelle, par groupes, ou bien grupo-individuelle des gouttes d'eau. Le mode d'expulsion par groupes signifie qu'elle s'effectue sous forme d'un ensemble de groupuscules de gouttes d'eau quittant séparément et successivement la surface de l'isolation. L'évacuation individuelle se traduit par une expulsion une par une de l'ensemble des gouttes d'eau. Enfin le mode d'évacuation grupo-individuelle est la combinaison des deux types précédents et consiste en une éjection successive d'un ensemble de groupuscules de gouttes d'eau, accompagnés chacun d'eux, parfois, d'une goutte d'eau individuelle. Pour ce qui est du sens du déplacement des gouttes, celui-ci a lieu dans les deux directions, c'est-à-dire, vers les électrodes sous tension et terre. Il résulte de la visualisation du mode d'évacuation des gouttes d'eau, une apparition plus fréquente du mode d'expulsion grupo-individuelle et bidirectionnelle de celles-ci.

La figure III. 13 résume certaines phases importantes du mode d'évacuation grupo-individuelle et bidirectionnelle de vingt gouttes d'eau, arrangées en lignes droites. La figure III. 13a illustre l'arrangement en lignes droites de 20 gouttes d'eau recouvrant la surface de

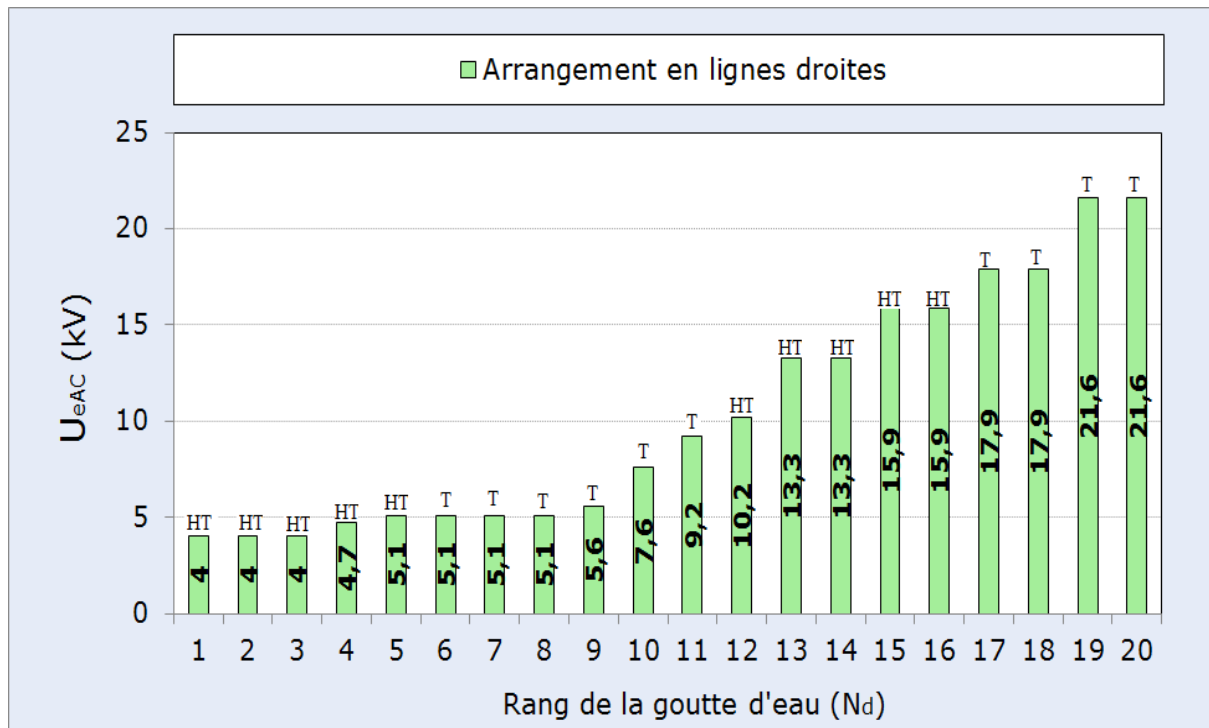
l'isolation superhydrophobe hors tension. L'image de la figure III. 13b correspond à une phase où 3 gouttes d'eau de la rangée avoisinant l'électrode sous tension ont été expulsées à l'extérieur de l'isolation sous tension égale  $U_a = 4.2$  kV. La figure III. 13c montre la disparition de 5 gouttes d'eau de la rangée proche de l'électrode sous tension à une tension égale  $U_a = 4.9$  kV. La figure III. 13d montre l'évacuation de 8 gouttes des deux côtés HT et terre sous tension égale  $U_a = 6.6$  kV. La figure III. 13e illustre la persistance de 9 gouttes des deux rangées intermédiaire sous tension égale  $U_a = 9.6$  kV. La figure III. 13f montre l'expulsion de 12 gouttes d'eau sous tension égale  $U_a = 13.3$  kV. La figure III. 13g correspond à une phase où 2 gouttes d'eau restantes sous une tension égale  $U_a = 19$  kV. La figure III. 13h donne l'image d'une surface débarrassée de toutes ses gouttes évacuées équitablement des côtés des électrodes sous tension et terre sous tension égale  $U_a = 21.6$  kV.

L'évolution de la tension d'expulsion en dehors de l'isolation de 4 x 5 gouttes d'eau en fonction de leur rang et leur destination, est illustrée par les figures III. 14 et III. 16. Ces dernières donnent l'histogramme caractérisant la tension d'éjection en fonction du numéro de la goutte d'eau évacuée de la surface de l'isolation sous arrangement en ligne droite et en zigzag. L'histogramme de la figure III. 14 reflète un mode d'évacuation groupo-individuelle bidirectionnelle de gouttes d'eau. Celui-ci est subdivisé en 11 séquences. La première est caractérisée par une expulsion d'un groupe de 3 gouttes d'eau de la surface de l'isolation vers l'électrode HT sous une tension égale à 4 kV avec un rapport de 10.4 % de celle de son contournement. Lors de la deuxième séquence, une goutte d'eau individuelle est évacuée de la surface de l'isolation avoisinant l'électrode HT en direction de cette dernière sous une tension de l'ordre de 4.7 kV avec un rapport de 12.2 % de celle de son contournement sans celles-ci. Ce groupe est suivi par l'éviction de 4 gouttes en dehors de la surface sous une tension égale à 5.1 kV. Une expulsion successive de 4 gouttes individuelles sous tension respective égale à (5.6, 7.6, 9.2, 10.2) kV. Quatre séries de deux gouttes ont été éjectées successivement en dehors de l'isolation correspondant à des tensions respectives (13.3, 15.9, 17.9, 21.6) kV. Il est à constater que le nombre de gouttes d'eau transitant par les électrodes HT et terre est pratiquement le même (Figs. III. 14 et III. 16).

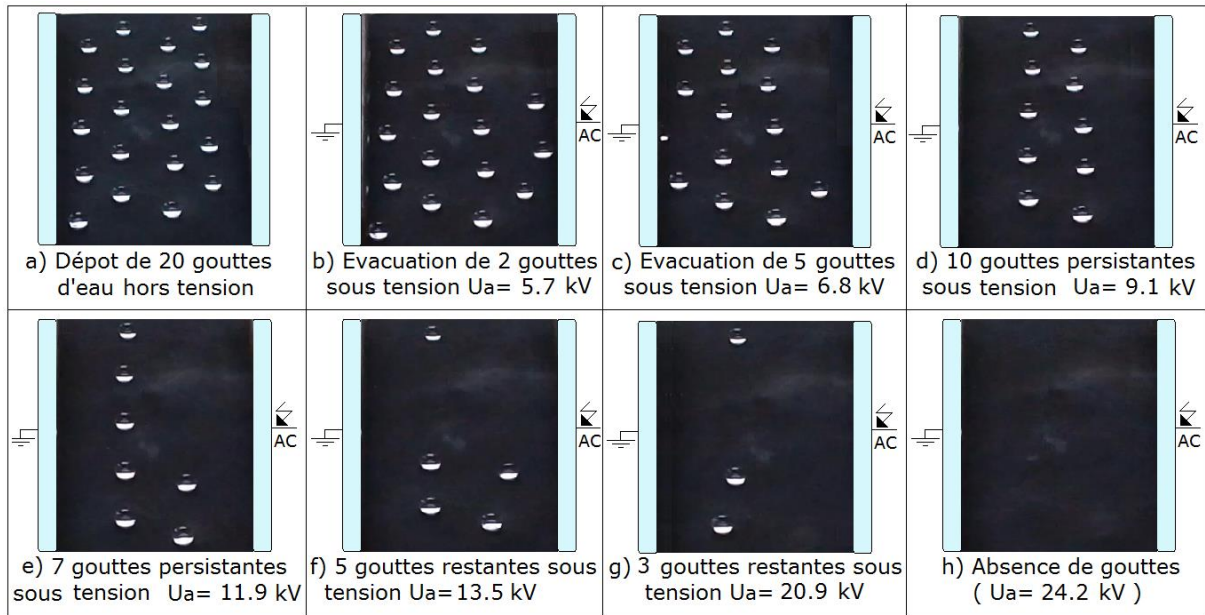
Sachant que la tension de contournement de l'isolation sans gouttes est de l'ordre de 38.3 kV (Tab. III. 1), il ressort de la figure III. 15 une évacuation similaire à celle de l'arrangement en lignes droites, la seule différence réside au niveau de la valeur de la tension qui est légèrement plus élevée.



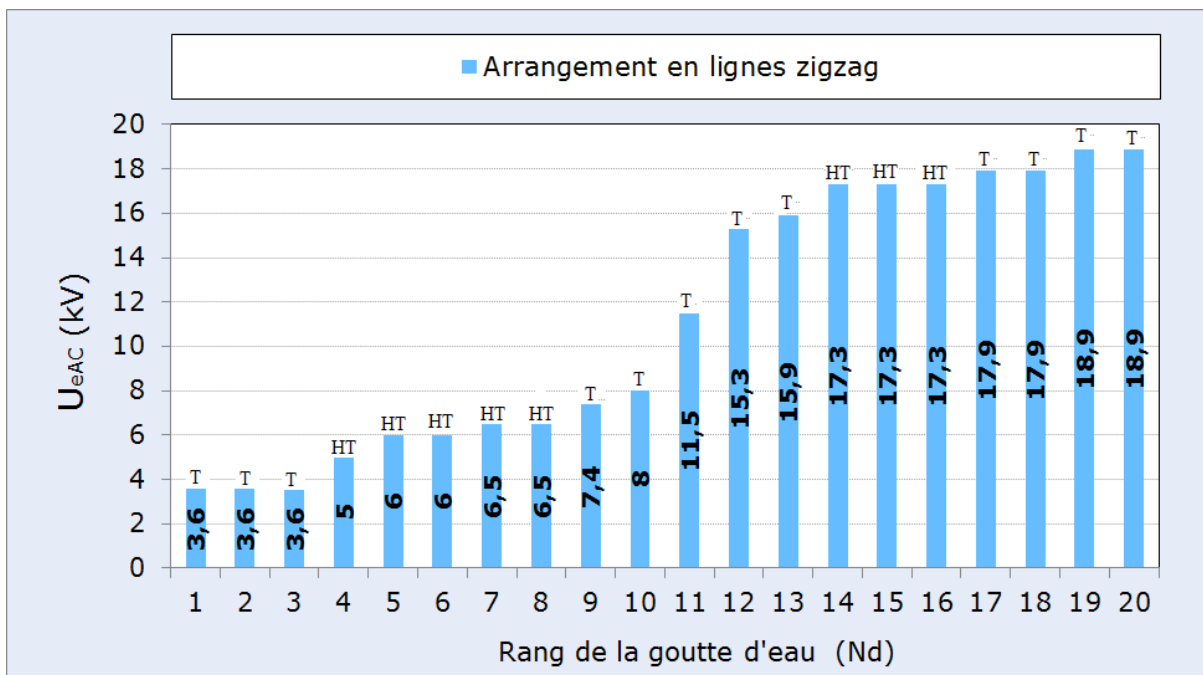
**Fig. III. 13:** Phases essentielles d'évacuation groupo-individuelle et bidirectionnelle de 20 gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



**Fig. III. 14:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour un arrangement en lignes droites de 4 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



**Fig. III. 15:** Etapes essentielles d'expulsion groupe-individuelle et bidirectionnelle de 20 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en zigzag ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0$  g/l,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



**Fig. III. 16:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour un arrangement en zigzag de 4 rangées x 5 gouttes d'eau déposées sur la surface superhydrophobe ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0$  g/l,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

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

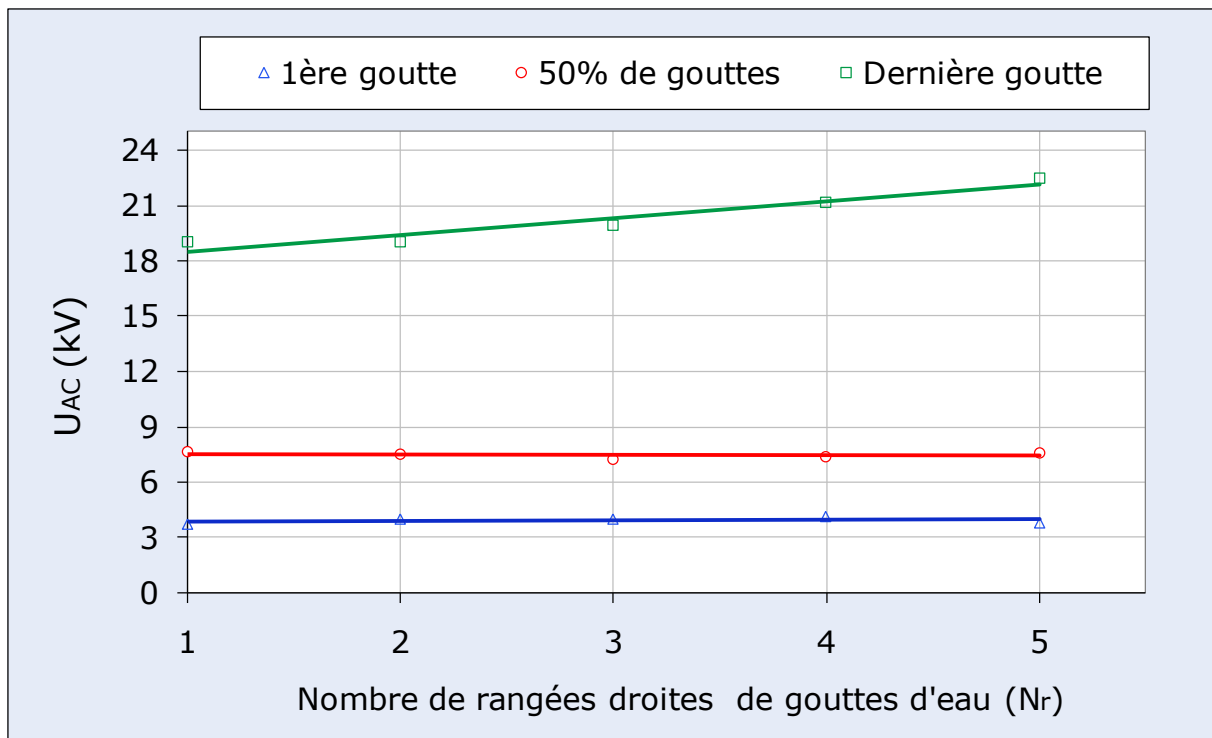
Les figures III. 17 et III. 18 donnent respectivement l'évolution des tension d'éviction de la première goutte, goutte médiane et la dernière goutte en fonction du nombre de rangées en parallèles le long de la ligne de fuite de l'isolation sous arrangements en lignes droites et zigzag.

Il en résulte que la tension d'éjection en dehors de l'isolation de la première goutte est indépendante du nombre de rangées apportées sur la surface de l'isolation et du mode de leur arrangement. Sa valeur est de l'ordre de 3.5 kV ce qui correspond à 9.1 % sous arrangement en lignes droites et 18.2 % en zigzag de la tension de contournement de l'isolation à l'état sec.

La tension d'expulsion de la goutte médiane est pratiquement constante quels que soient les paramètres suscités. La valeur de son évacuation est respectivement de l'ordre de 7.5 kV sous arrangement en lignes droites et 8.5 kV en zigzag ce qui est équivalent respectivement à 19.5 % et 22.1 % de la tension de contournement de l'isolation son gouttes. Par contre la tension d'évacuation de la dernière goutte à l'extérieur de l'isolation est légèrement croissante. La tension maximale de son expulsion est de l'ordre de 22 kV pour les deux arrangements ce qui est équivalent à 57.4 %.

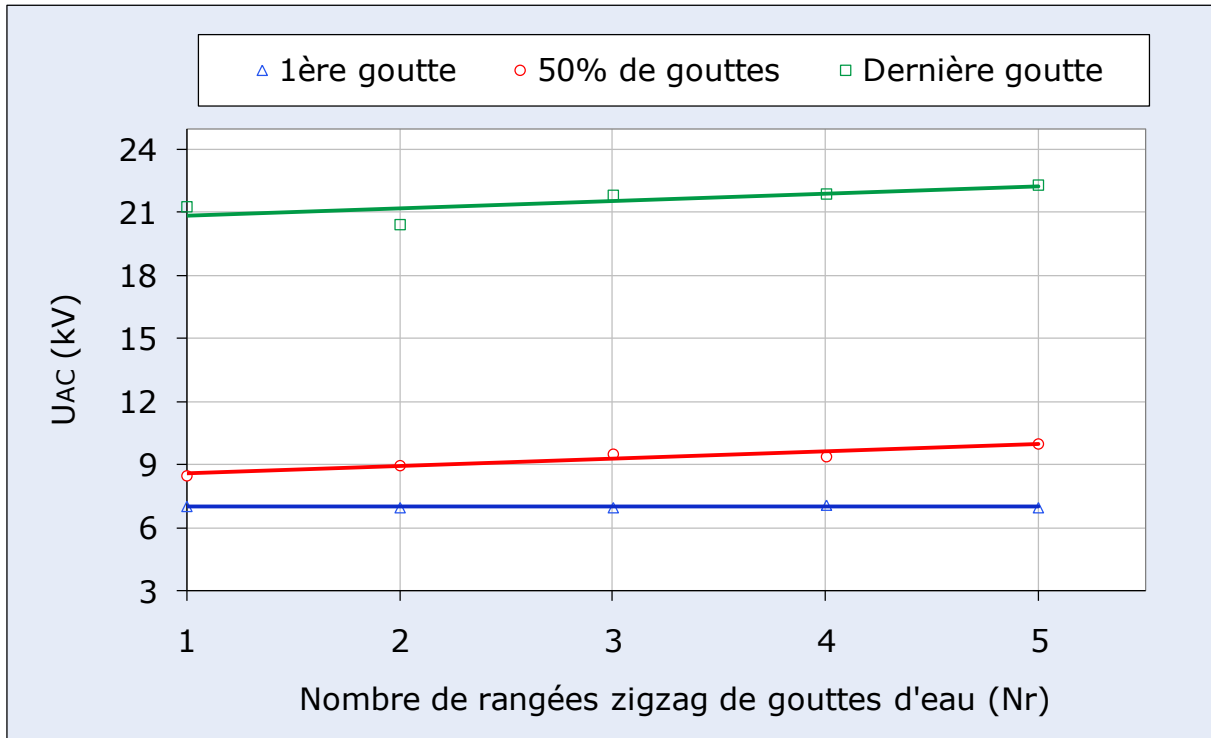
Il ressort des figures III. 19 et III. 20 que l'évacuation intéresse d'abord les gouttes extrêmes situées au voisinage des électrodes HT et terre ensuite vient le tour de celles qui se trouvent dans la zone intermédiaire.

Quel que soit le nombre de rangées et leur emplacement sur la surface de l'isolation, cette dernière reste superhydrophobe avec un angle de contact grand, sans aucune apparition de décharge électrique ni de contournement.

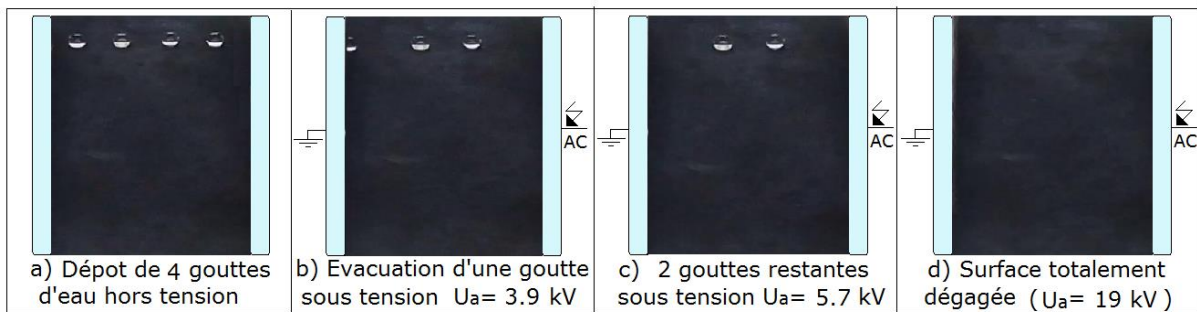


**Fig. III. 17:** Tension de refoulement des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction du nombre de rangées de celles-ci

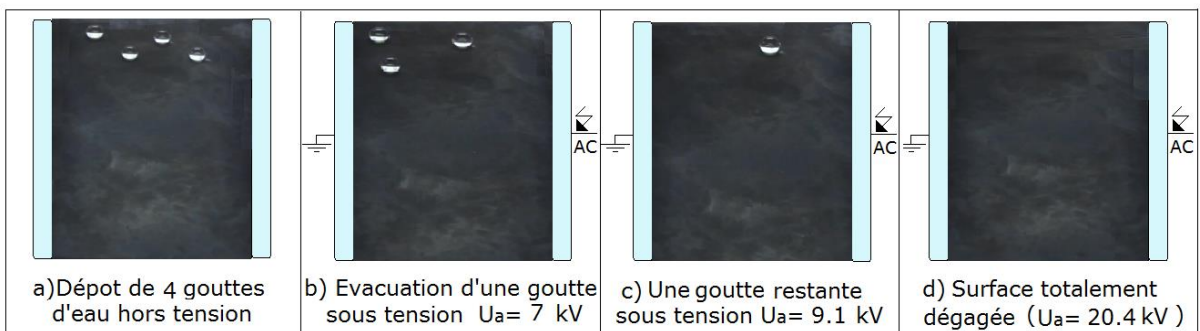




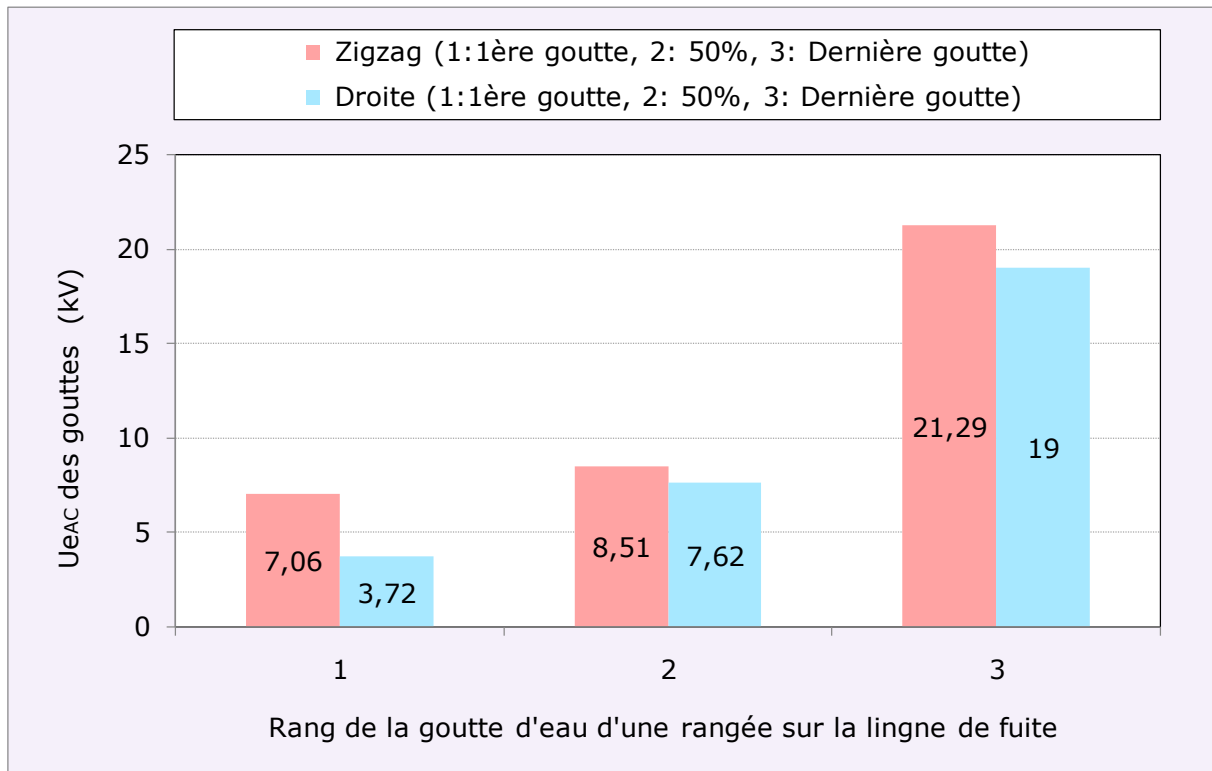
**Fig. III. 18:** Tension de refoulement des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction du nombre de rangées de celles-ci



**Fig. III. 19:** Etapes essentielles d'expulsion individuelle et bidirectionnelle de 4 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en lignes droites ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0$  g/l,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



**Fig. III. 20:** Etapes essentielles d'expulsion individuelle et bidirectionnelle de 4 gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe sous arrangement en zigzag ( $V_d = 30 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0$  g/l,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



**Fig. III. 21:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction du rang de la goutte d'eau sur la surface isolante

Il ressort de la figure III. 21 qu'une rangée de gouttes d'eau sous arrangement en ligne droite demande une faible tension d'expulsion qu'en zigzag.

### III. 3. 3 Volume des gouttes d'eau, leur arrangement et la position de la rangée

Les figures III. 22, III. 23, III. 24, III. 25, III. 32, III. 33, III. 34 et III. 35 montrent un déclin de la tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction de leur volume jusqu'à une valeur limite égale à 40  $\mu\text{l}$ . Au-delà de cette limite, celle-ci reste constante quel que soit le volume varié ou l'arrangement. Il résulte de ces figures que la tension d'éjection de la dernière goutte est plus grande lorsque celle-ci se trouve au milieu de l'isolation que du côté terre ou HT. La tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation avec couverture est plus faible que celle sans couvert quel que soit l'arrangement considéré.

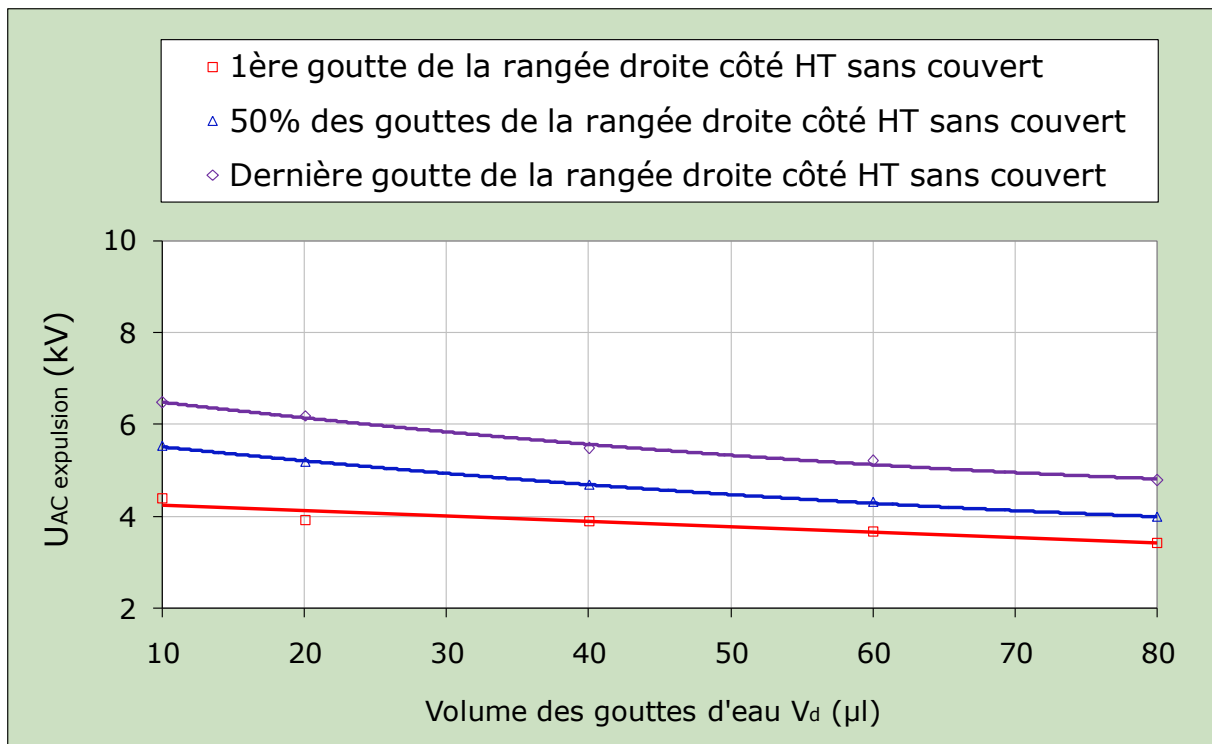
Il découle de la figure III. 26 que la tension d'éjection des gouttes d'eau à volume constant est plus élevée pour une rangée du côté terre que du côté HT et la figure III. 27 montre que la tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus petite avec couvert que sans celui-ci. Les gouttes avec un petit volume nécessitent une tension d'expulsion plus grande que lorsque leur volume est plus élevé (Fig. III. 36). Ceci peut être expliqué par le fait que les gouttes de petit

volume s'encastrent entre les aspérités de la surface superhydrophobe par contre, les gouttes de grand volume restent au sommet des aspérités ce qui facilite leur éjection.

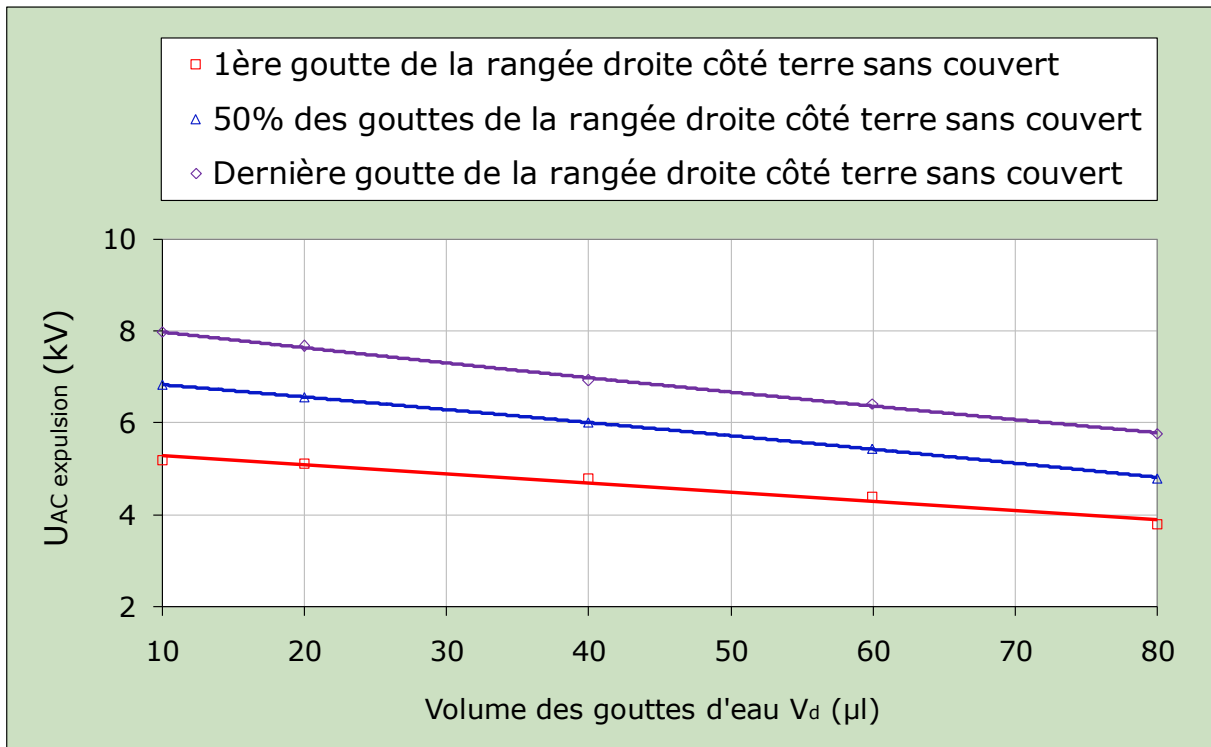
Les différentes phases d'évacuation des gouttes d'eau à volume égal à 80  $\mu\text{l}$  d'une rangée à position interélectrode variable sont illustrées par les figures III. 28, III. 29, III. 30 et III. 31 sous arrangement en lignes droites et figures III. 37, III. 38, III. 39 et III. 40 sous arrangement zigzag.

Il est à remarquer que généralement l'éjection concerne d'abord les gouttes extrêmes de la rangée droite (Figs. III. 28b, III. 29b, III. 30b et III. 31b) et zigzag (Figs. III. 37b, III. 38b, III. 39b et III. 40b), ensuite vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de l'isolation indépendamment du degré de couverture de l'isolation dans le cas d'un arrangement en lignes droites (Figs. III. 28c, III. 29c III. 30c et III. 31c) et zigzag (Figs. III. 37c, III. 38c III. 39c et III. 40c).

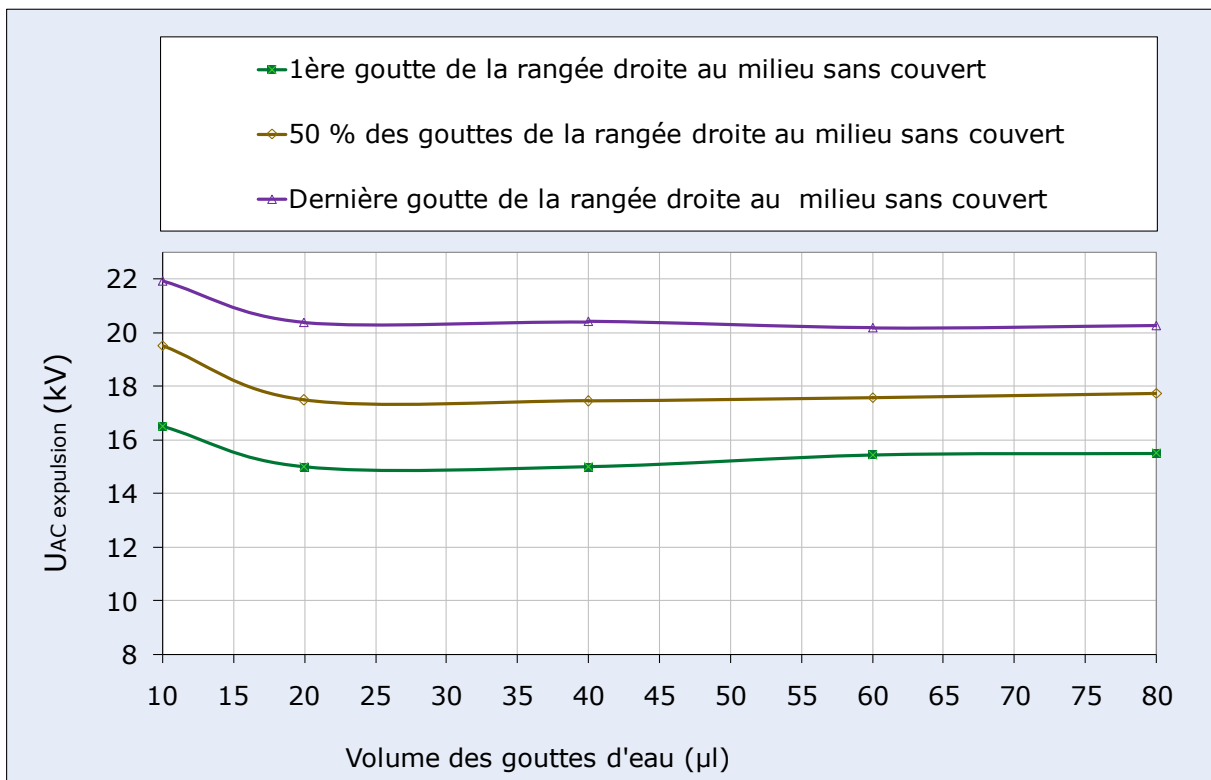
Malgré la variation du volume, toutes les gouttes quittent la surface sans causer aucun dommage (dégradation de la surface) et aucune décharge électrique partielle et/ou de contournement n'a été remarquée. Par conséquent l'angle de contact de l'isolation, mesuré en chaque fin d'une série d'essais, reste toujours élevé et la superhydrophobicité du matériau utilisé dans cette étude est conservée.



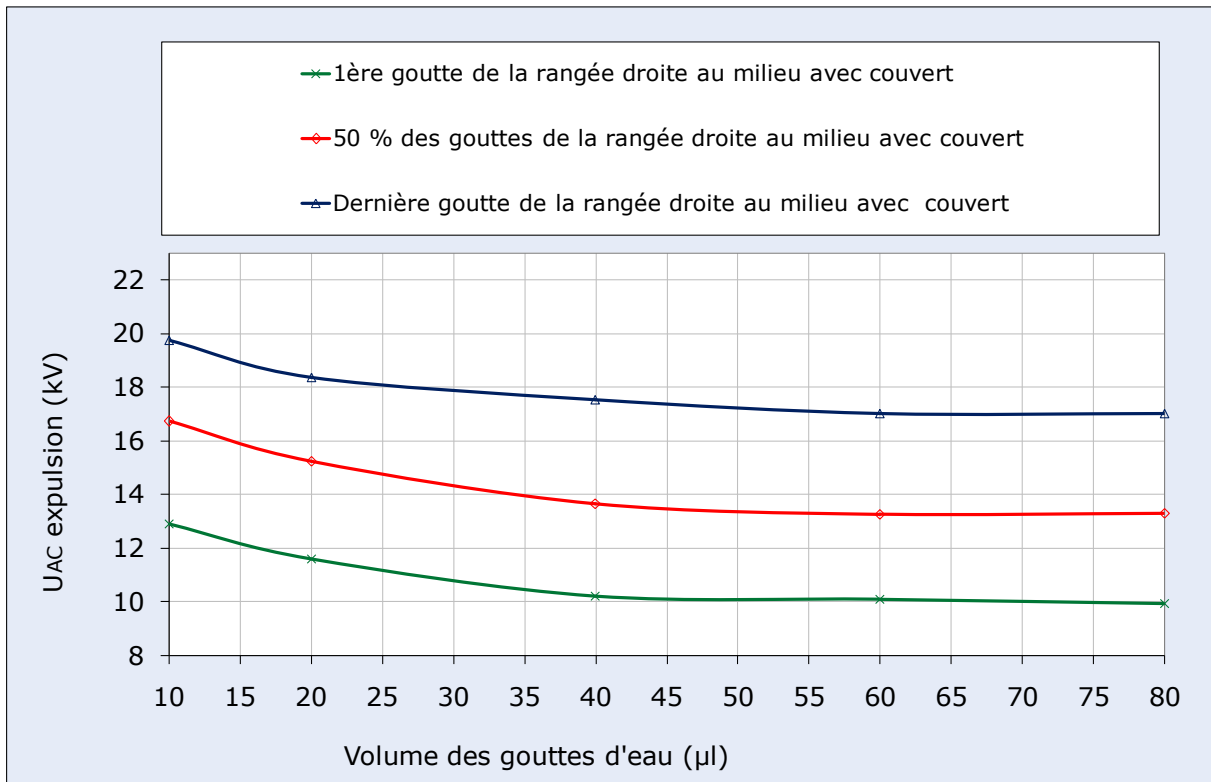
**Fig. III. 22:** Tension de libération de la surface isolante des gouttes d'eau en fonction du volume de celles-ci



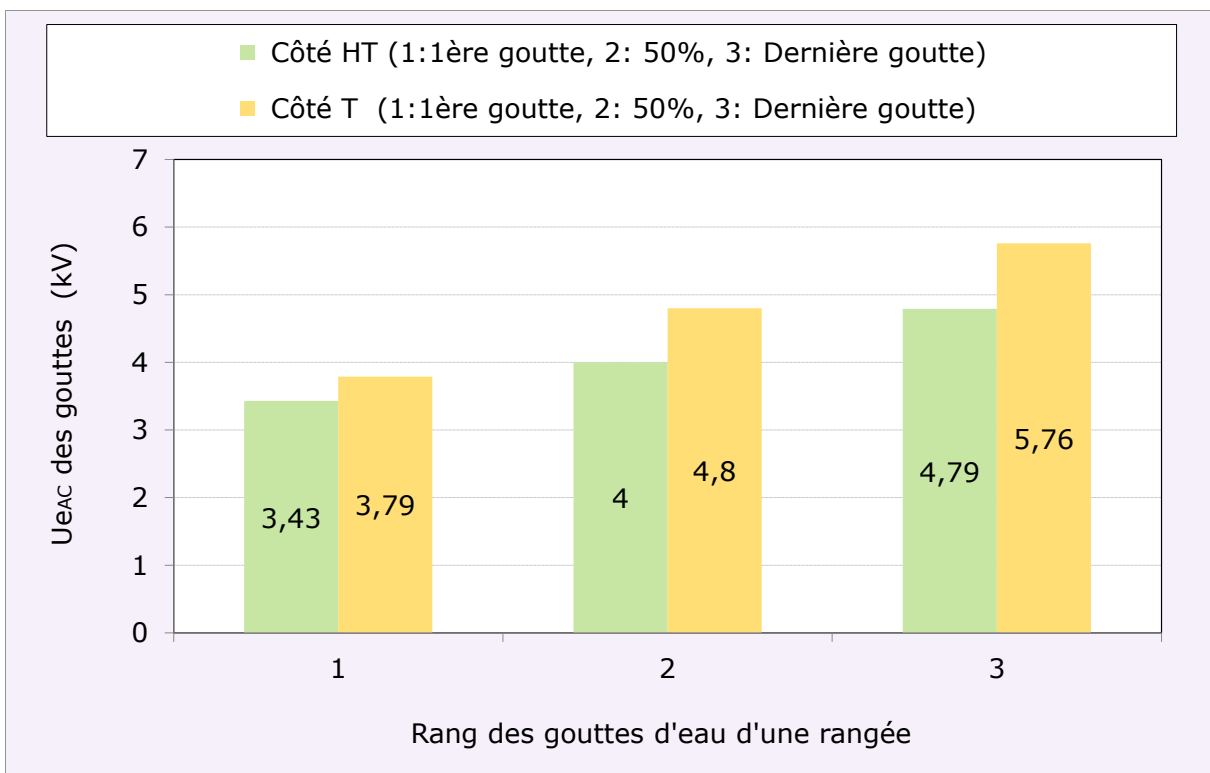
**Fig. III. 23:** Tension d'évacuation des gouttes d'eau sur l'isolation en fonction du volume de celles-ci



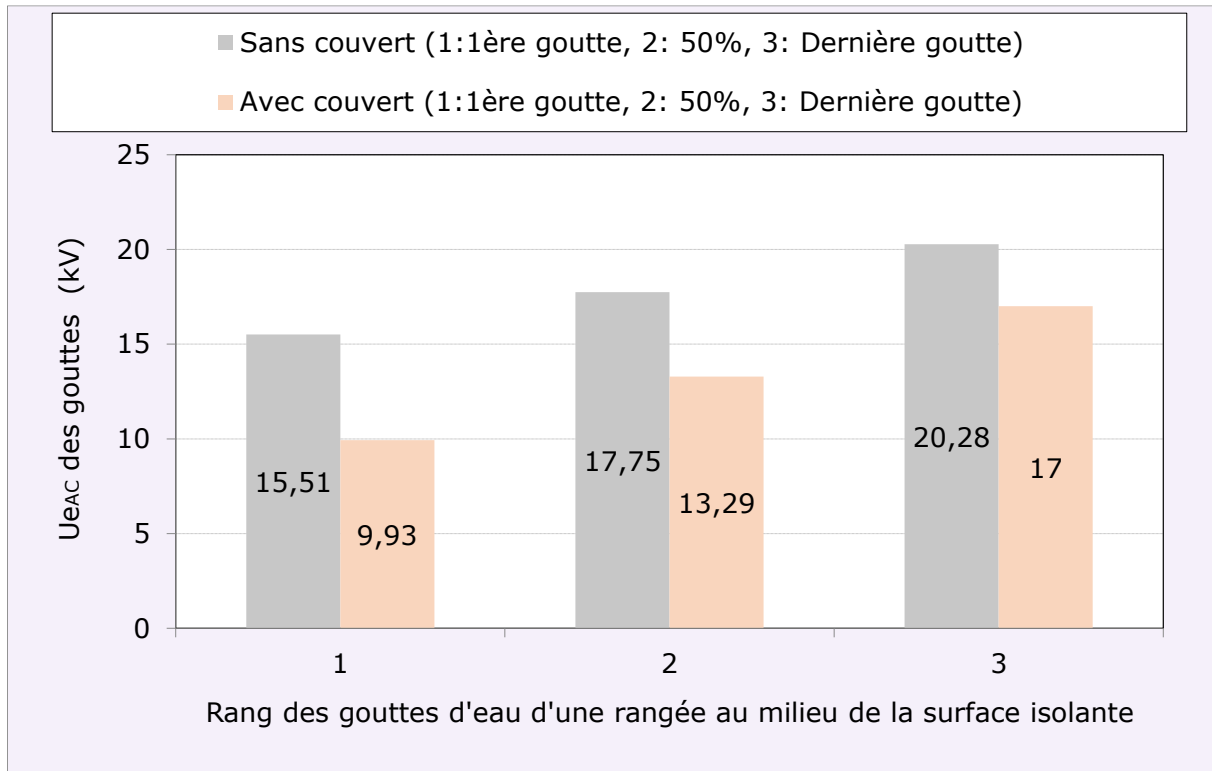
**Fig. III. 24:** Tension d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation en fonction du volume de celles-ci



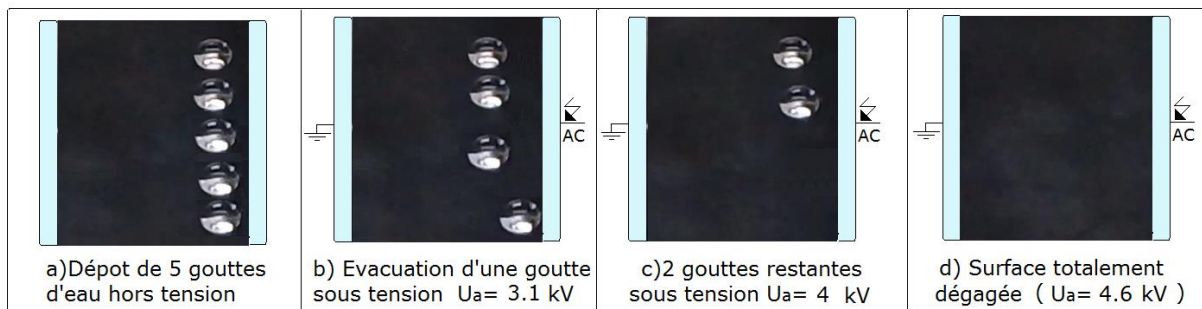
**Fig. III. 25:** Tension d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation en fonction du volume de celles-ci



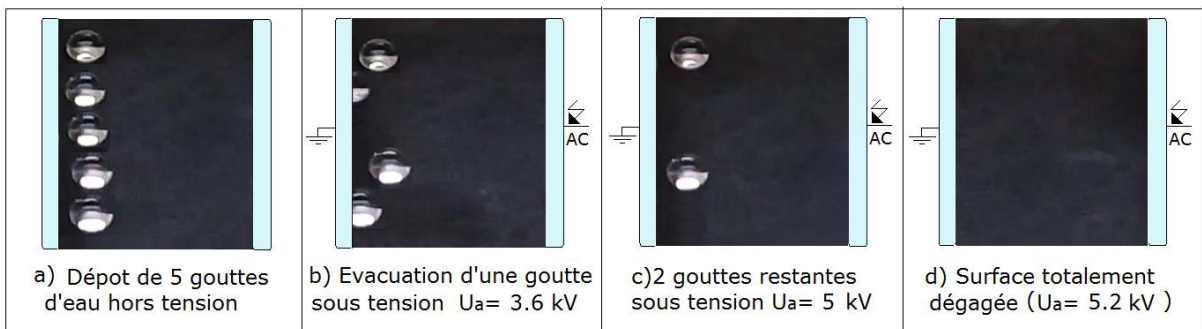
**Fig. III. 26:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $V_d = 80 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



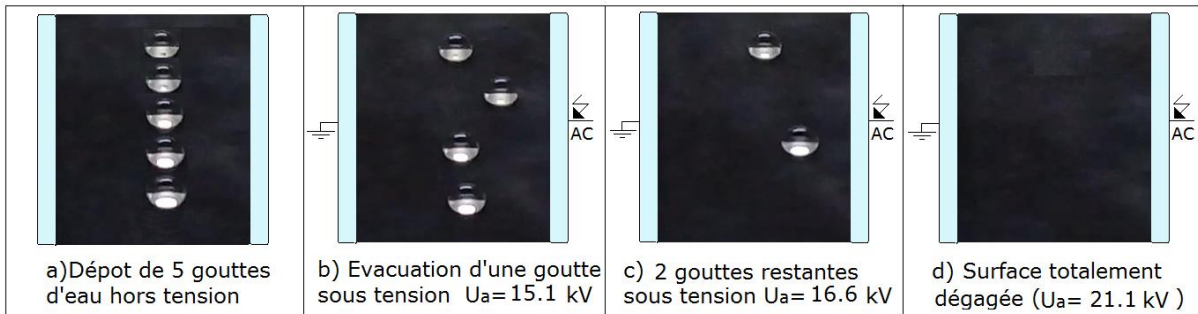
**Fig. III. 27:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $V_d = 80 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



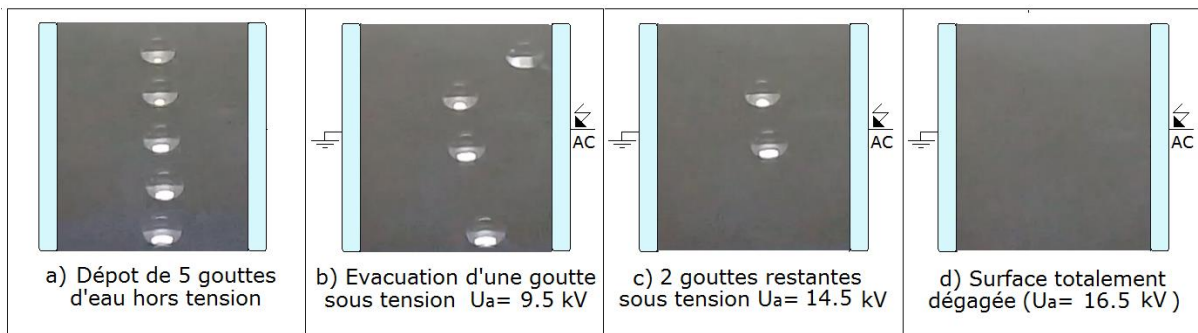
**Fig. III. 28:** Principales phases d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume  $80 \mu\text{l}$  déposée du côté HT de l'isolation sans couvert



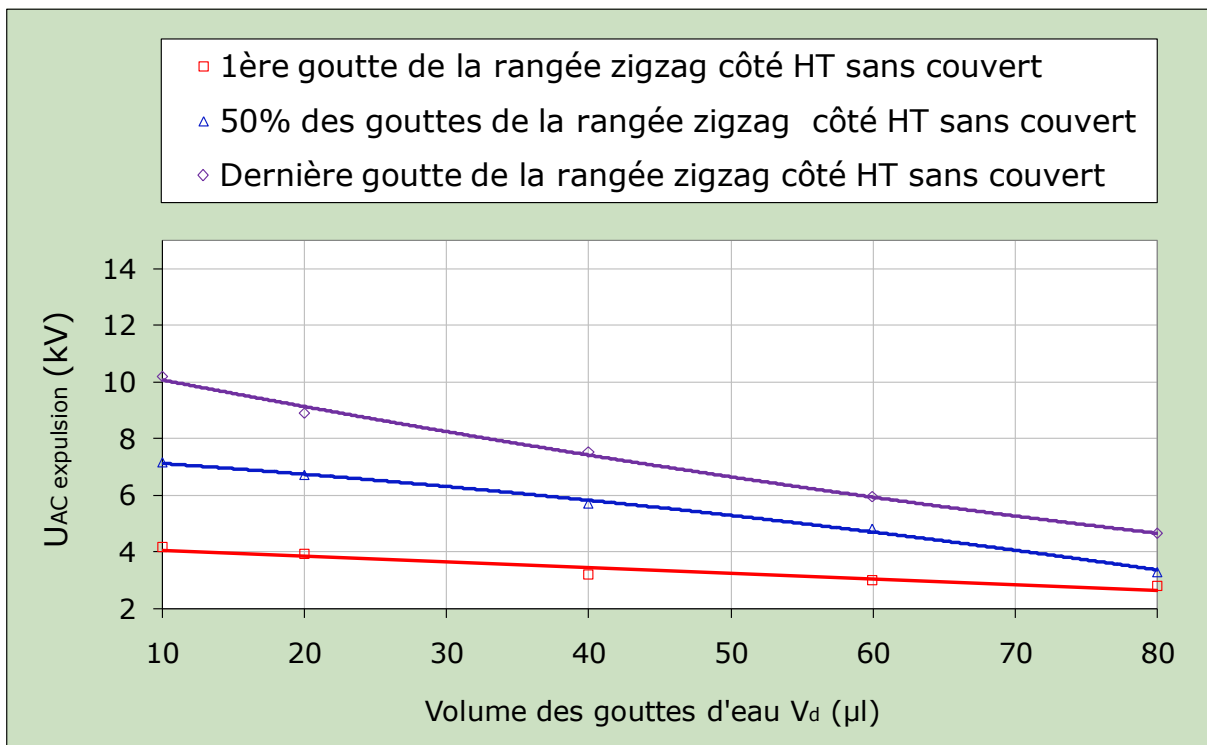
**Fig. III. 29:** Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume  $80 \mu\text{l}$  déposée du côté terre de l'isolation sans couvert



**Fig. III. 30:** Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume 80  $\mu\text{l}$  déposée au milieu de la surface isolante sans couvert

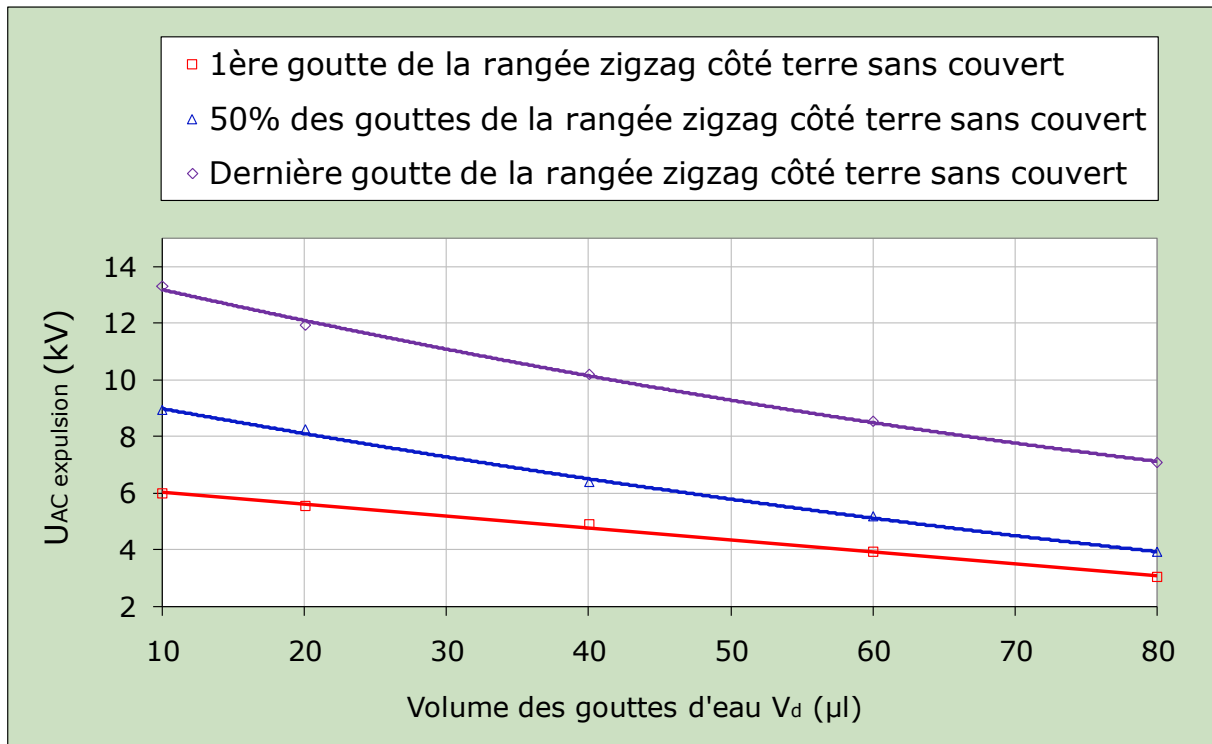


**Fig. III. 31:** Principale phases d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau en ligne droite de volume 80  $\mu\text{l}$  déposée au milieu de la surface isolante avec couvert

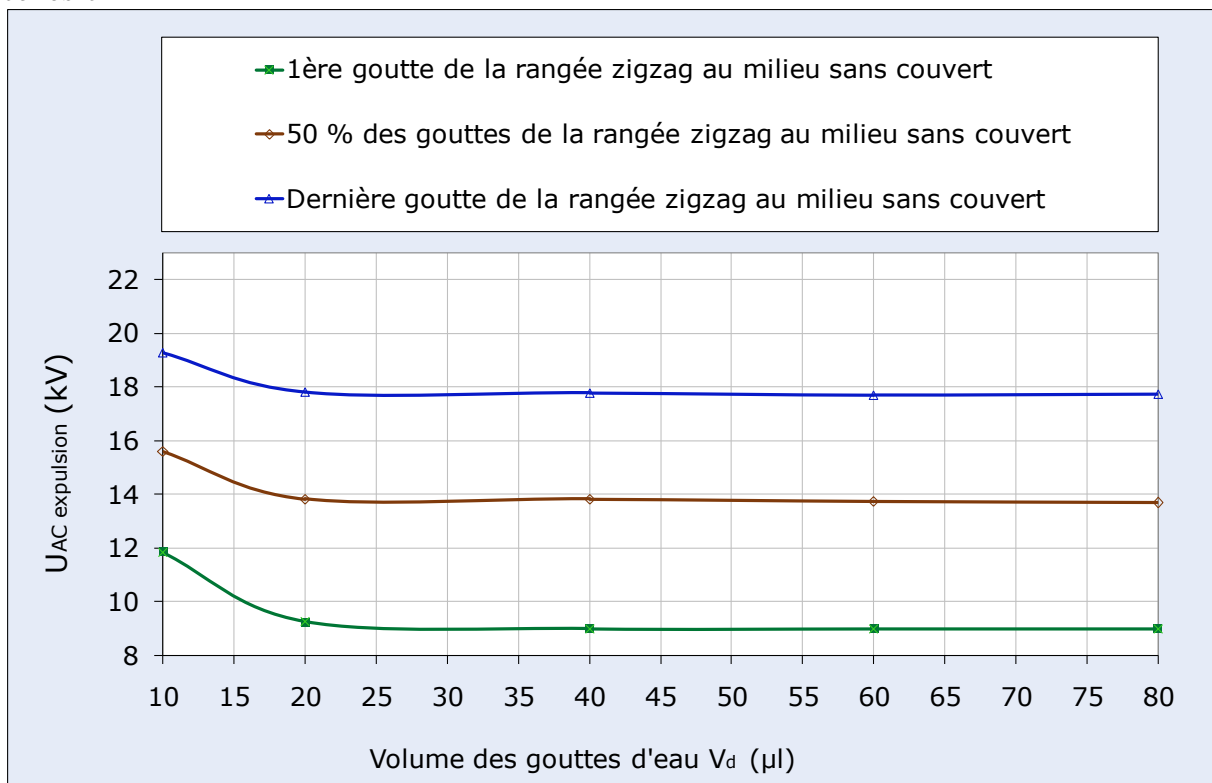


**Fig. III. 32:** Tension de libération de la surface isolante des gouttes d'eau en fonction de leur volume

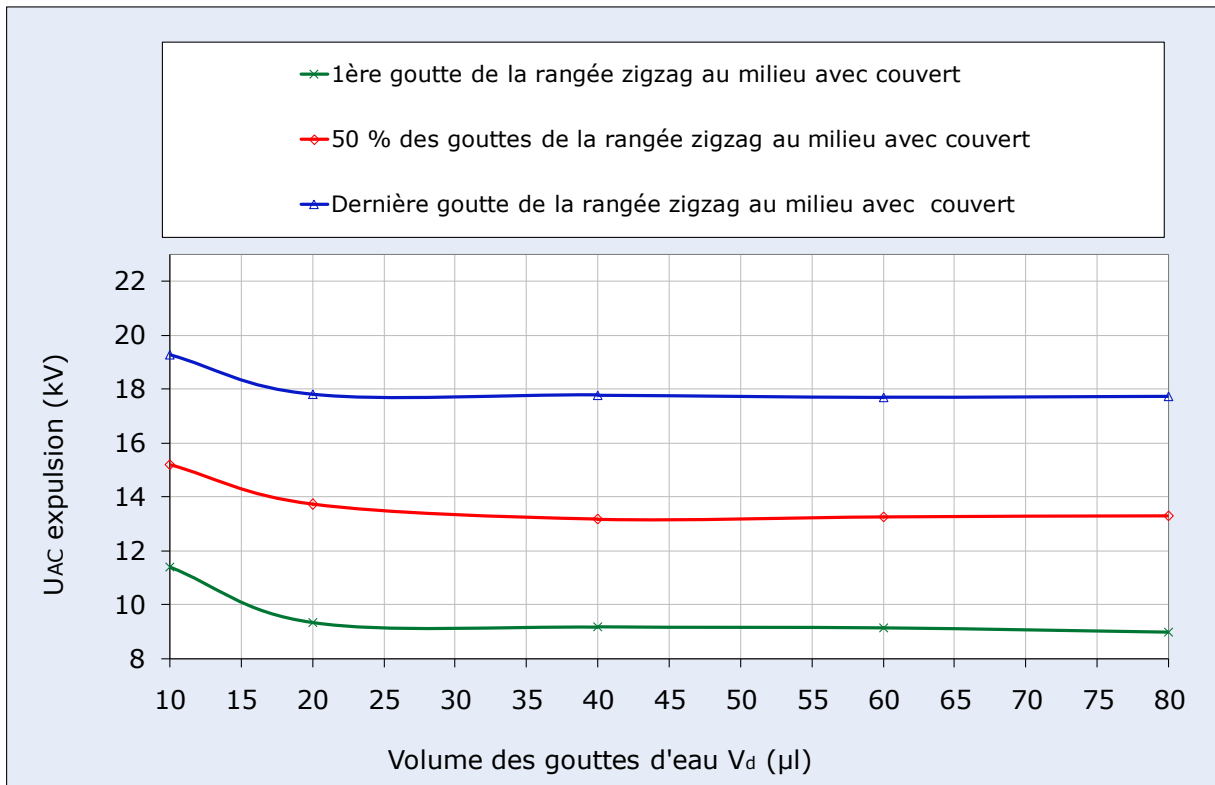




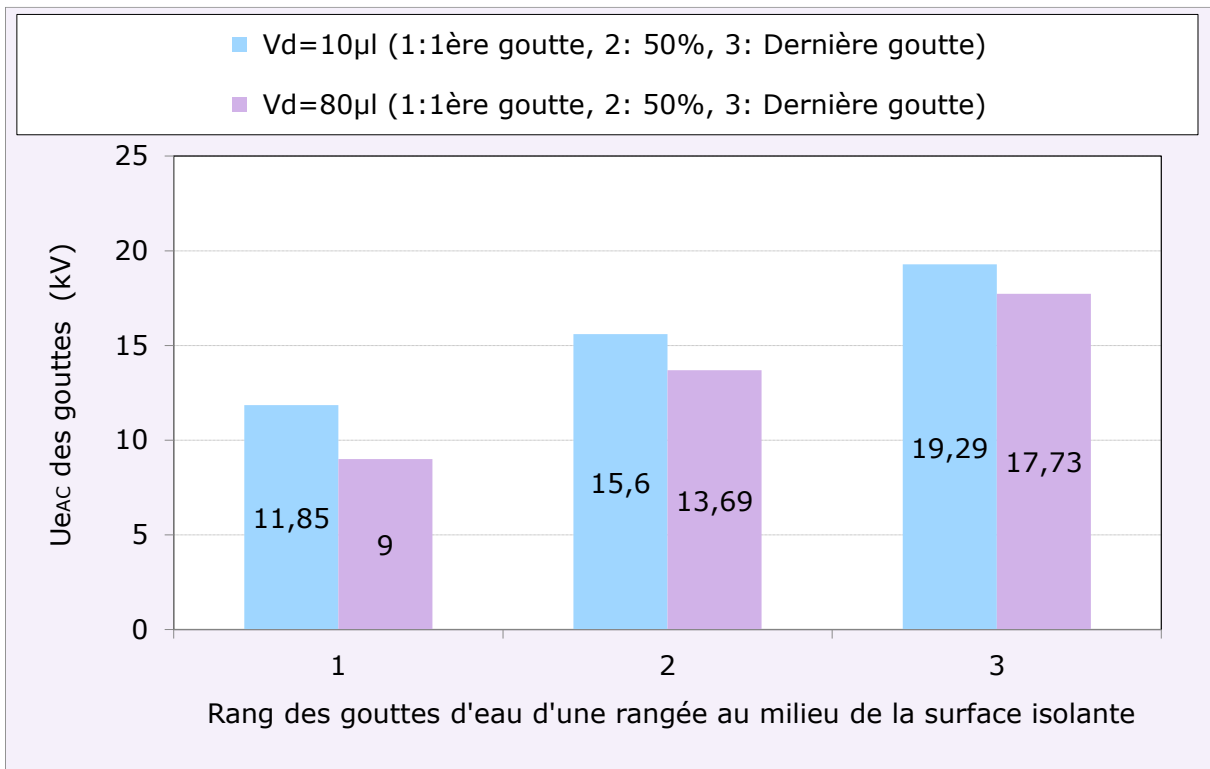
**Fig. III. 33:** Tension de sortie des gouttes d'eau de l'isolation en fonction du volume de celles-ci



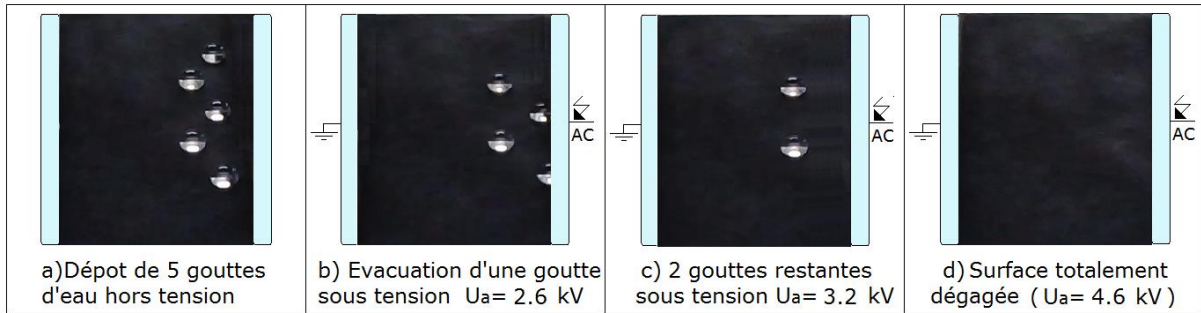
**Fig. III. 34:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation en fonction du volume de celles-ci



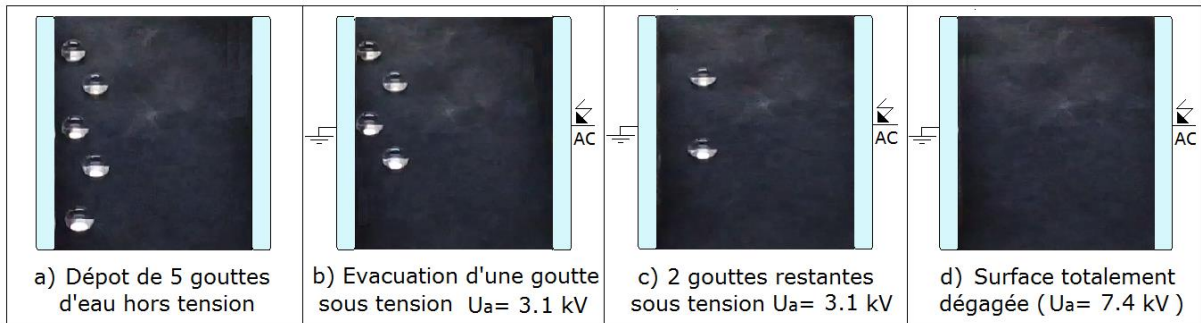
**Fig. III. 35:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction de leur volume



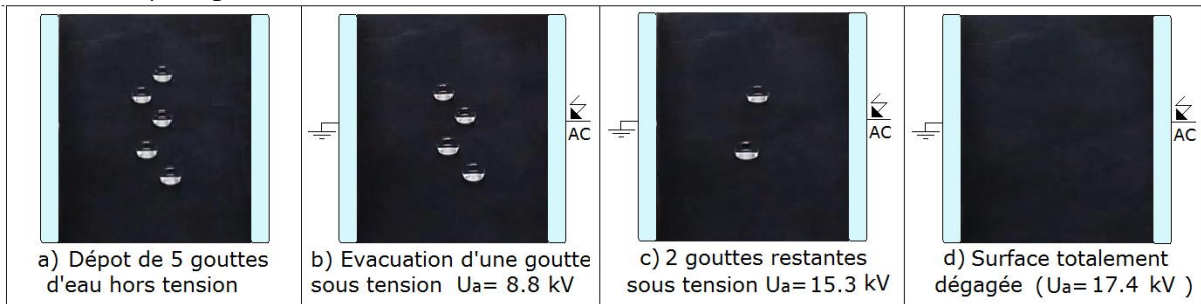
**Fig. III. 36:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation



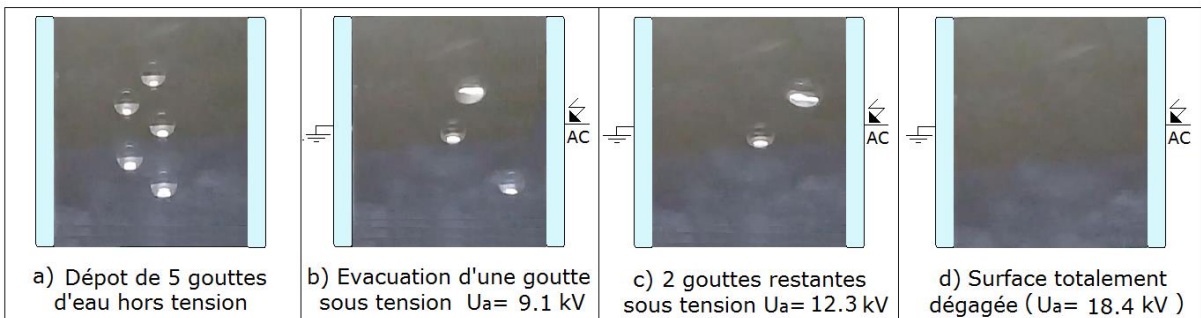
**Fig. III. 37:** Principales phases d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80  $\mu$ l déposée du côté HT de l'isolation sans couvert



**Fig. III. 38:** Phases essentielles d'ejection des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80  $\mu$ l déposée du côté terre de l'isolation sans couvert



**Fig. III. 39:** Phases essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80  $\mu$ l déposée au milieu de la surface sans couvert



**Fig. III. 40:** Phases essentielles d'evacuation des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de volume 80  $\mu$ l déposée au milieu de la surface avec couvert

### III. 3. 4 Conductivité électrique des gouttes d'eau

Les figures III. 41, III. 42, III. 43 et III. 44 donnent l'allure des tensions d'éjection de la première goutte, la médiane et la dernière en fonction de sa conductivité électrique sous

arrangement en ligne droite et figures III. 49, III. 50, III. 51 et III. 52 en zigzag, en variant sa position sur la surface de l'isolation et le degré de couverture de cette dernière (HT, terre, milieu sans ou avec couvert).

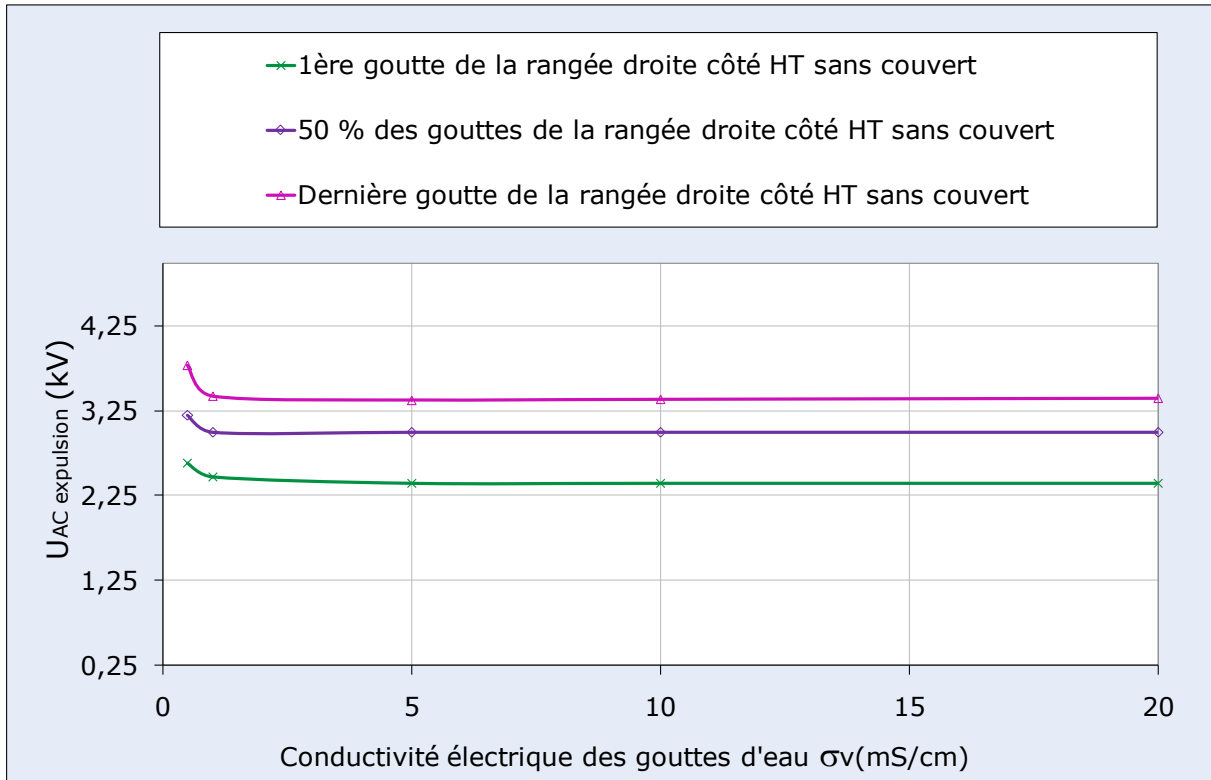
Il en résulte un déclin de la tension d'expulsion jusqu'à une valeur limite de la conductivité électrique, de l'ordre de 1 mS/cm, au-delà de laquelle celle-ci reste pratiquement constante. Cette évolution est indépendante de l'emplacement de la rangée de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation ainsi que le degré de couverture de cette dernière. Quand la conductivité électrique des gouttes d'eau est faible, les lignes du champ sont éloignées de ces dernières, ce qui nécessite une tension d'éviction plus élevée pour libérer l'isolation. Ceci explique pourquoi la tension d'évacuation des gouttes d'eau est petite avec couvert que sans celui-ci.

Ces mêmes figures montrent que la tension d'éviction des gouttes d'eau de la rangée avoisinant l'électrode terre est comprise entre celle des gouttes de la rangée, située au milieu de l'isolation et celle se trouvant auprès de l'électrode sous tension.

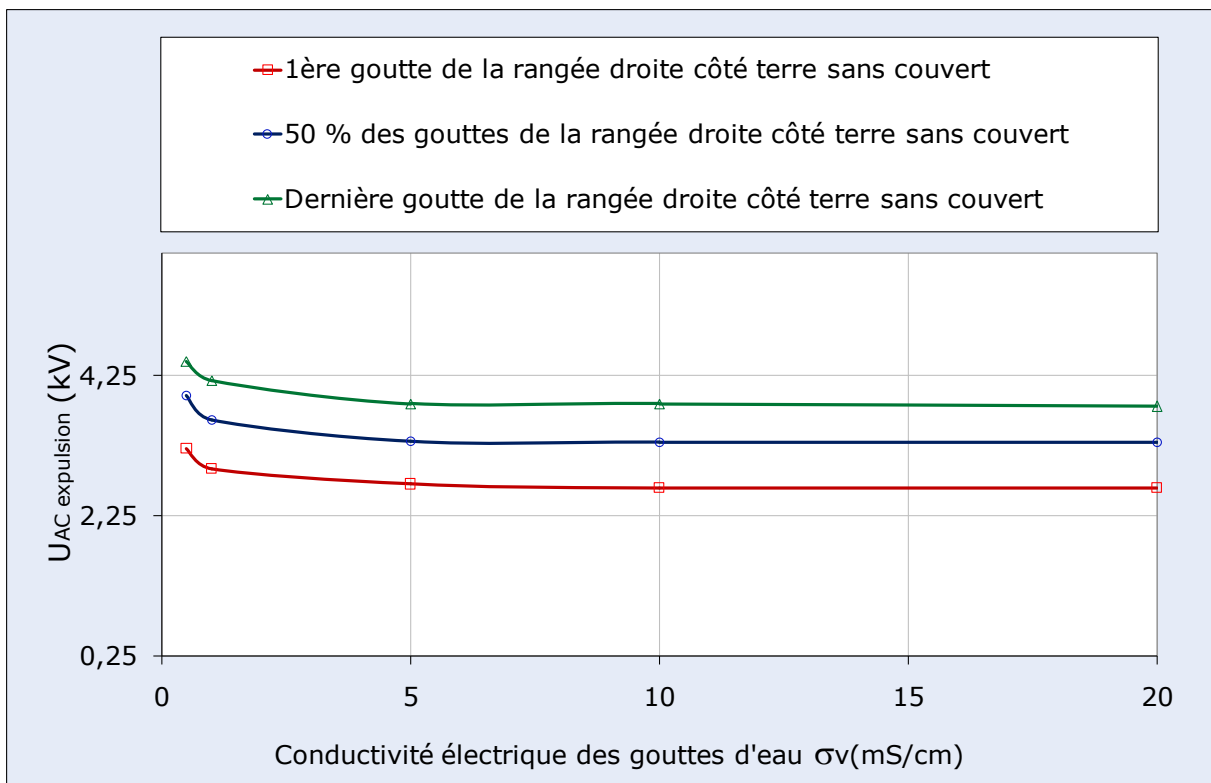
Les figures III. 45, III. 46, III. 47, III. 48, III. 53, III. 54, III. 55 et III. 56 illustrent les phases essentielles d'éjection en dehors de l'isolation de 5 gouttes d'eau respectivement sous deux arrangements : en ligne droite et en zigzag. Il en ressort que l'éviction des gouttes intéresse en premier lieu celles situées aux extrémités de la rangée, puis vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de la rangée, indépendamment de leur arrangement, la position de la rangée sur la surface de l'isolation et le degré de couverture de celle-ci.

La variation de la conductivité n'entraîne aucune décharge électrique partielle et/ou contournement de l'isolation durant l'application de la tension sur l'isolation pour chaque essai, ce qui implique que l'isolation garde sa superhydrophobie, ceci est confirmé par la non diminution de son angle de contact mesuré en chaque fin d'une série d'essais.

Les figures III. 57 III. 58 donnent les histogrammes de comparaison de la tension d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation, pour une conductivité électrique  $\sigma_v = 20$  mS/cm avec un degré de couverture (Fig. III. 57) et leur arrangement (Fig. III. 58). Il en découle que la tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus petite en présence d'un couvert et l'arrangement en zigzag quel que soit la position de la rangée sur la surface de l'isolation.



**Fig. III. 41:**  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation



**Fig. III. 42:**  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différents rangs des gouttes d'eau éjectées de l'isolation

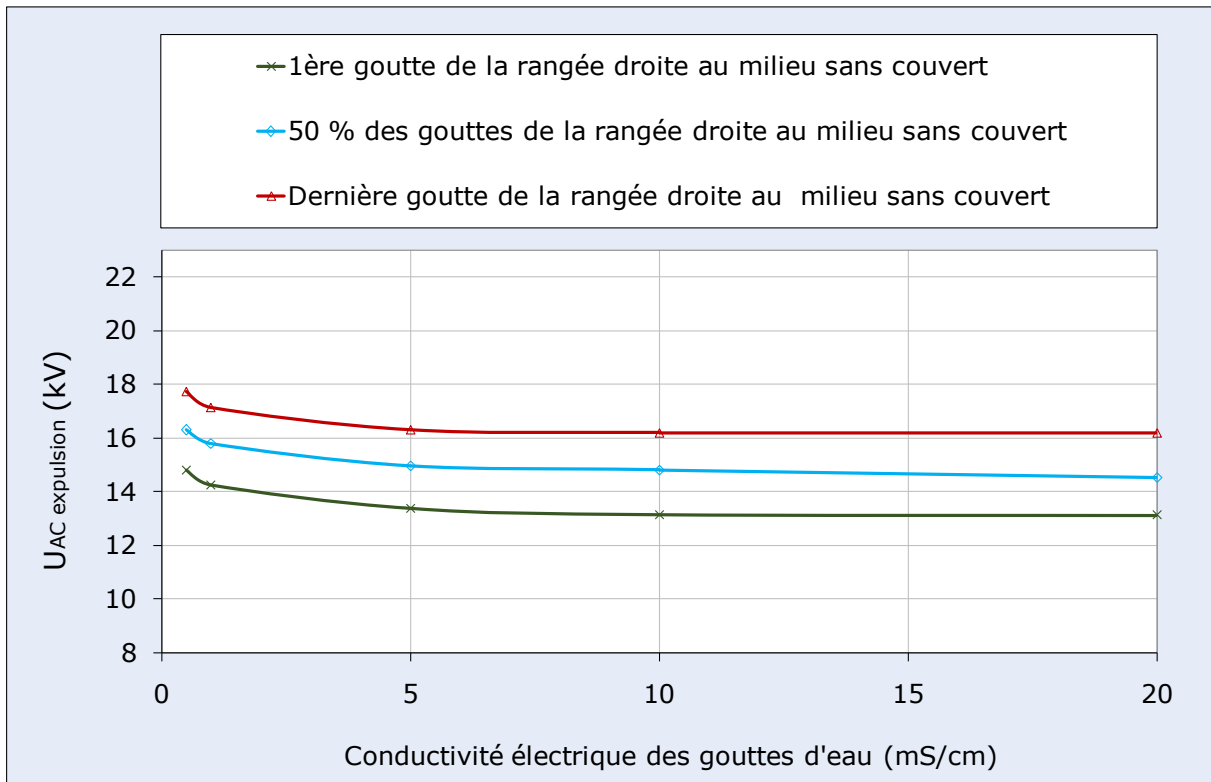


Fig. III. 43:  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation

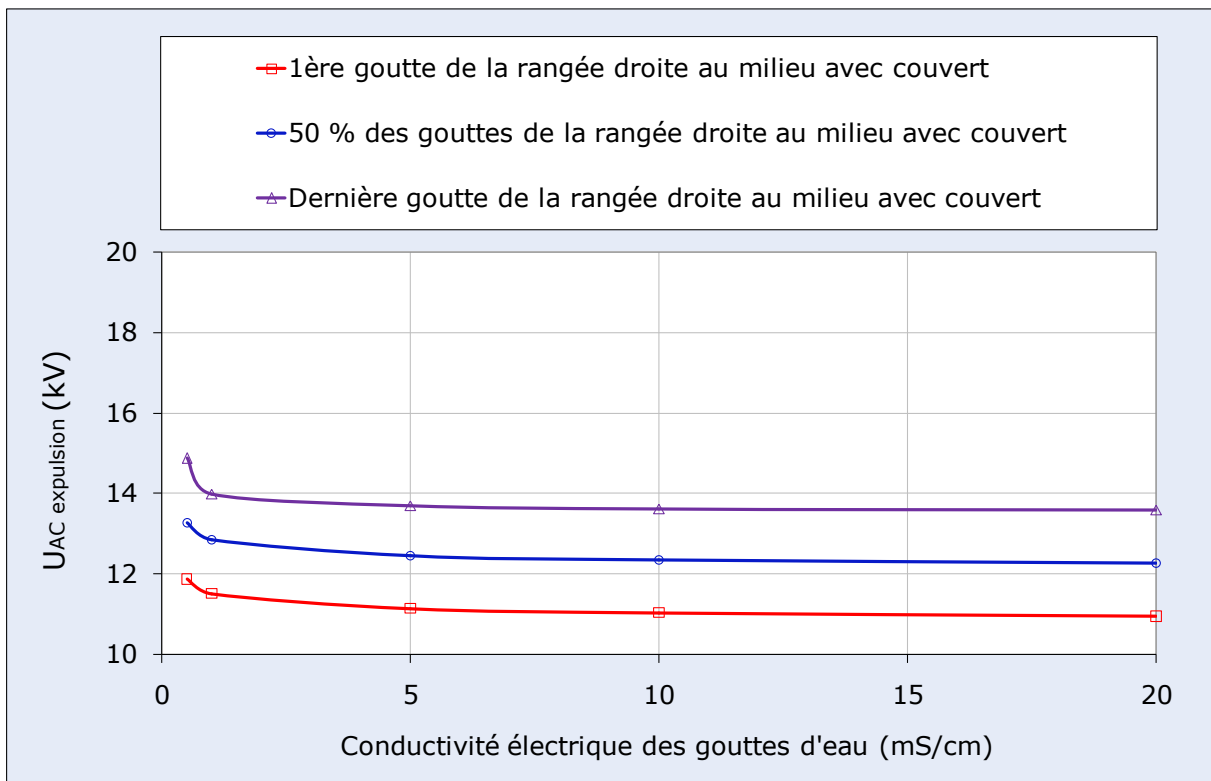
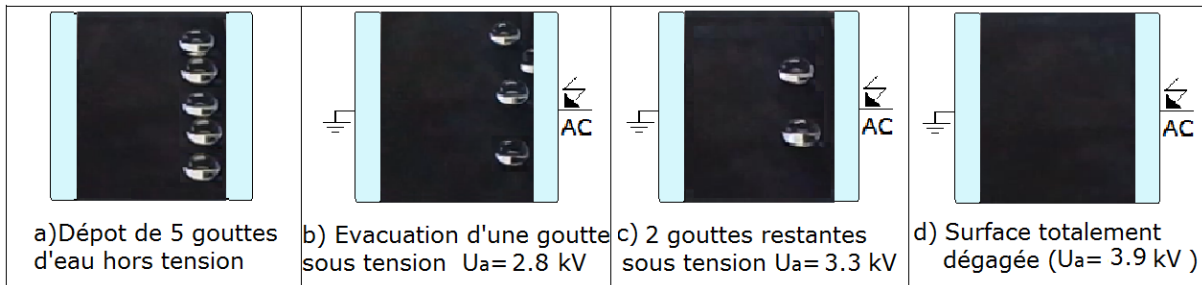
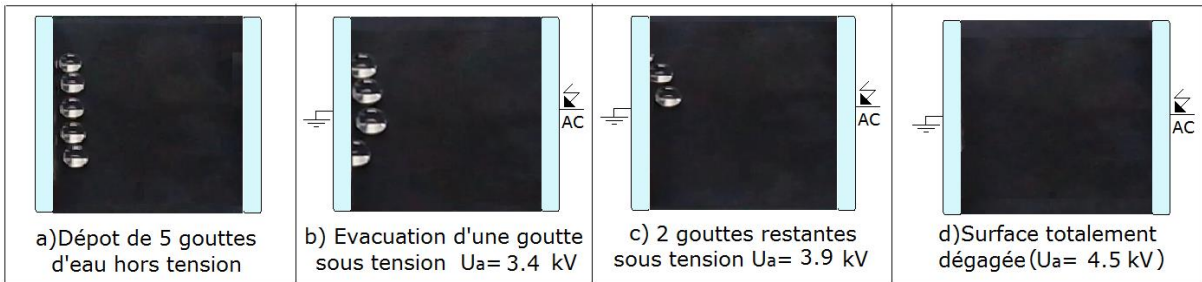


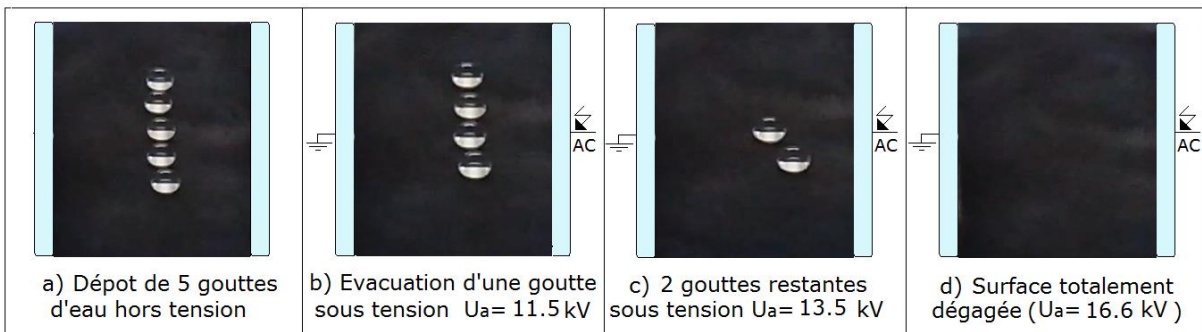
Fig. III. 44:  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différent rangs des gouttes d'eau évacuées de l'isolation



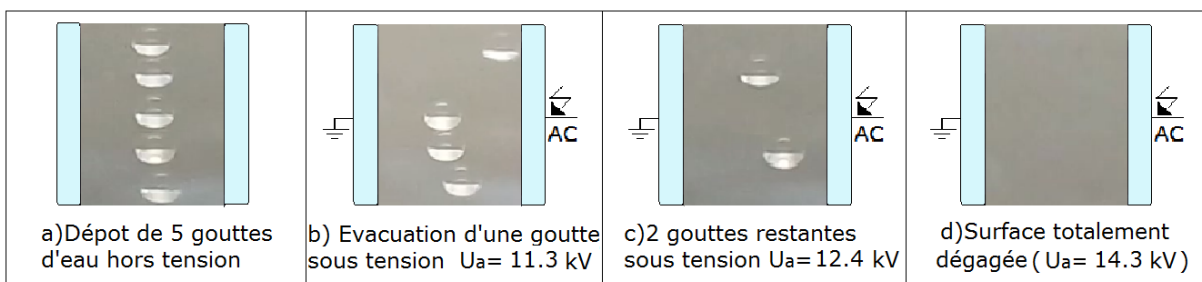
**Fig. III. 45:** Phases principales d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt du côté HT ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. III. 46:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt du côté terre ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. III. 47:** Phases principales d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de celle-ci ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. III. 48:** Etapes essentielles d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée en ligne droite de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de celle-ci avec couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



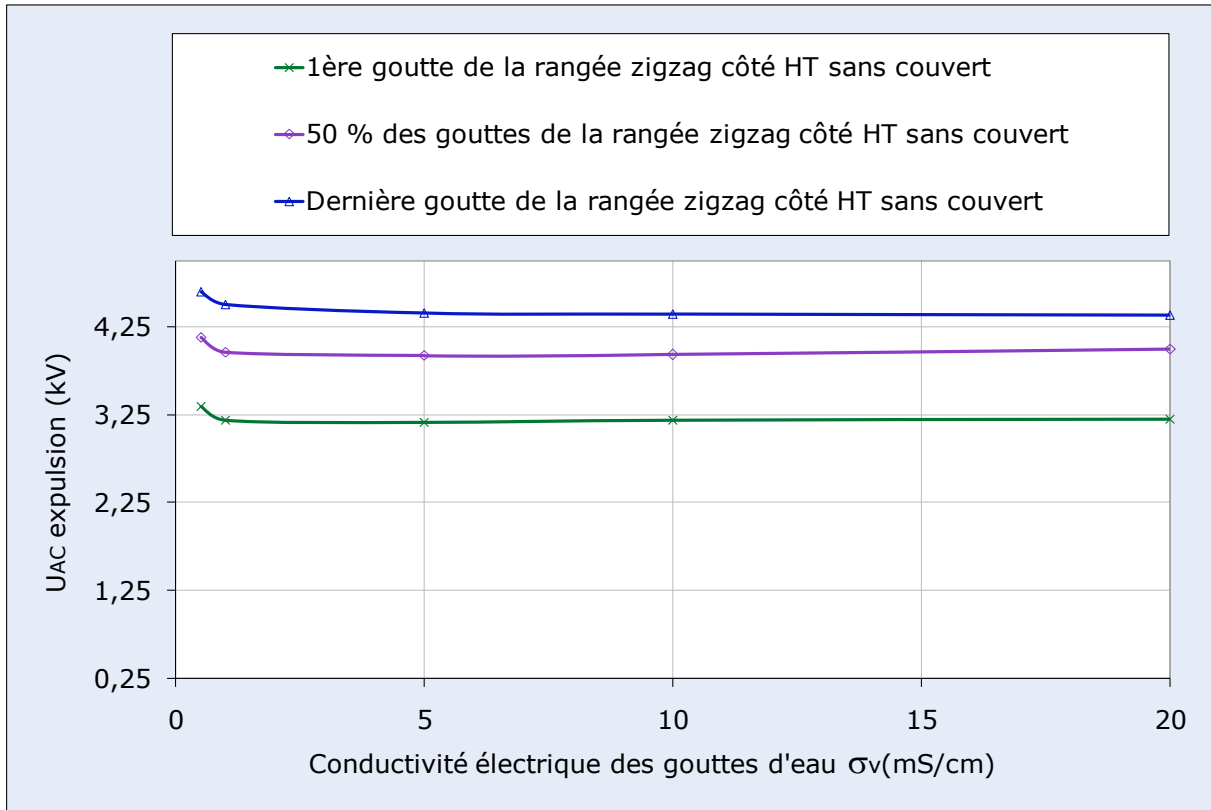


Fig. III. 49:  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation

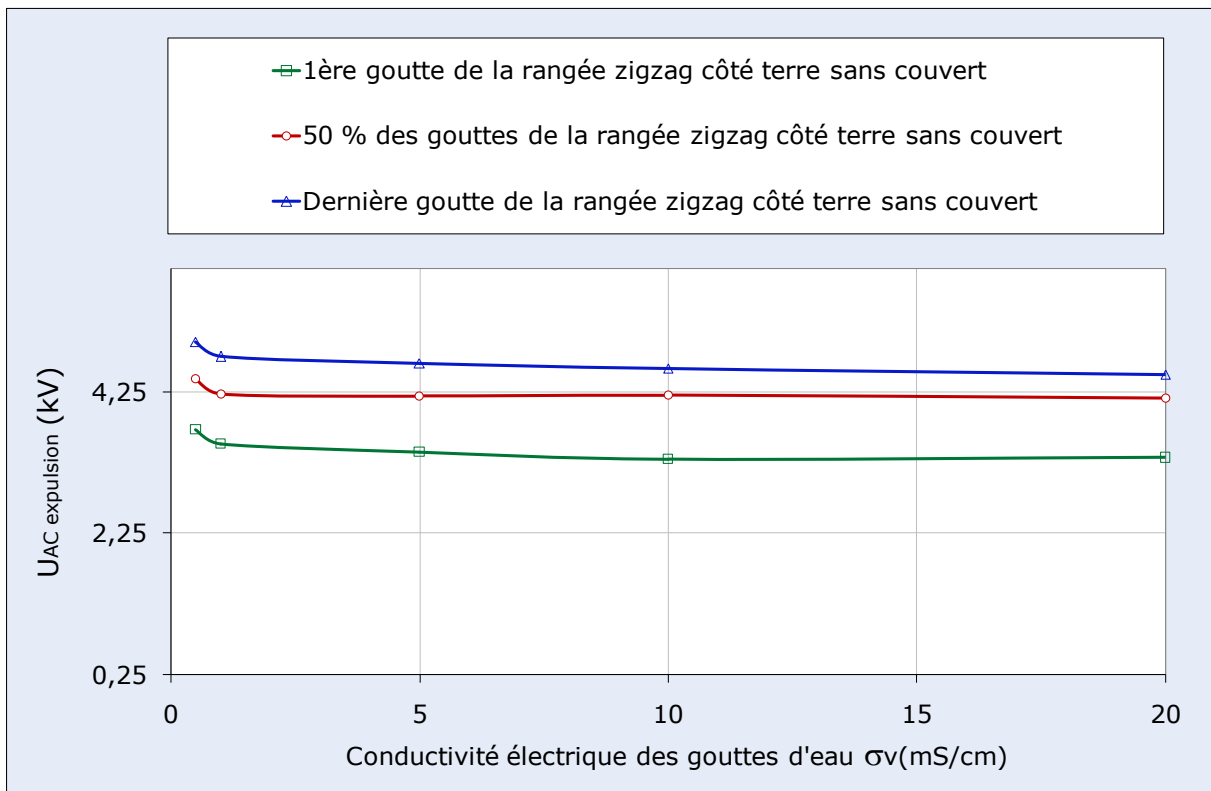


Fig. III. 50:  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différents rangs des gouttes d'eau éjectées de l'isolation

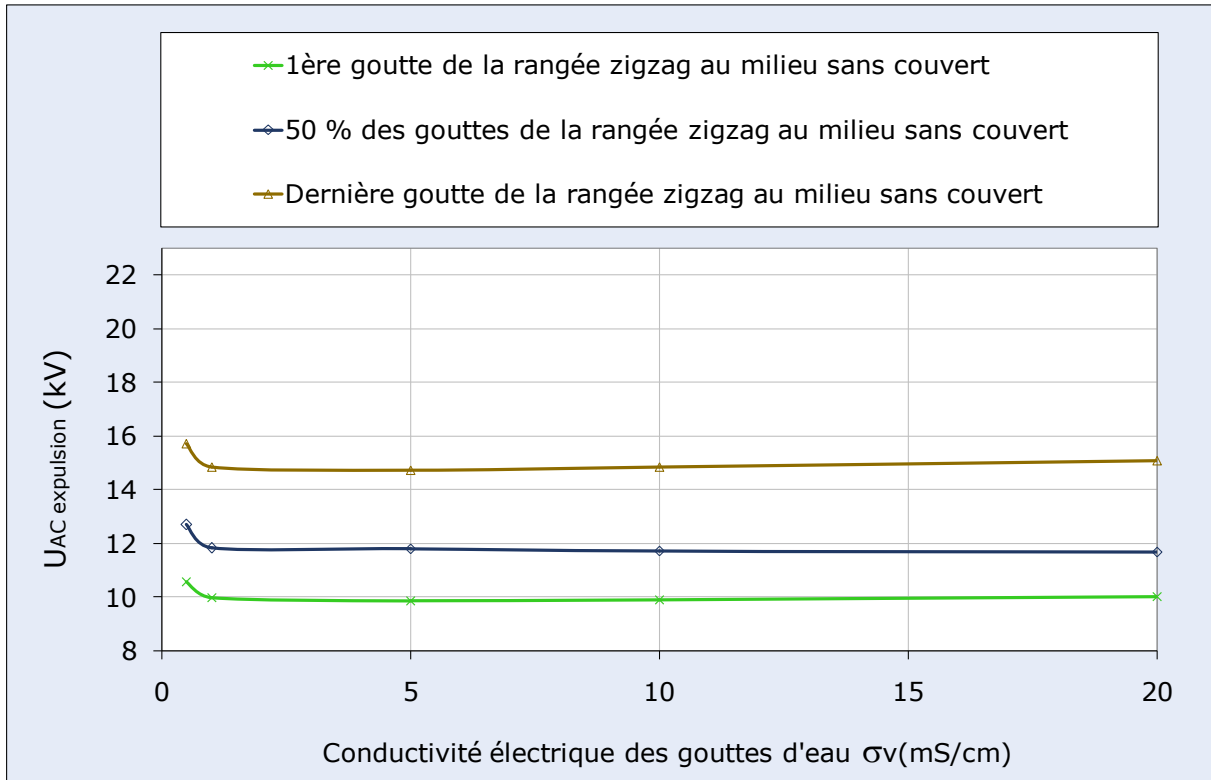


Fig. III. 51:  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différents rangs des gouttes d'eau éjectées de l'isolation

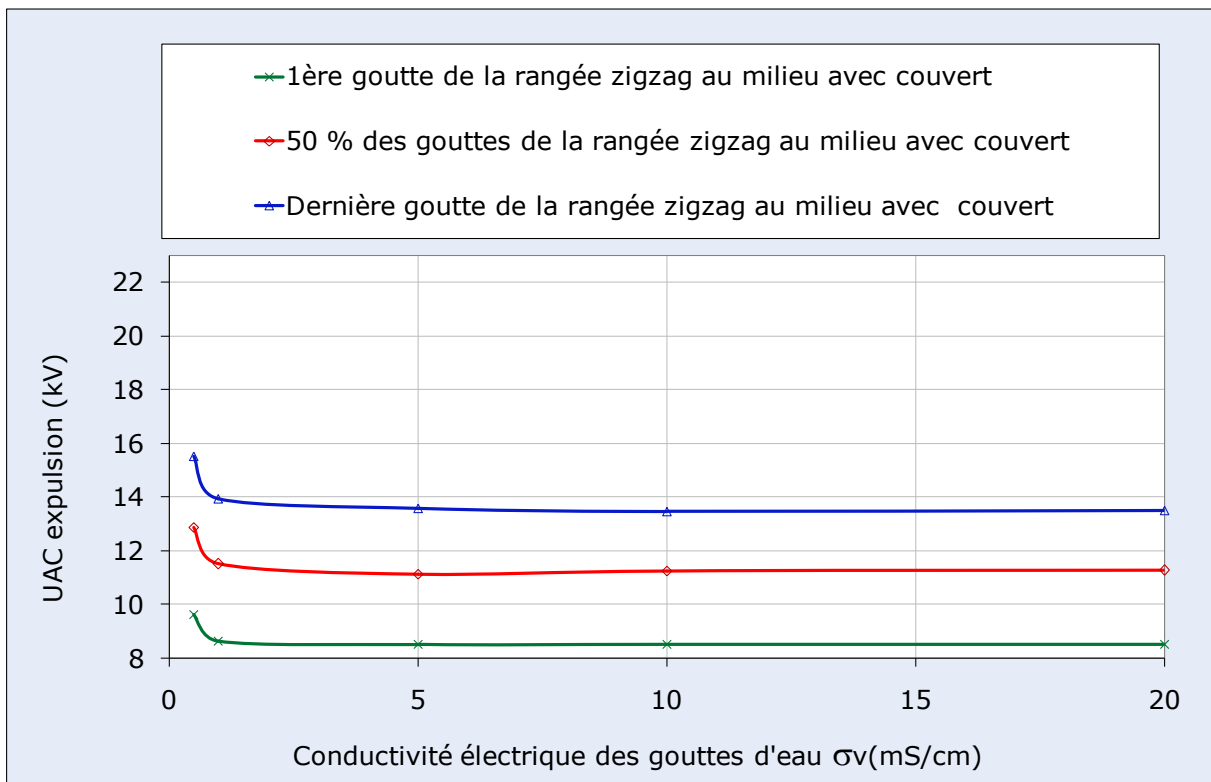
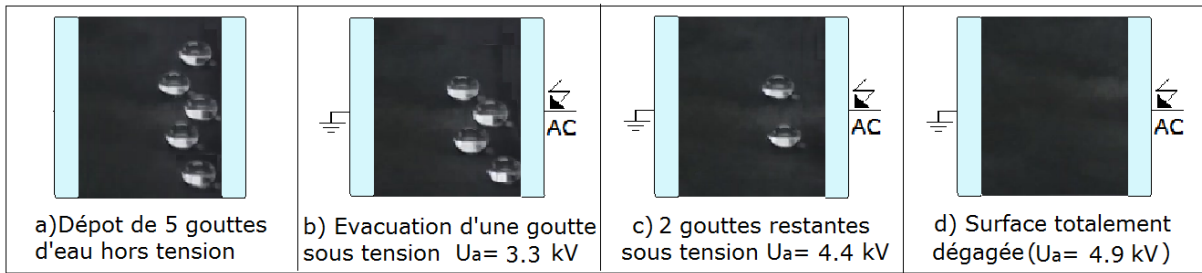
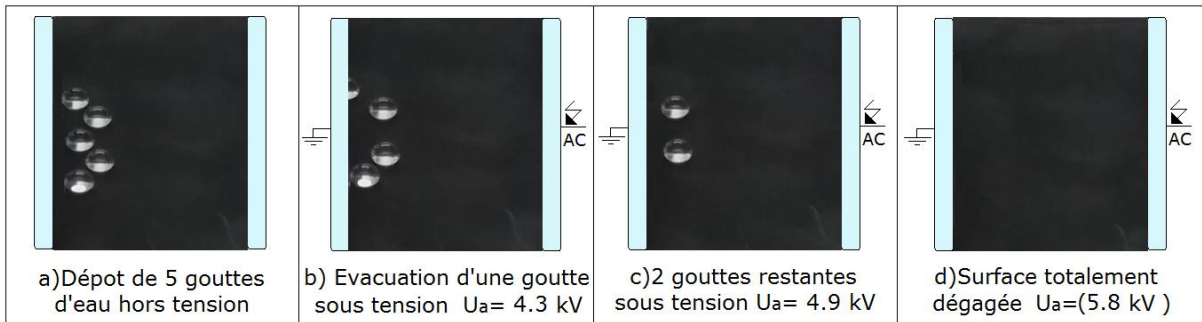


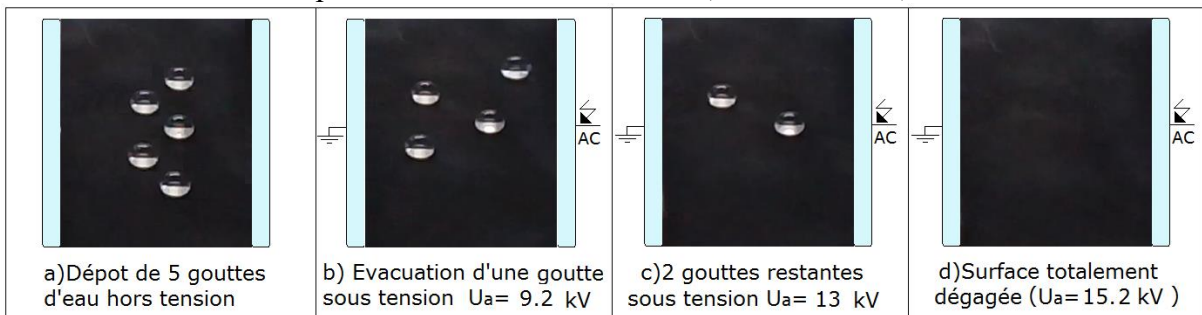
Fig. III. 52:  $U_{eAC} = f(\sigma_v)$  pour différents rangs des gouttes d'eau expulsées de l'isolation



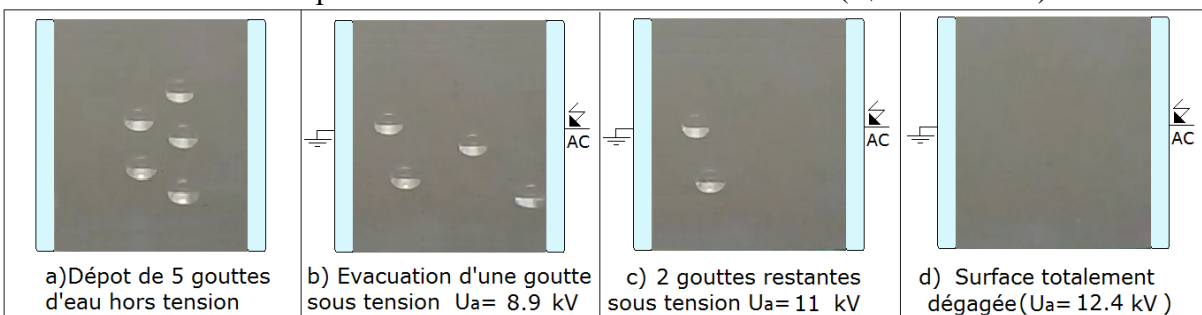
**Fig. III. 53:** Phases principales d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt du côté HT sans couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



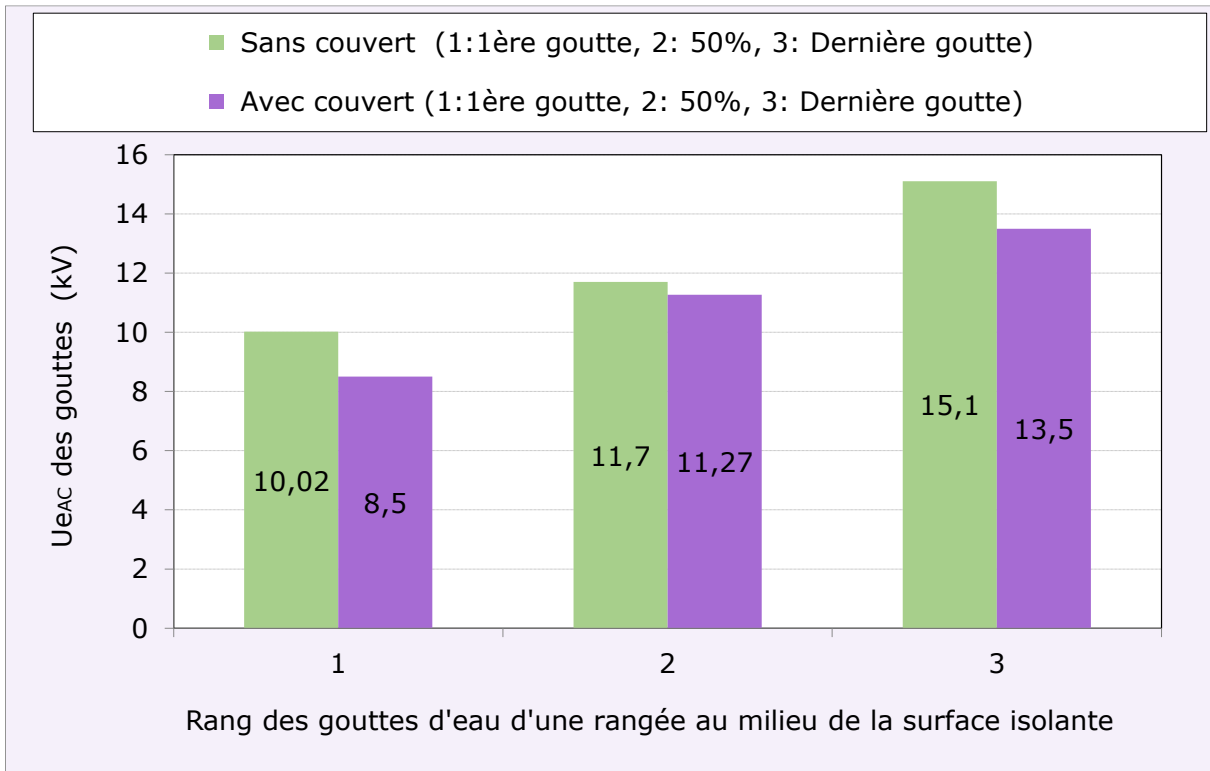
**Fig. III. 54:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt du côté terre sans couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



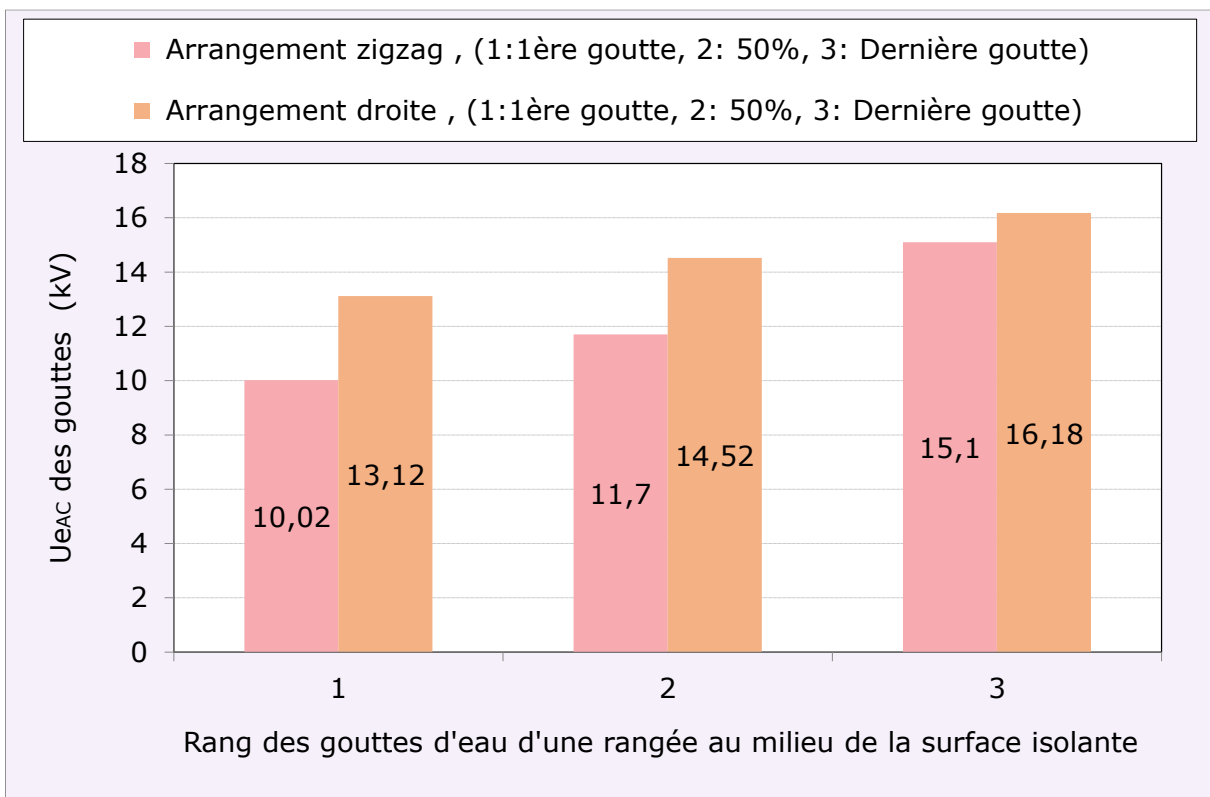
**Fig. III. 55:** Phases principales d'éviction des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de l'isolation sans couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. III. 56:** Etapes essentielles d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag de l'isolation lors de leur dépôt au milieu de l'isolation avec couvert ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



**Fig. III. 57:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en zigzag en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )



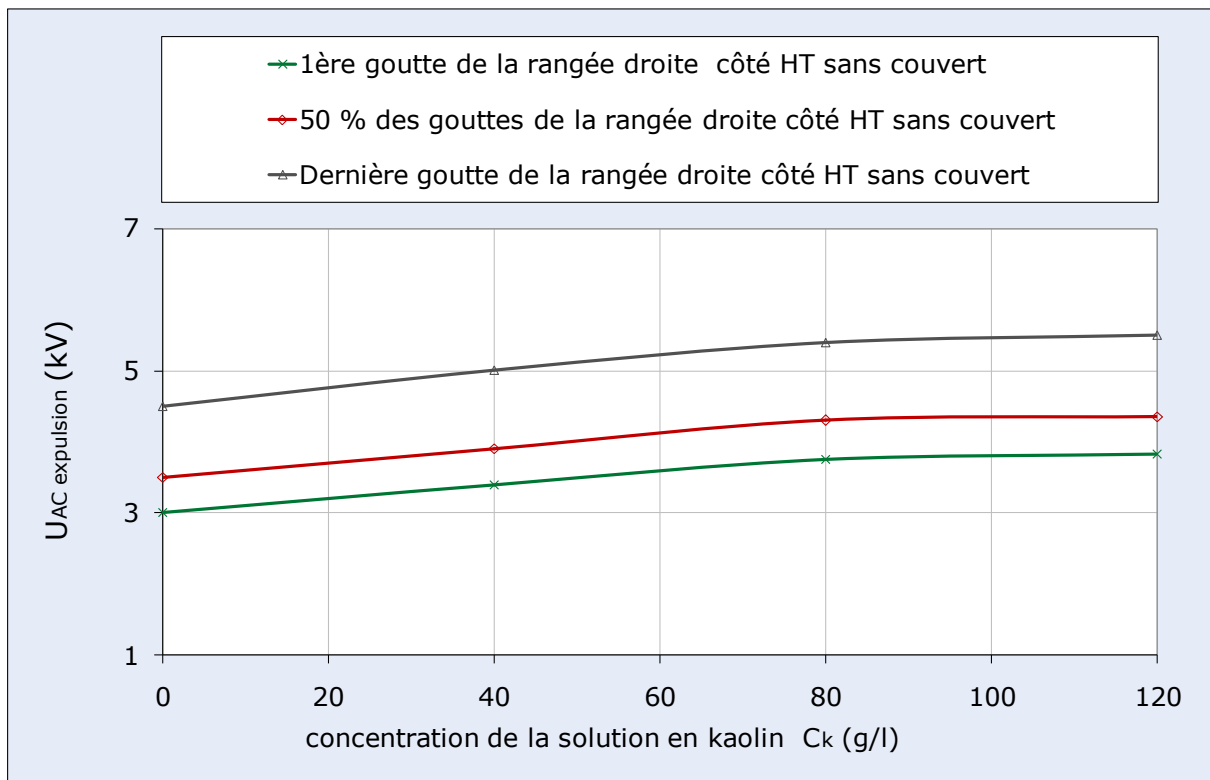
**Fig. III. 58:** Tension d'expulsion des gouttes d'eau d'une rangée en fonction de leur rang sur la ligne de fuite de l'isolation ( $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$ )

### III. 3. 5 Concentrations en kaolin de la solution polluante

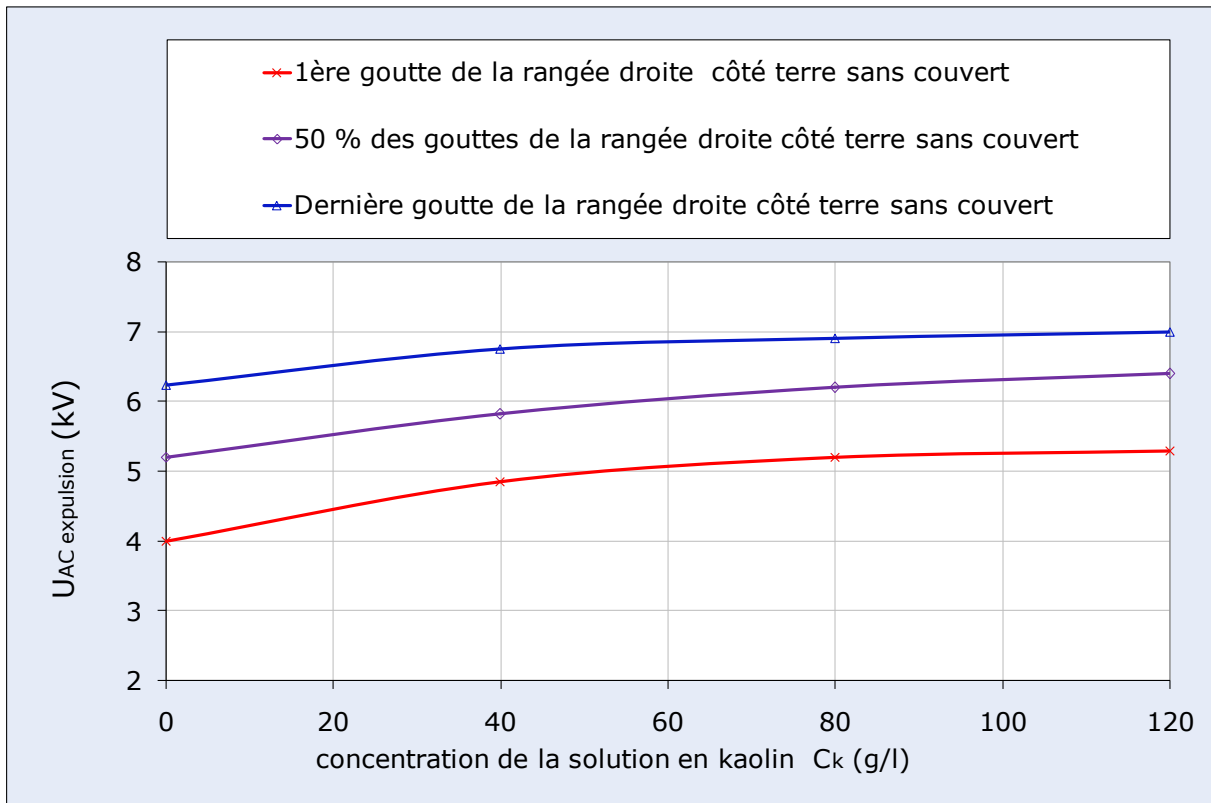
Les figures III. 59, III. 60, III. 61 et III. 62 donnent l'évolution de la tension d'éjection de la première goutte, la médiane et la dernière en fonction de degré de concentration en kaolin de la solution utilisée et la position de la rangée sur la surface isolante superhydrophobe. Il en découle une allure strictement croissante jusqu' à une valeur limite de  $C_k = 80$  g/l, au-delà de laquelle celle-ci demeure pratiquement constante quels que soient la position de la rangée et le degré de couverture de l'isolation.

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

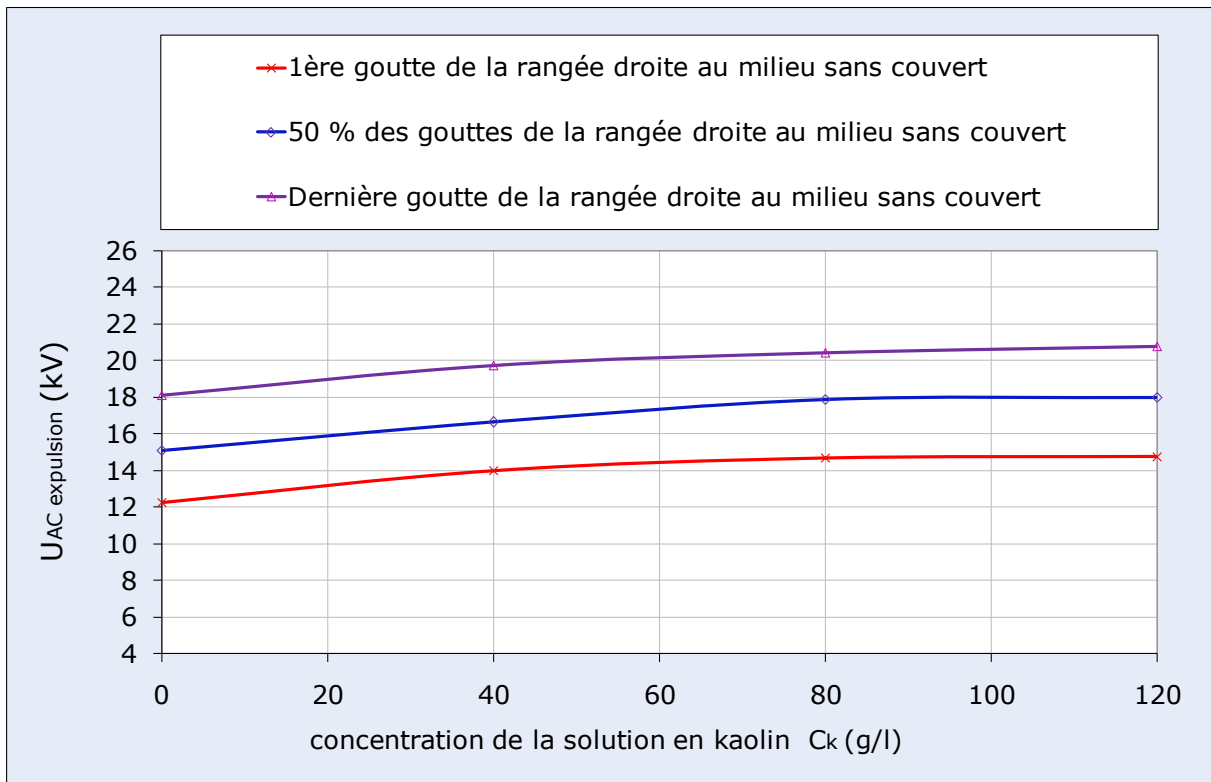
L'augmentation de la tension d'expulsion des gouttes d'eau avec la croissance de la concentration en kaolin de la solution peut être expliqué par le fait que les gouttes sont plus visqueuses par conséquent plus lourdes, cèdent partiellement une certaine quantité du kaolin qui pénètre dans les profondeurs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



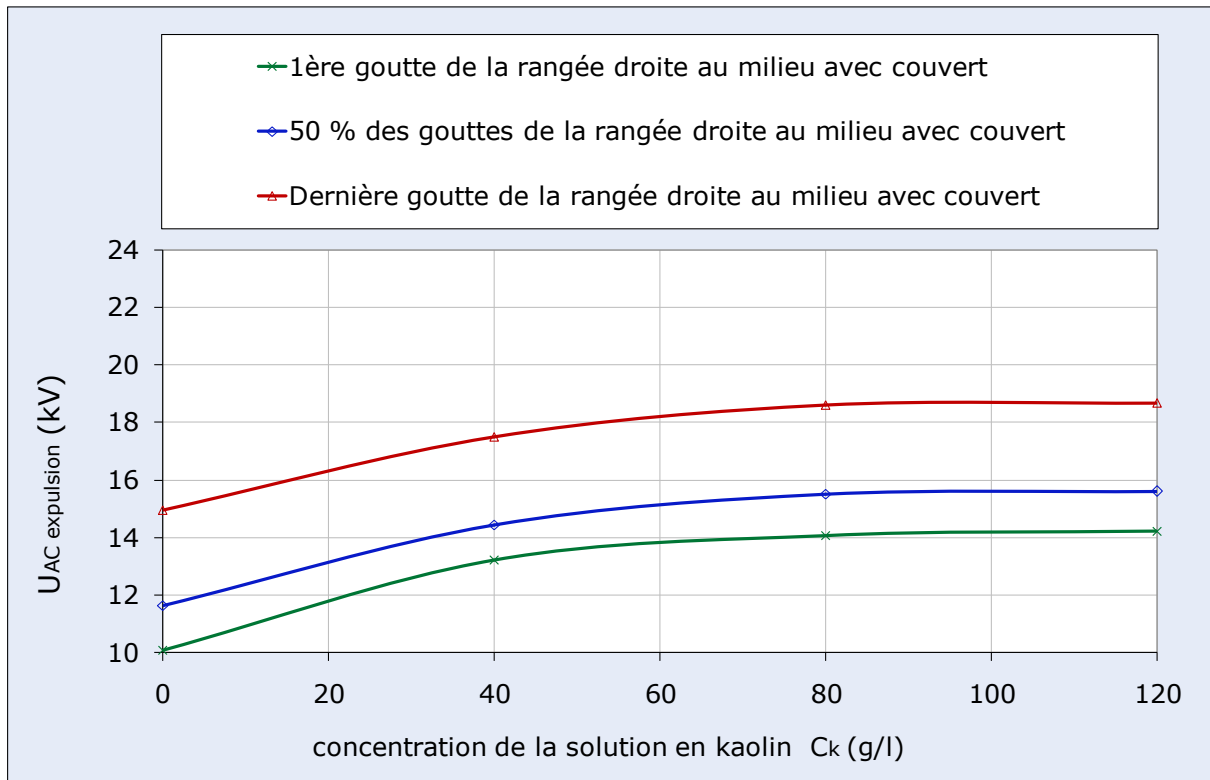
**Fig. III. 59:** Tension d'expulsion en fonction de la concentration en kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50$   $\mu$ S/cm,  $V_d = 60$   $\mu$ l)



**Fig. III. 60:** Tension d'évacuation en fonction de la concentration en kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $V_d = 60 \mu\text{l}$ )



**Fig. III. 61:** Tension d'éjection en fonction de la concentration en kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $V_d = 60 \mu\text{l}$ )



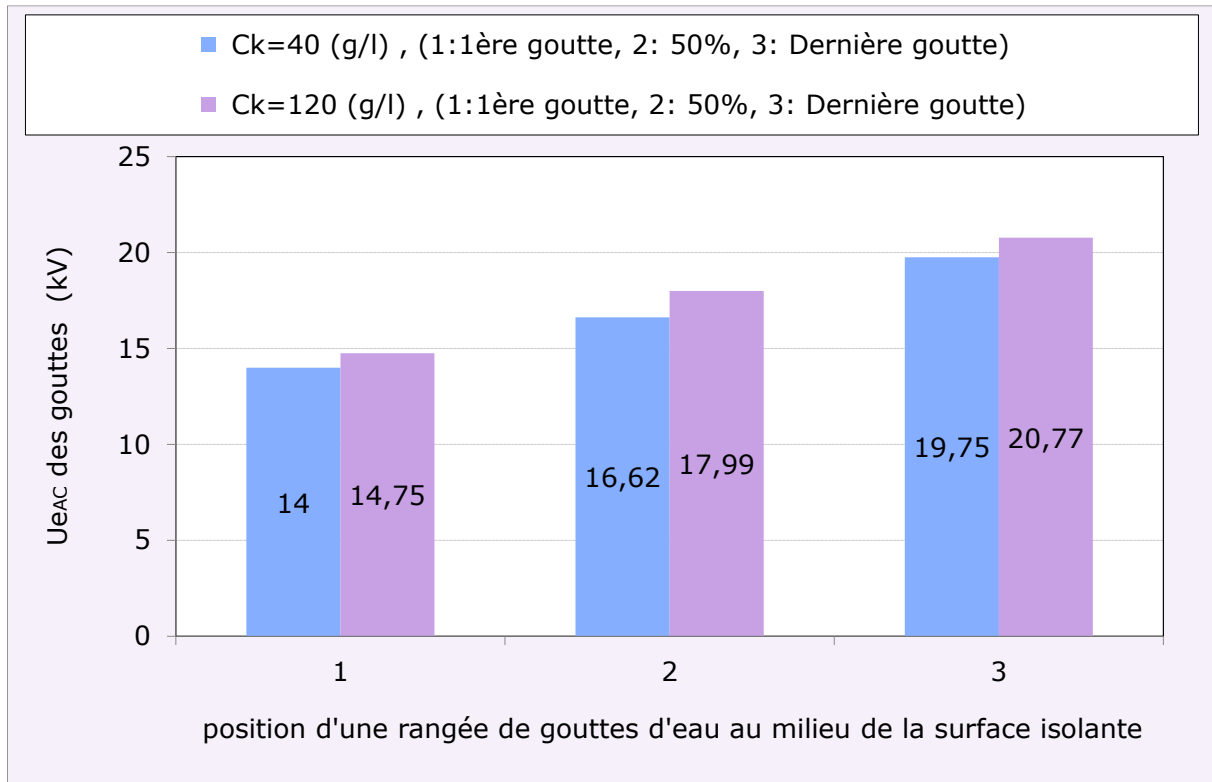
**Fig. III. 62:** Tension d'évacuation en fonction de la concentration en kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation ( $\sigma_v = 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $V_d = 60 \mu\text{l}$ )

La figure III. 63 donne l'histogramme de comparaison de la tension d'éviction à l'extérieur de l'isolation des gouttes d'eau de la rangée du milieu, pour deux concentrations différentes en kaolin de la solution:  $C_{k1} = 40 \text{ g/l}$  et  $C_{k2} = 120 \text{ g/l}$ . Il en résulte une tension d'évacuation des gouttes d'eau plus importante pour une concentration plus élevée quel que soit la position de la rangée sur la surface de l'isolation.

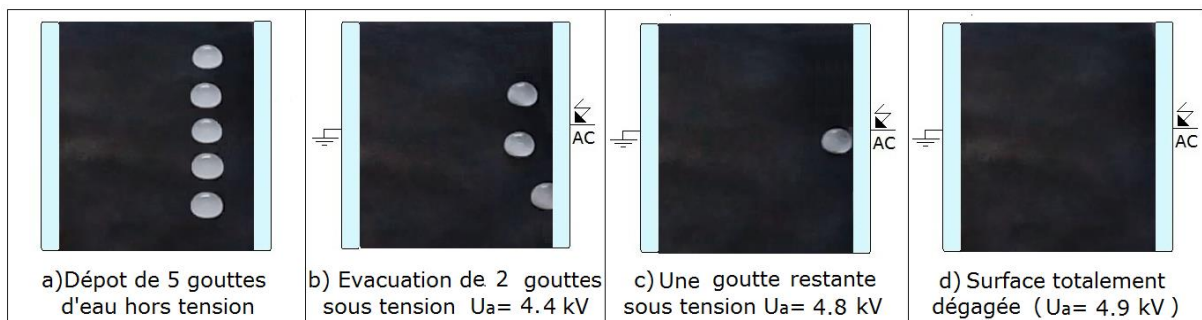
Les figures III. 64, III. 65, III. 66, III. 67, III. 68, III. 69, III. 70 et III. 71 illustrent les phases essentielles d'évacuation d'une rangée de 5 gouttes d'eau en dehors de l'isolation pour deux concentrations en kaolin de la solution ( $C_{k1} = 40 \text{ g/l}$  et  $C_{k2} = 120 \text{ g/l}$ ). Il en résulte que l'éjection des gouttes intéresse en premier lieu celles situées aux extrémités de la rangée, puis vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de la rangée, indépendamment de la valeur de la concentration en kaolin considérée, la position de la rangée sur la surface de l'isolation et le degré de couverture de celle-ci.

La concentration en kaolin ajoutée aux gouttes d'eau ne provoque aucune décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation. La surface de l'isolation reste superhydrophobe avec un angle de contact pratiquement constant et aucun signe de dégradation n'est aperçu sur le matériau utilisé dans cette étude.

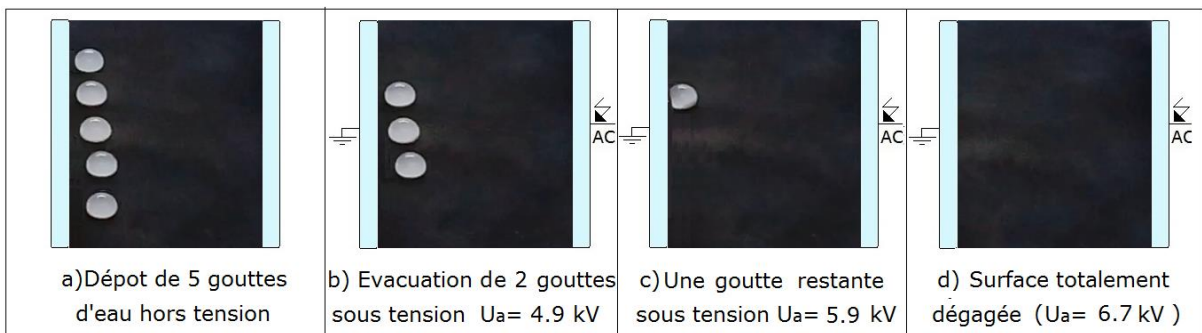




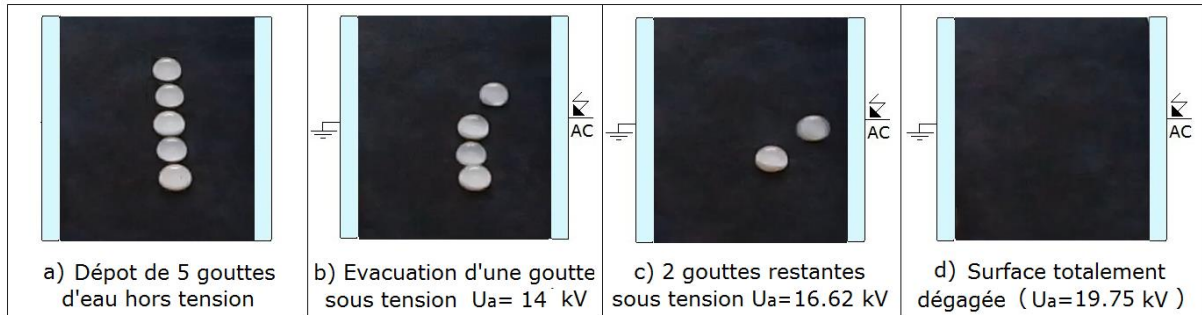
**Fig. III. 63:** Tension d'expulsion des gouttes d'une rangée avec une concentration en kaolin ( $C_{k1} = 40 \text{ g/l}$ ,  $C_{k2} = 120 \text{ g/l}$ ) en fonction de sa position sur la ligne de fuite de l'isolation



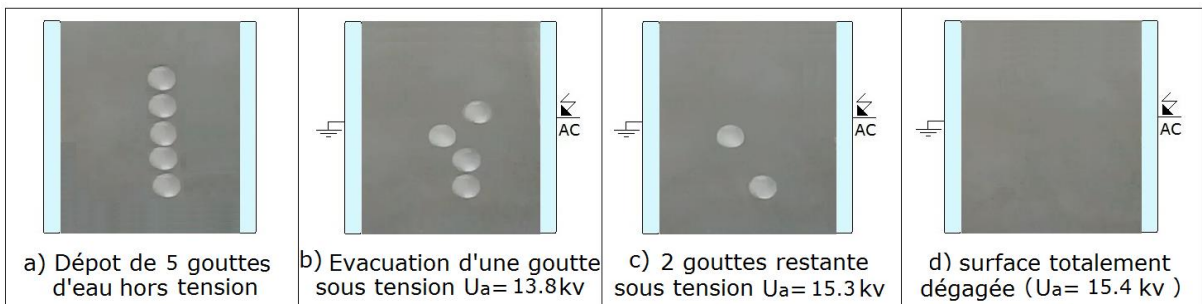
**Fig. III. 64:** Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égal à 40 g/l de kaolin en ligne droite du côté HT



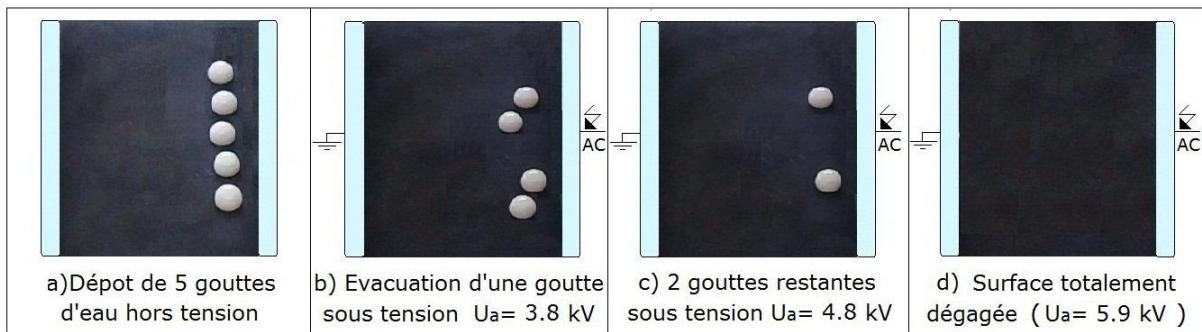
**Fig. III. 65:** Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égal à 40 g/l de kaolin en ligne droite du côté terre



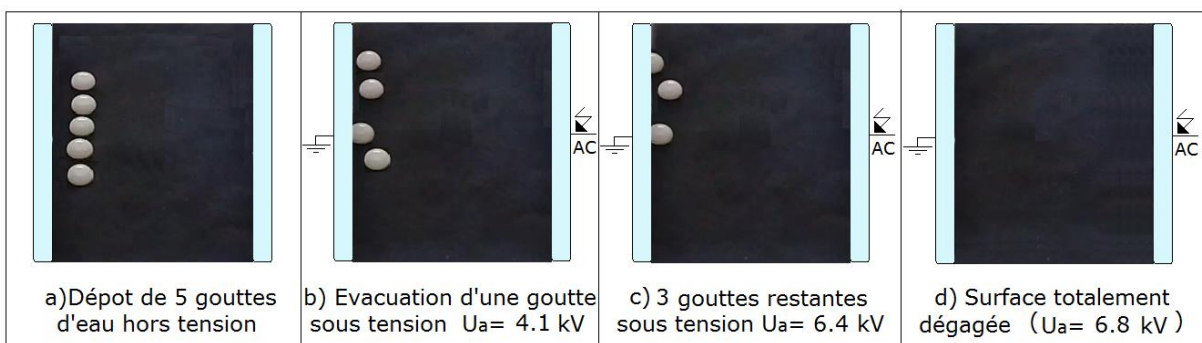
**Fig. III. 66:** Phases essentielles d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égal à 40 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation sans couvert



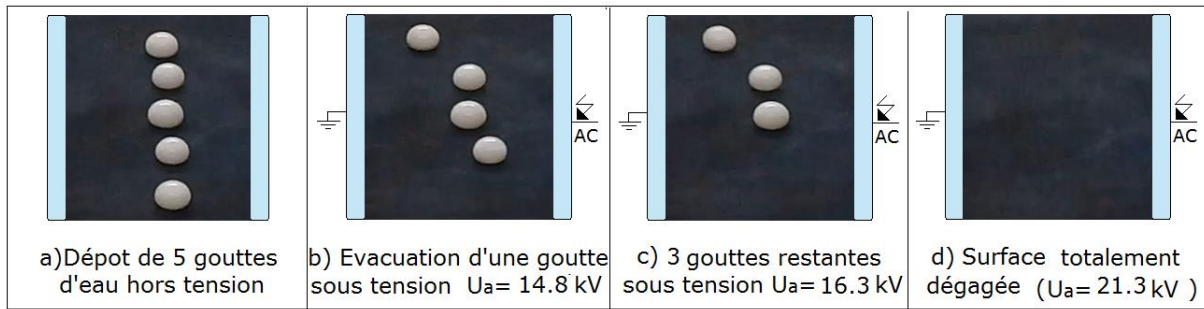
**Fig. III. 67:** Phases essentielles d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égal à 40 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation avec couvert



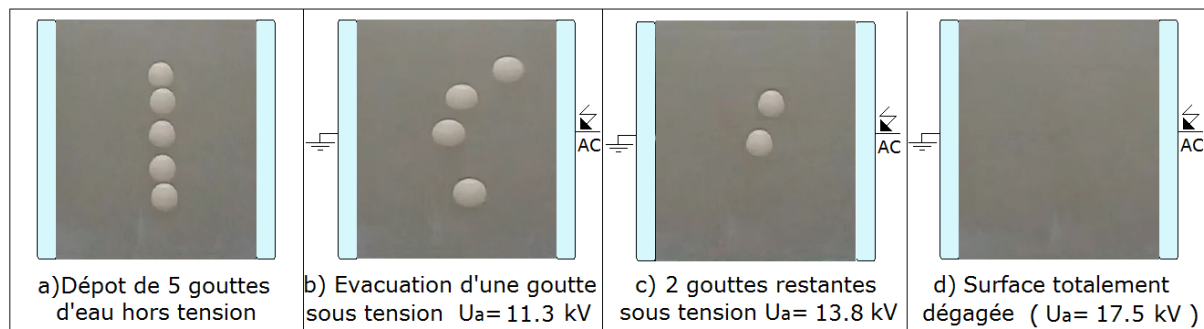
**Fig. III. 68:** Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite du côté HT



**Fig. III. 69:** Différentes phases d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite du côté terre



**Fig. III. 70:** Phases essentielles d'évacuation d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation sans couvert



**Fig. III. 71:** Phases essentielles d'expulsion d'une rangée de gouttes d'eau à concentration égale à 120 g/l de kaolin en ligne droite au milieu de l'isolation avec couvert

### III. 4 Conclusion

Afin d'étudier le mode d'éjection des gouttes en dehors d'une surface superhydrophobe sous tension alternative, nous nous sommes basés tout d'abord sur le confectionnement de plusieurs plaques en verre superhydrophobes à base de silicone. L'angle de contact statique d'une goutte d'eau, posée horizontalement sur cette surface, est de l'ordre de 161°. L'angle de glissement sur cette surface, inclinée par rapport à l'horizontale, est inférieur à 2°.

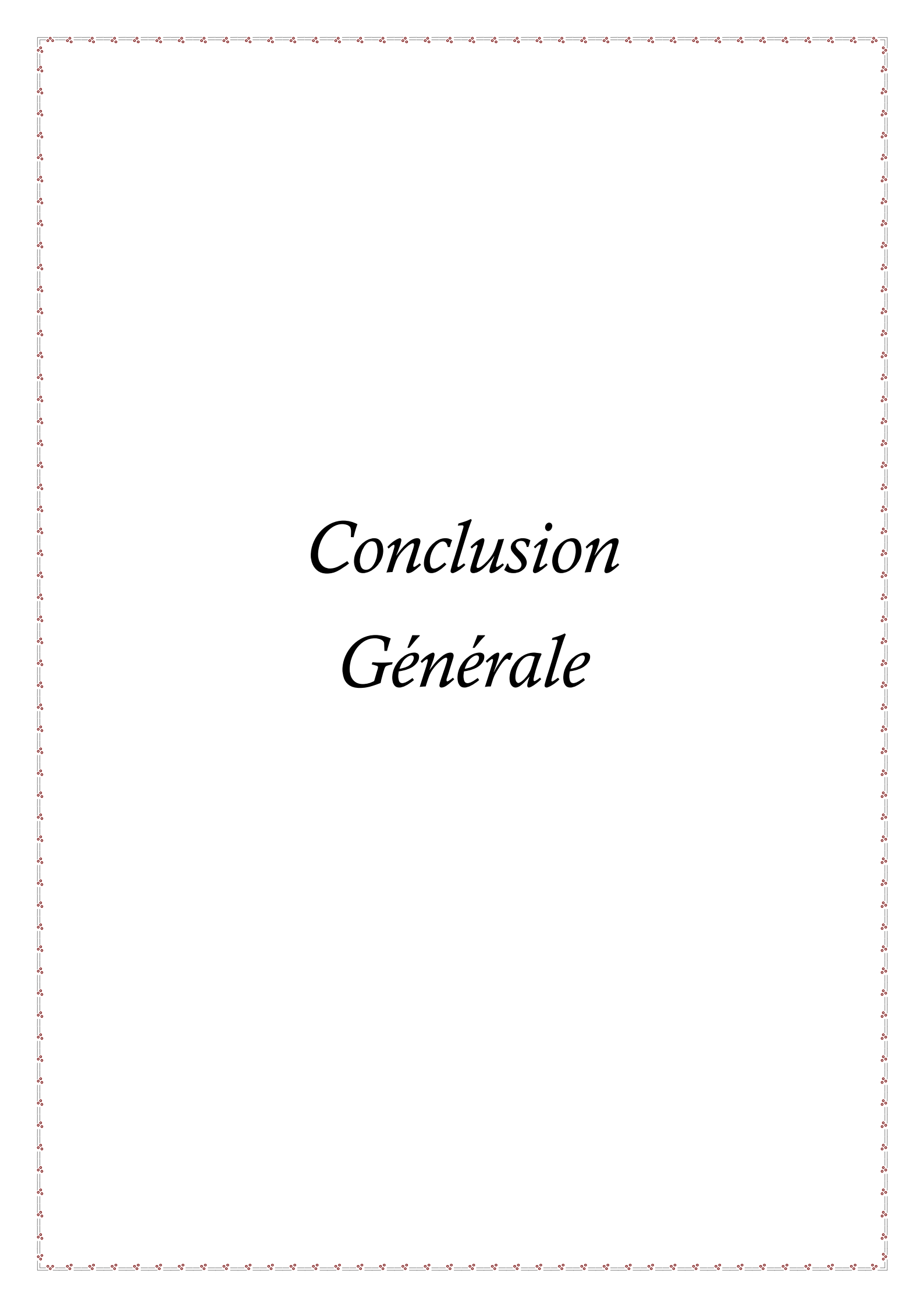
La visualisation du phénomène électrohydrodynamique des gouttes d'eau a montré le mode d'évacuation groupo-individuelle et bidirectionnelle de celles-ci en dehors de l'isolation.

Comparativement aux résultats issus des travaux antérieurs, concernant le profil des électrodes HT et terre, un nouveau jeu d'électrodes a été confectionné. Celui-ci est composé de deux électrodes parallélépipédiques pleines, à extrémités arrondies. Celles-ci ont été surélevées de 10 mm au-dessus de la surface de l'isolation afin de faciliter l'éjection des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation.

Les résultats d'évaluation de la tension d'expulsion des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction de leurs paramètres géométriques et électriques peuvent être résumés comme suit :

- ❖ Le type d'arrangements des gouttes d'eau en lignes droites nécessite une tension moins élevée qu'en zigzag pour les deux côtés de l'isolation HT et terre.
- ❖ la tension d'éviction de la dernière goutte d'eau augmente légèrement en fonction de leur rang.
- ❖ Croissance de la tension d'évacuation des gouttes d'eau avec le déplacement d'une rangée de goutte d'eau des électrodes sous tension et terre vers le milieu de la surface quel que soit le degré de sa couverture.
- ❖ La tension d'expulsion des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur volume quelle que soit la position de la rangée sur la surface superhydrophobe.
- ❖ Une goutte d'eau de faible conductivité électrique, nécessite une tension d'expulsion plus élevée que celle ayant grande conductivité.
- ❖ La tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus importante lorsque la concentration en kaolin de la solution est plus élevée.
- ❖ La tension d'évacuation des gouttes d'eau de la surface d'une isolation est plus faible avec couverture que sans celle-ci.

Le refoulement des gouttes d'eau sous la variation des paramètres étudiés ne conduit à aucune création de décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation et aucune dégradation n'apparaît sur la surface de l'isolation. L'angle de contact de l'isolation, mesuré en chaque fin d'une série d'essais reste toujours constant et la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude reste conservée.



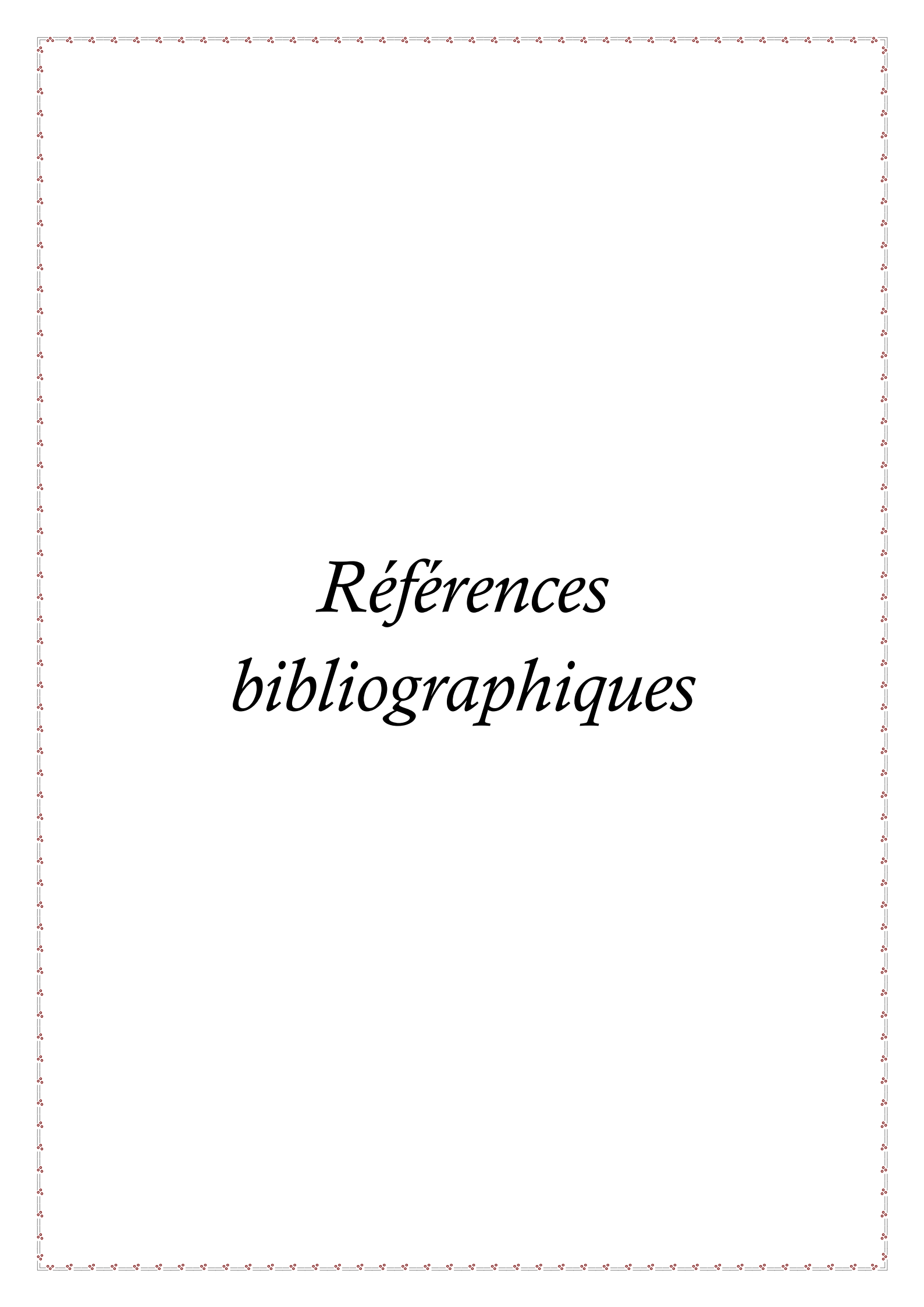
# *Conclusion*

## *Générale*

Le but principal de notre travail était d'étudier l'effet des paramètres électrogéométriques des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension alternative 50 Hz. Pour cette étude nous avons réalisé manuellement plusieurs surfaces superhydrophobes à base de silicone, caractérisé par un angle de contact de l'ordre de 161 °.

L'analyse des résultats émanant de cette étude est résumée comme suit:

- Les gouttes d'eau quittent la surface superhydrophobe sous l'effet du champ électrique, quels que soient le nombre de gouttes et leur position par rapport aux électrodes.
- La valeur de tension d'évacuation des gouttes diminue avec l'augmentation de leur volume jusqu'à une valeur limite égale 40  $\mu$ l, au-delà de cette valeur la tension reste constante quelle que soit la variation supplémentaire du volume de la goutte.
- Concernant la conductivité des gouttes d'eau, la valeur de leur tension d'évacuation diminue jusqu'à une valeur égale à 1 mS/cm, puis elle reste constante quel que soit sa conductivité.
- La tension d'expulsion des gouttes d'eau augmente avec l'élévation de la masse de kaolin, jusqu'à une valeur limite égale 80 g/l, et au-delà de laquelle celle-ci reste constante indépendamment de la concentration en kaolin.
- La tension d'évacuation des gouttes d'eau de la surface d'une isolation est plus grande sans couverture qu'avec celle-ci.
- L'éviction des gouttes d'eau sous la variation des grandeurs étudiées n'engendre aucune formation de décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation et aucune altération apparente de l'isolation. L'angle de contact de l'isolation, mesuré durant tous les essais effectués lors de cette étude, reste toujours constant et la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude reste conservée.



*Références  
bibliographiques*



- [1] Thomas Young, “An essay on the cohesion of fluids”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 95:65-87, 1805.
- [2] Laforte, C, “ Étude de l’adhérence de la glace sur des solides à caractère glaciophobe”, in Sciences appliquées 2001, Université du Québec à Chicoutimi : Chicoutimi, PQ.p. 152.
- [3] <https://tpeuperhydrophobienmgs.wordpress.com/>.
- [4] P. Dellise, L. Fache, “ Olympiade de physique 2015”, Lycée des Flandres Hezbrouck, 2015.
- [5] Wilhelm Barthlott and Christoph Neinhuis, “Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces”. *Planta*, 202(1):1-8, 1997.
- [6] R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water”, *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no .8, pp.988-944, 1936.
- [7] A. Cassie and S. Baxter, “Wettability of porous surfaces”, *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, pp. 546-551, 1944.
- [8] H. Liu et al, “Recent Progress in Fabrication and Application of Superhydrophobic coating on Cellulose-Based Substrates”, *Materials*, vol. 9, no; 3, p. 124, 2016.
- [9] <http://mag.monchval.com/>.
- [10] <https://docbebitte.com/>.
- [11] <https://www.artmajeur.com/>.
- [12] <https://www.fondsecran.eu/>.
- [13] <https://www.adheres-tu.over-blog.com/>.
- [14] <https://hydrophobie.wordpress.com/>.
- [15] <https://tpehydrophobe.wordpress.com/>.
- [16] <https://tribologie.free.fr/>.
- [17] <https://clairefischer.wixsite.com/>.

- [18] A. Kuechler, "Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie- Anwendungen", 3ème édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [19] Lau, K.K.S.; Bico, J.; Teo, K.B.K.; Chhowalla, M.; Amaratunga, G.A.J.; Milne, W.L.; Mckinley, G.H.; Gleason, K.K., "Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests", *Nano Lett.*(2003), 3, 1701-1705.
- [20] Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Master. Lett*, "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces", (2010), 64, 2722-2724.
- [21] Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H.; Lee, Y.K., "Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces", *TRANSDUCERS 2009 -15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and microsystems* (2009), 441-444.
- [22] Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R.; Kim, W.D., "Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface", *Chinese Science Bulletin* (2009), 54, 3613-3616.
- [23] <https://www.newswire.ca/fr/>.
- [24] <https://www.astrosurf.com/>.
- [25] <https://www.pinterest.com/>.
- [26] Li, Jian, et al. "Electrohydrodynamic behavior of water droplets on a horizontal super hydrophobic surface and its self-cleaning application." *Applied Surface Science* 403 (2017): 133-140.
- [27] Y. Li and all, "Effect of superhydrophobicity on flashover characteristics of silicone rubber under wet conditions", *AIP ADVANCES* 8,015313 (2018), pp.1-12.
- [28] Y. Li and all, "Effect of superhydrophobicity on surface damage of silicone rubber under AC Voltage" *AIP ADVANCES* 8, 035117 (2018), pp.1-13.
- [29] R. BOUDISSA and all, "Impact du dépôt de gouttes d'eau sur une surface superhydrophobe sous tension alternative 50 Hz", *Mémoire de fin d'étude, Génie Electrique*, 2018.
- [30] CEI 60-1. "Techniques des Essais à Haute Tension ". Définition et prescriptions générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.

- [31] A. Mekhaldi, “Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz”, Thèse de doctorat d’état, Génie Electrique, ENP, juin 1999.
- [32] F. Frifra et N. Rezak, “Etude physico-chimique du dépôt de pollution sur la surface des isolateurs HT”. PFE, Département de chimie industrielle, USTO-MB, Algérie, 1999.
- [33] **CEI 815** “Guide pour le choix des isolateurs sous pollution”, 1986.
- [34] M.A.B. EL Koshairy ; E.EL Sharkaoui ; M.M. Awad, H.E.M. Zarzoura ; M.M. Khalifa et A. Nosseir, “Performance de chaines d’isolateurs haute tension soumises à la pollution du désert”, CIGRE, Rapport 33-09, Paris 1982.
- [35] D. Namane, “Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d’isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz”, Thèse de magister, ENP Alger, 1998.
- [36] C. Huraux, A.M. Rahal, “Le contournement des isolatrices hautes tensions approché à l’aide d’un modèle de laboratoire”, RGE, tome 84, N°6, juin 1975, pp.425-429.
- [37] B. Hammoum, A. Kerbouche, “Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 2007.
- [38] R. Moumeni, A. Bahous, “Modélisation dynamique de l’arc électrique sur des isolateurs pollués de haute tension”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, USTHB 1996.
- [39] T Guida, “Comportement d’un modèle d’isolateur sous tension impulsionnelle”, Thèse de Magister, ENP Alger, 2008.
- [40] R. Bouzeroura, “Etude du développement d’arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue”, Thèse de magister, Université de Bejaia, 2009.
- [41] K. Amriche, S. Benayad, “Modélisation des principales caractéristiques d’un isolateur pollué sous tension continue”, PFE, Génie Electrique, USTHB 2004.
- [42] Z. Sahli, “Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu”, Thèse de Magister, Génie

Electrique, Université de Bejaia, 2003.

[43] A. Mekhaldi, “Etude du développement d’un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique”, Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.

[44] A. Mekhaldi, H. Boudjelthia, “Contribution à l’étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba”, PFE, Génie Electrique, ENP 1984.

[45] F. Midi, K. Ouerdane, “Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en régions littorales”, Mémoire de fin d’études, département d’électrotechnique. USTHB Alger, 1998.

[46] S. Guerfi, “Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue”, Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.

[47] M. Soufi, M. Zemirline, “Conception d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz”, PFE, Génie Electrique, ENP 2004.

[48] A. Mekhaldi, “Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz”, Thèse de doctorat d’état, Génie Electrique, ENP, juin 1999.

[49] Groupe d’action 33-4-03, “Dispositions de Surveillance des isolateurs soumis à la pollution”, Electra, N° 152, Février 1994, p. 78-90.

[50] M. Tegar, “Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées”, Thèse de Magister, Génie électrique ENP, 1993.

[51] R. Torchiat et F. Aggoune., “Impact de gouttes d’eau sur le comportement électrique d’une isolation superhydrophobe sous tension alternative 50 Hz”, Université de Bejaia, 28 juin 2018.

[52] T. Braunsbeger, M. Kurrat, “Cyclic Water Dop Corona on Silicone Rubber Samples 15th International Symposium on High Voltage Engineering”, University of Ljublijana, Elektroinstitut Milan Widmar, Ljublijana, Slovenia, Auguste 27- 31, T4- 280, pp. 1- 5, 2007.

[53] IEC 62271-304, “Technical Specification of design classes indoor enclosed switchgear and controlgear from 1 kV and up to and including 52 kV to be used in service climatic

condition”, High Voltage Switchgear and Controlgear-PART 304.

[54] IEC (60060-1), “High Voltage test techniques”, part 1: General definition and test requirements, 1991.