

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



## **Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique**  
**Option: Electrotechnique Industrielle**

### **Thème**

**Effet de la distribution de la taille des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension alternative**

**Présenté par :**

**M<sup>elle</sup> : TADRENT Nour El Houda**

**M<sup>elle</sup> : BENAMSILI Ahlem**

**Soutenu publiquement le 17 juin 2019 devant de jury composé de:**

- |                                    |                   |                      |                      |
|------------------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| <b>- M<sup>r</sup> R. ALKAMA</b>   | <b>Pr</b>         | <b>U.A.M. Béjaia</b> | <b>Président</b>     |
| <b>- M<sup>r</sup> A. RAHMANI</b>  | <b>MCB</b>        | <b>U.A.M. Béjaia</b> | <b>Examineur</b>     |
| <b>- M<sup>r</sup> R. BOUDISSA</b> | <b>Professeur</b> | <b>U.A.M. Béjaia</b> | <b>Rapporteur</b>    |
| <b>- M<sup>r</sup> K. HAMOUR</b>   | <b>Doctorant</b>  | <b>U.A.M. Béjaia</b> | <b>Co-Rapporteur</b> |

**Année Universitaire: 2019**



# Remerciements

*Avant tout, nous adressons nos vifs remerciements les plus sincères aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à notre belle réussite.*

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes aux quelles nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.*

*Nous tenons sincèrement à remercier, Monsieur le professeur R. BOUDISSA qui, en tant qu'encadreur principal, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de cette étude, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Au cours de notre travail, nous avons bénéficié du soutien, du doctorant K. HAMOUR et d'être à notre disposition tout au long de la concrétisation de ce projet.*

*Nos remerciements vont aux membres du jury, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Pour finir, il nous est plus qu'agréable de réserver l'expression de notre gratitude et nos remerciements les plus particuliers, aux membres de nos familles respectives qui ont su nous encourager et nous soutenir sans siffler, durant toute cette année et celles d'avant. Puissent-ils être fiers de nous.*





## *Je dédie ce mémoire à:*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude;*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi;*

*Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*Mes neveux et nièces que je ne pourrais tous citer ici;*

*Mes belles sœurs et mon beau frère.*

*Mes amis et amies de par le monde qui n'ont cessé de m'encourager;*

*Tonton Pr R. Boudissa pour son aide et sa précieuse attention.*

*Ahlem Benamsili*



# *Je dédie ce mémoire à:*

*Ma Mère, qui a sacrifié énormément, pour ma réussite et surtout la continuité de mes études j'en serai arriver à ce jour-là, si elle n'était à mes côtés, de par son amour, son soutien, et ses précieux conseils, pour tout son assistance et sa présence dans ma vie;*

*Mon Père, l'idole que vous être à mes yeux. Valeurs précieuses générosité, travail consciencieux, que j'ai appris, Fille a son papa que je suis fière de vous et que le grand dieu vous guérisse; Merci chers parents pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur;*

*Mes frères et sœurs ; Hichem, Moncef, Ikram, Chaima qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité;*

*Ma coéquipière, que malgré les hauts et les bas en restent des sœurs à vie « Merci khetitou »;*

*Mes amis et amies de par le monde qui n'ont cessé de m'encourager;*

*Mon encadreur, Pr R. Boudissa pour la précieuse formation scientifique que j'ai acquise, grand merci à vous.*

*Nour El Houda TADRENT*



# Tables de matières



**Chapitre I:** Isolations superhydrophobes et les travaux antérieurs sur leur performance électrique sous tension alternative

**Fig. I. 1:** Illustration de la tension de surface..... 4

**Fig. I. 2:** Goutte de pluie sous l'effet de la tension de surface..... 5

**Fig. I. 3:** Suivant l'angle de contact  $\theta_0$ , une goutte d'eau peut s'étaler totalement sur son solide ou conserver une forme sphérique (a: Mouillage total, b: hydrophile, c: hydrophobie, d: non-mouillage) ..... 5

**Fig. I. 4:** Modèle de surfaces superhydrophobes (a: Modèle de Wenzel, b: Modèle de Cassie) ..... 13

**Fig. I. 5:** Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact..... 14

**Fig. I. 6:** Démonstration de la propriété autonettoyante (a: une surface lisse, l'eau n'enlève pas les contaminants, b: surface superhydrophobe et autonettoyante) ..... 14

**Fig. I. 7:** Goutte d'eau sur une feuille de salvinia molesta ..... 15

**Fig. I. 8:** Façade autonettoyante ..... 16

**Fig. I. 9:** Dispositif expérimental (a: Formes des échantillons, b: Configuration expérimentale)..... 17

**Fig. I. 10:** Processus de contournement de la surface en silicone superhydrophobe avec une gouttelette de 20  $\mu$ l (a : Absence de tension, b : Glissement de la gouttelette, c: Juste avant le contournement, d : Contournement)..... 18

**Fig. I. 11:** Processus de contournement sur une surface en silicone avec une gouttelette de 20 $\mu$ l (a: Aucune tension appliquée, b: Juste avant le contournement, c: Contournement, d: Après le contournement). ..... 18

**Fig. I. 12:** 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 se sont produits). ..... 18

**Fig. I. 13:** 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) ..... 19

**Fig. I. 14:** 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)..... 20

**Fig. I. 15:** Système d'électrodes (a: vue de dessus, b: vue de face) ..... 20

**Fig. I. 16:** Processus de la décharge durant le quatrième essai: (a: Absence de tension appliquée, b: décharge d'arc, c: formation d'un pont entre électrodes, d: Evaporation des gouttelettes, e: Extinction de la décharge) ..... 21

**Fig. I. 17:** Processus de dégradation de la surface superhydrophobe ..... 21

**Fig. I. 18:** Processus de décharge sur l'échantillon de silicone hydrophobe au bout du deuxième essai (a: Absence de tension, b: décharge d'arc à 4 kV, c: Formation d'un pont entre les électrodes, d: évaporation des gouttelettes, e: Extinction de la décharge)..... 22

**Fig. I. 19:** Dégradation d'une surface hydrophobe ..... 22

**Fig. I. 20:** Fabrication d'une surface superhydrophobe à l'aide d'une surface hydrophobe à base de papier-sable ..... 23

**Fig. I. 21:** Rigidité diélectrique des matériaux hydrophobes et superhydrophobes en fonction de la rugosité de la surface (a: surface sans gouttes, b: surface avec gouttes, c: isolation hydrophobe, d: isolation superhydrophobe)..... 23

**Fig. I. 22:** Systèmes d'électrodes confectionnés ..... 25

**Fig. I. 23:** Tension alternative d'expulsion en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe ..... 25

**Fig. I. 24:** Tension alternative d'expulsion en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe..... 26

**Fig. I. 25:** Tension alternative d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe ..... 26

**Fig. I. 26:** Tension alternative d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ..... 27

**Chapitre II:** Pollution et contournement électrique sous tension alternative

**Fig. II. 1:** Couche de pollution sur des isolateurs en silicone et en verre.....30

**Fig. II. 2:** Secteur de statistique des différentes sources de pollution en fonction de l'origine de celle-ci (1 : Chauffage commercial et résidentiel, 2 : Autres, 3 : Agriculture, 4 : Produits commerciaux et des consommation, 5 : Transports, 6 : Industrie).....32

**Fig. II. 3:** Schéma et procédé de mesure de la DDNS.....36

**Fig. II. 4:** Contournement des isolateurs électrique de haute tension.....39

**Fig. II. 5:** Principales phases de contournement de la surface d'un matériau superhydrophobe sous électrodes à dents.....40

**Chapitre III:** Résultats expérimentaux sur la performance des surfaces superhydrophobes sous tension alternative

**Fig. III. 1:** Modèle expérimental et ses caractéristiques ..... 43

**Fig. III. 2:** Etapes de confection d'une surface en verre superhydrophobe à base de silicone ..... 44

**Fig. III. 3:** Mesure du volume d'une goutte d'eau avec micropipette et son angle de contact. .... 45

**Fig. III. 4:** Dessiccateur, balance électronique et conductimètre à sonde mobile ..... 45

**Fig. III. 5:** Recouvrement de la surface de l'isolation en nombre variable de rangées de gouttes d'eau de l'électrode terre vers celle sous tension (T: Zone terre, IT: Zone intermédiaire terre, IHT: Zone intermédiaire haute tension, HT: Zone haute tension)..... 46

**Fig. III. 6:** Recouvrement partiel de la surface de l'isolation en rangées de gouttes d'eau de l'électrode sous tension vers celle terre ..... 47

**Fig. III. 7:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en nombre de rangées et volume des gouttes d'eau variables ( $V_p$ : petit volume,  $V_G$ : grand volume,  $R_V = V_p/V_G = V_{10}/V_{60}$ )..... 47

**Fig. III. 8:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en nombre de rangées et volume des gouttes d'eau variables ( $R_V = V_{30}/V_{60}$ ) ..... 47

**Fig. III. 9:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en rangées de gouttes d'eau à rapport de conductivités électriques variable ( $\sigma_f$ : Conductivité faible,  $\sigma_F$ : Conductivité forte)..... 48

**Fig. III. 10:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en rangées de gouttes d'eau à différence de concentration en kaolin ( $\Delta C_k = C_k - C_0$ ) variable ( $R_s$ : Rangée de gouttes d'eau sans kaolin,  $R_k$ : Rangée de gouttes d'eau avec kaolin) ..... 48

**Fig. III. 11:** Schéma de mesure de la tension d'essai entraînant l'expulsion des gouttes de l'isolation et de visualisation de leur évacuation (Tr: Transformateur, UC: Appareil de commande, SSH: Surface superhydrophobe, Cam: Caméscope, PC: Ecran Ordinateur)..... 49

**Fig. III. 12:** Phases essentielles d'éjection groupo-individuelle et bidirectionnelle de 20 gouttes en dehors de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )... 50

**Fig. III. 13:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour un arrangement en lignes droites de 4 rangées x 5 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) ..... 52

**Fig. III. 14:**  $U_{eAC} = f(N_r)$  pour une isolation superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau à partir de l'électrode terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) ..... 52

**Fig. III. 15:**  $U_{eAC} = f(N_r)$  pour une isolation superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau à partir de l'électrode sous tension ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) ..... 53

**Fig. III. 16:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour une rangée de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) ..... 54

**Fig. III. 17:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour deux rangées de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) ..... 54

**Fig. III. 18:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour trois rangées de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) ..... 55

**Fig. III. 19:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour quatre rangées de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ ) ..... 55

**Fig. III. 20:** Etapes essentielles d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée déposée au voisinage de l'électrode terre ..... 56

**Fig. III. 21:** Principales phases d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée située au voisinage de l'électrode sous tension ..... 56

**Fig. III. 22:**  $U_{eAC} = f(nv_{dP}/nv_{dG})$  et de l'emplacement des rangées sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{10}/V_{60}$ ). (RT : Rangée très proche de l'électrode terre, RHT : Rangée très proche de l'électrode HT, RIT : Rangée intermédiaire du côté terre, RIHT : Rangée intermédiaire côté HT) ..... 57

**Fig. III. 23:**  $U_{eAC} = f(nv_{dP}/nv_{dG})$  et de l'emplacement des rangées sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{30}/V_{60}$ ). (RT : Rangée proche de l'électrode terre, RHT : Rangée proche de l'électrode HT, RIT : Rangée intermédiaire du côté terre, RIHT : Rangée intermédiaire côté HT) ..... 58

**Fig. III. 24:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition des volumes  $3R_{V60}R_{V10}$  sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{10}/V_{60}$ ).. ..... 58

**Fig. III. 25:** Principales phases d'éjection des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition des volumes  $R_{V60}3R_{V10}$  sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{10}/V_{60}$ ).. ..... 59

**Fig. III. 26:**  $U_{eAC} = f(\sigma_f/\sigma_F)$  et de l'emplacement des rangées sur la surface de l'isolation. (RHT/FC : Rangé proche de l'électrode HT à forte conductivité, RT/fC : Rangé proche de l'électrode terre à faible conductivité, RZIHT/FC : Rangée de la zone intermédiaire du côté HT, RZIT/fC : Rangée de la zone intermédiaire du côté T) ..... 60

**Fig. III. 27:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité du degré de pollution  $2R_{\sigma 5} 2R_{\sigma 20}$  ( $R_\sigma = \sigma_5/\sigma_{20}$ ,  $\Delta C_k = 0$  g/l,  $V_d = 60$   $\mu$ l ) ..... 60

**Fig. III. 28:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité du degré de pollution  $2R_{\sigma 10} 2R_{\sigma 20}$  ( $R_\sigma = \sigma_{10}/\sigma_{20}$ ,  $\Delta C_k = 0$  g/l,  $V_d = 60$   $\mu$ l ) ..... 60

**Fig. III. 29:** Tension d'essai entraînant l'expulsion des rangées de gouttes d'eau en fonction de leur nature et emplacement sur la surface de l'isolation ( $V_d = 60$   $\mu$ l,  $C_k = 0$  g/l,  $\sigma_v = 0.5$  et  $10$  mS/cm) ..... 61

**Fig. III. 30:**  $U_{eAC} = f(\Delta C_k)$  et de la nature de la rangée (RHT/ak : Rangée très proche de l'électrode HT avec kaolin, RT/sk : Rangée très proche de l'électrode terre sans kaolin, RZIHT/ak : Rangée de la zone intermédiaire du côté HT avec kaolin, RZIT/sk : Rangée de la zone intermédiaire du côté T sans kaolin,  $V_d = 60$   $\mu$ l,  $\sigma_v = 50$   $\mu$ S/cm) ..... 62

**Fig. III. 31:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition  $2R_s/2R_k$  ( $C_k = C_k - C_0$ ,  $C_k = 40$  g/l) ..... 63

**Fig. III. 32:** Principales phases d'éjection des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition  $2R_s/2R_k$  ( $C_k = C_k - C_0$ ,  $C_k = 120$  g/l) ..... 63

**Chapitre I:** Isolations superhydrophobes et les travaux antérieurs sur leur performance électrique sous tension alternative

<b>Tab. I.1:</b> Matériaux végétaux à différents degrés d'hydrophobie.....	6
<b>Tab. I.2:</b> Matériaux insectes et animaux à différents degrés d'hydrophobie .....	7
<b>Tab. I.3:</b> Matériaux artificiels à différents degrés d'hydrophobie.....	8

**Chapitre II:** Pollution et contournement électrique sous tension alternative

<b>Tab. II. 1:</b> Tableau récapitulatif des principales sources de pollution et leurs classifications.....	32
<b>Tab. II. 2:</b> Description des différents sites pollués selon les classes de pollution et le degré de sévérité équivalente du milieu.....	33
<b>Tab. II. 3:</b> Niveau de pollution en fonction de la sévérité équivalente.....	35

**Chapitre III:** Résultats expérimentaux sur la performance des surfaces superhydrophobes sous tension alternative

<b>Tab. III. 1:</b> Tension de contournement à sec de l'isolation superhydrophobe.....	51
--	----

<b>A</b>	La surface lavée de la barrière [cm <sup>2</sup> ]
<b>C<sub>o</sub></b>	Capacité haute tension[μF]
<b>C<sub>u</sub></b>	Capacité basse tension[μF]
<b>C<sub>k</sub></b>	Concentration massique du kaolin [g/l]
<b>C<sub>0</sub></b>	Concentration sans kaolin [g/l]
<b>C</b>	Conductivité électrique de la goutte [mS/cm]
<b>DDNS</b>	La densité de dépôt non soluble [mg/cm <sup>2</sup> ]
<b>DDSE</b>	Densité du dépôt de sel équivalent [mg/cm <sup>2</sup> ]
<b>e<sub>e</sub></b>	Epaisseur de l'électrode à pont [mm]
<b>E<sub>p</sub></b>	Champ électrique propre [V/m]
<b>E<sub>e</sub></b>	Champ électrique extérieur [V/m]
<b>G</b>	Conductance superficielle [S]
<b>I<sub>f</sub></b>	Courant de fuite superficiel [A]
<b>L<sub>c</sub></b>	Longueur de la ligne de fuite de l'isolation [cm]
<b>L<sub>dv</sub></b>	Distance entre une goutte d'eau et l'électrode haute tension [cm]
<b>L<sub>dg</sub></b>	Distance entre une goutte d'eau et l'électrode terre [cm]
<b>L<sub>dd</sub></b>	Distance entre deux gouttes d'eau adjacentes [cm]
<b>l<sub>rr</sub></b>	Largeur entre deux rangées successives [cm]
<b>L<sub>e</sub></b>	Longueur de l'électrode à pont [cm]
<b>I</b>	Courant [A]
<b>l<sub>e</sub></b>	Largeur de l'électrode à pont [cm]
<b>m<sub>i</sub></b>	La masse initiale du papier filtre [mg]
<b>m<sub>f</sub></b>	La masse du papier filtre contenant la pollution après séchage [mg]
<b>R</b>	Résistance du dépôt humidité en série avec l'arc [Ω]
<b>R<sub>v</sub></b>	Résistance transversale [Ω]
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance superficielle [Ω]
<b>R<sub>i</sub></b>	Résistance d'isolement [Ω]
<b>S</b>	Surface nettoyée [m <sup>2</sup> ]
<b>Sa</b>	Salinité [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>U<sub>eAC</sub></b>	Tension efficace à courant alternatif [kV]
<b>U<sub>c</sub></b>	Tension de contournement
<b>V</b>	Volume de la suspension [m <sup>3</sup> ]
<b>V<sub>d</sub></b>	Volume droplet (gouttes) [μl]

---

$\alpha$	Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de la surface [°]
$\sigma_s$	Conductivité superficielle [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
$\sigma_{se}$	Conductivité superficielle équivalente [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
$\sigma_v$	Conductivité volumique de la solution polluante [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
$\sigma_\theta$	Conductivité volumique à la température de $\theta$ °C [S/m]
$\varphi_s$	Fraction du solide
$\gamma$	Tension de surface du liquide [V/m]
$\gamma_{sl}$	Tension de surface solide-liquide [V/m]
$\gamma_{sv}$	Tension de surface solide-vapeur [V/m]
$\theta$	Angle de contact [°]
$\theta^*$	Angle apparent [°]
$\theta_a$	Angle d'avancée [°]
$\theta_r$	Angle de reculée [°]
$\Delta C_k$	Différence de concentration en kaolin [g/l]

<b>AC</b>	Tension alternative
<b>b</b>	Facteur dépendant de la température $\theta$ °C
<b>ak</b>	Avec kaolin
<b>Cam</b>	Caméscope
<b>CEI</b>	Commission Electrotechnique international
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de carbone
<b>CH<sub>4</sub></b>	Méthane
<b>DDSE</b>	Densité du dépôt de sel équivalent
<b>DDNS</b>	Densité de dépôt non soluble
<b>f</b>	Facteur de forme
<b>FC</b>	Fortement conductrice
<b>fC</b>	Faiblement conductrice
<b>HAC</b>	L'hystérésis de l'angle de contact
<b>HT</b>	Haute tension
<b>IEC TC</b>	Commission Electrotechnique international, comités technique
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dioxyde d'azote
<b>N<sub>2</sub>O</b>	Protoxyde d'azote
<b>NaCl</b>	Chlorure de sodium
<b>Ng</b>	Nombre de goutte
<b>N<sub>r</sub></b>	Nombre de rangées déposées à partir de l'électrode HT/T
<b>N<sub>d</sub></b>	Rang des gouttes recouvrant la surface de l'isolation
<b>n<sub>gP</sub></b>	Nombre total des gouttes d'eau petite
<b>n<sub>gG</sub></b>	Nombre total des gouttes d'eau grande
<b>n<sub>VdP</sub></b>	Produit du nombre et du volume de petites gouttes
<b>n<sub>VdG</sub></b>	Produit du nombre et du volume de grande gouttes
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozone
<b>PC</b>	Personal computer
<b>PDMS</b>	Diméthicone, polymère organominéral de la famille des siloxanes.
<b>R<sub>C</sub></b>	Rapport des concentrations
<b>R<sub>V</sub></b>	Rapport des volumes
<b>R<sub>nV</sub></b>	Produit du nombre et du volume des gouttes
<b>R<sub>s</sub></b>	Rangée de gouttes d'eau sans kaolin
<b>R<sub>k</sub></b>	Rangée de gouttes d'eau avec kaolin

<b>R<sub>G</sub></b>	Rapport des conductivités électrique
<b>RT</b>	Rangée terre
<b>RHT</b>	Rangée haut tension
<b>RIT</b>	Rangée intermédiaire terre
<b>RIHT</b>	Rangée intermédiaire haute tension
<b>RT</b>	Rangée très proche de l'électrode terre
<b>RHT</b>	Rangée très proche de l'électrode HT
<b>RIT</b>	Rangée intermédiaire du côté terre
<b>RIHT</b>	Rangée intermédiaire côté HT
<b>RHT/FC</b>	Rangée très proche de l'électrode HT à forte conductivité
<b>RT/FC</b>	Rangée très proche de l'électrode terre à faible conductivité
<b>RZIHT/FC</b>	Rangée de la zone intermédiaire du côté HT à forte conductivité
<b>RZIT/FC</b>	Rangée de la zone intermédiaire du côté T à faible conductivité
<b>RHT/ak</b>	Rangée très proche de l'électrode HT avec kaolin
<b>RT/sk</b>	Rangée très proche de l'électrode terre sans kaolin
<b>RZIHT/ak</b>	Rangée de la zone intermédiaire du côté HT avec kaolin
<b>RZIT/sk</b>	Rangée de la zone intermédiaire du côté T sans kaolin
<b>r</b>	Rugosité
<b>sk</b>	Sans kaolin
<b>SSH</b>	Surface superhydrophobe
<b>SPP</b>	Surface plante parasite
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silice
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dioxyde de soufre
<b>T</b>	Terre
<b>Tr</b>	Transformateur
<b>UC</b>	Appareil de commande de la tension
<b>VCA</b>	Variable console automation (logiciel)
<b>V<sub>P</sub></b>	Petit volume
<b>V<sub>G</sub></b>	Grand volume
<b>V<sub>cr</sub></b>	Voltmètre de crête
<b>WG</b>	World Geodetic System
<b>X<sub>c</sub></b>	Longueur critique d'arc

<b>ZI</b>	Zone intermédiaire
<b><math>\sigma</math></b>	Conductivité superficielle
<b><math>\sigma_f</math></b>	Conductivité faible
<b><math>\sigma_F</math></b>	Conductivité forte
<b><math>\sigma_{r20}</math></b>	Conductivité correspondante à 20°C
<b><math>\sigma_{rT}</math></b>	Conductivité de la couche de pollution à la température
<b><math>\alpha</math></b>	Facteur de correction
<b><math>\theta</math></b>	Température de la suspension
<b><math>\epsilon_r</math></b>	Permittivité relative

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I: Isolation superhydrophobes et les travaux antérieurs sur leur performance électrique sous tension alternative</b>	
I. 1 Introduction.....	3
I. 2 Définition et signification.....	3
I. 2. 1 Surface Hydrophile .....	3
I. 2. 2 Surface Hydrophobe .....	3
I. 2. 3 Surface superhydrophobe .....	4
I. 2. 4 Tension de surface .....	4
I. 2. 5 Mouillage .....	5
I. 3 Types des matériaux superhydrophobes .....	6
I. 3. 1 Types naturels .....	6
I. 3. 2 Types artificiels .....	7
I. 4 Techniques de préparation de surface .....	8
I. 4. 1 Dépôt par bain chimique .....	8
I. 4. 2 Dépôt par vapeur chimique .....	9
I. 4. 3 Dépôt électrochimique .....	9
I. 4. 4 Gravure chimique .....	9
I. 4. 5 Photolithographie .....	9
I. 4. 6 Techniques utilisant le plasma .....	10
I. 5 Propriétés électriques et spécifiques et les paramètres de leur influence.....	10
I. 5. 1 Propriétés électriques .....	10
I. 5. 1. 1 Permittivité .....	10
I. 5. 1. 2 Rigidité diélectrique.....	11
I. 5. 1. 2. 1 Rigidité diélectrique transversale.....	11
I. 5. 1. 2. 2 Rigidité diélectrique longitudinale.....	11
I. 5. 1. 3 Résistance .....	11
I. 5. 1. 4 Facteur de pertes .....	12
I. 5. 2 Propriétés spécifiques.....	12
I. 5. 2. 1 Angle de contact .....	12
I. 5. 2. 2 Modèles de surfaces superhydrophobes .....	12
I. 5. 2. 2. 1 Modèle de Wenzel .....	12

I. 5. 2. 2. 2 Modèle de Cassie-Baxter .....	13
I. 5. 2. 3 Hystérésis de l'angle de contact .....	13
I. 5. 2. 4 Adhésion .....	15
I. 6 Domaines d'applications des surfaces superhydrophobes .....	15
I. 6. 1 Dans la recherche scientifique.....	15
I. 6. 2 Chez les industriels.....	16
I. 6. 3 Limites.....	16
I. 7 Quelques travaux antérieurs très récents sur la performance électrique des isolations superhydrophobes .....	17
I. 8 Conclusion.....	27

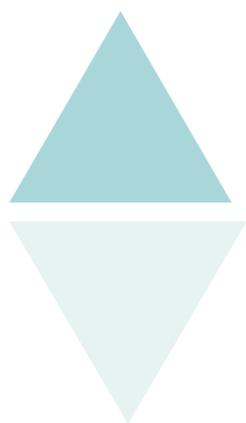
## **Chapitre II: Pollution et contournement électrique sous tension alternative**

II. 1 Introduction.....	29
II. 2 Pollution.....	29
II. 2. 1 Salinité .....	30
II. 2. 2 Degré de pollution .....	30
II. 2. 3 Couche de pollution .....	30
II. 2. 4 Différents types de polluants .....	31
II. 2. 4. 1 Polluants naturels .....	31
II. 2. 4. 2 Polluants dus aux activités humaines .....	31
II. 2. 5 Formation et répartition des couches polluantes.....	31
II. 2. 6 Sources de pollution.....	32
II. 2. 7 Classification et origine de la pollution .....	32
II. 3 Mesure de la sévérité de pollution d'un site .....	33
II. 4 Méthodes de mesure des caractéristiques électriques de pollution.....	33
II. 4. 1 Conductivité superficielle .....	33
II. 4. 1. 1 Conductivité superficielle électrique de la pollution.....	33
II. 4. 2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	33
II. 4. 3 Densité de dépôt non soluble (DDNS).....	36
II. 4. 4 Mesure de la pollution de l'air .....	36
II. 4. 5 Mesure optique.....	37
II. 5 Technique de lutte contre la pollution .....	37
II. 5. 1 Allongement de la ligne de fuite .....	37
II. 5. 2 Graissage des surfaces isolantes .....	37
II. 5. 3 Nettoyage de l'isolation .....	38

II. 5. 4 Utilisation des isolateurs plats .....	38
II. 5. 5 Revêtements à base de silicones .....	38
II. 6 Contournement.....	38
II. 6. 1 Tension de contournement.....	39
II. 6. 2 Tension de tenue .....	39
II. 6. 3 Courant de fuite.....	39
II. 6. 4 Courant de fuite critique .....	40
II. 6. 5 Longueur critique d'arc.....	40
II. 6. 6 Déroulement du contournement.....	40
II. 7 Conclusion .....	41

**Chapitre III** : Résultats expérimentaux sur la performance des surfaces superhydrophobes  
sous tension alternative

III. 1 Introduction .....	42
III. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure.....	42
III. 3 Résultats et leur interprétation.....	49
III. 3. 1 Mode d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation.....	49
III. 3. 2 Nombre de rangées de gouttes d'eau et leur localisation sur l'isolation .....	52
III. 3. 3 Non uniformité de répartition de la taille et du nombre de gouttes d'eau recouvrant l'isolation superhydrophobe.....	57
III. 3. 4 Non uniformité des conductivités électriques des deux zones de l'isolation.....	59
III. 3. 5 Non uniformité du degré de concentration en kaolin des gouttes d'eau des deux zones de l'isolation .....	61
III. 4 Conclusion .....	63
Conclusion générale.....	65



# **Introduction générale**



Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet, par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle d'un isolateur et le contournement peut alors survenir. Les conséquences de contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur en haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction du degré de contamination de l'environnement dans lequel il est placé.

A ce titre, plusieurs solutions sont possibles entre autres la nature du matériau isolant qui conférerait à ce dernier des meilleures performances isolantes. A titre d'exemple, nous citons les isolations hydrophiles. Ces dernières se mouillant facilement deviennent conductrices et entraînent le court-circuit de l'isolation. Ceci a incité les chercheurs à pousser leur investigation encore plus loin et découvrent les surfaces hydrophobes sur lesquelles l'humidité se dépose sous forme de gouttes d'eau discrètes mais restent collées à celles-ci. De telles surfaces présentent des zones sèches, par conséquent elles offrent une meilleure performance électrique comparativement aux surfaces hydrophiles. Dernièrement les résultats de recherche récents ont montré, que ces surfaces se dégradent rapidement dans les régions à très forte humidité et récurrente à cause des décharges électriques répétitives qui mènent au contournement de l'isolation et entraînent sa dégradation. Afin de contourner ce problème, il fallait coûte que coûte trouver un matériau artificiel qui ne se mouille pas du tout, les chercheurs se sont donc inspirés de certaines vertus de la nature et ont conçu et fabriqué des surfaces superhydrophobes. Celles-ci sont formées d'une couche en forme de coussins d'air sur les quels la goutte se pose et arrive à se mouvoir facilement même sur une surface horizontale sous l'action d'une force extérieure. Depuis, plusieurs domaines industriels ont été investis. Cependant l'emploi de telles surfaces dans le domaine de l'énergie n'a pas encore vu le jour à cause d'un manque de recherches et travaux publiés sur la performance électrique des isolations à surface superhydrophobe.

Suite à cette brève analyse, le but du présent travail consiste à mener des investigations sur une telle surface isolante afin d'évaluer sa performance électrique sous tension alternative et de déterminer le degré d'expulsion des gouttes d'eau en dehors de cette surface en fonction des paramètres suivants: nombre de gouttes, le mode de leur répartition, leur volume, leur

conductivité leur viscosité ainsi que le profil des électrodes délimitant l'isolation recouverte de ces perles d'eau.

Le travail présenté ici s'insère dans le cadre de l'étude de l'effet de la distribution de la taille des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension alternative.

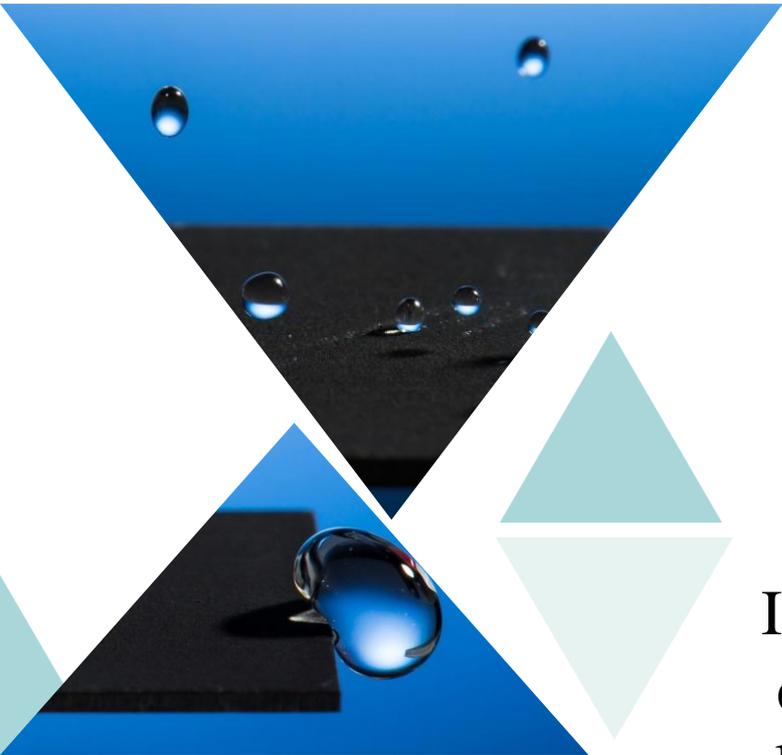
Ce manuscrit est composé de trois chapitres de grande importance.

Le premier chapitre, est dédié surtout à la caractérisation des surfaces superhydrophobes, leurs propriétés électriques et spécifiques ainsi que leurs divers types et leurs domaines d'application. Enfin l'état de l'art sur la performance électrique des isolations superhydrophobes sous tension alternative, sera aussi présenté dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre fera l'objet de la caractérisation de la pollution, ses conséquences néfastes sur les équipements électriques, les différentes techniques de sa mesure au laboratoire et sur site, sa simulation et la lutte contre celle-ci.

Les différentes techniques des grandeurs mesurées et le dispositif utilisé seront décrits dans le troisième chapitre. Les différents résultats obtenus y seront exposés et interprétés.

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale permettant de synthétiser les résultats obtenus.



# CHAPITRE 1

Isolations superhydrophobes  
et les travaux antérieurs sur  
leur performance électrique  
sous tension alternative

## I. 1 Introduction

L'état liquide se distingue par sa capacité à s'écouler sous l'effet d'une pente et à adopter la forme d'un récipient. Cette définition générale est satisfaisante dans bien des situations. Toutefois, lorsqu'une goutte de pluie tombe sur une vitre, il n'est pas rare de voir ce petit volume collé au verre, en dépit de l'inclinaison. Par ailleurs, une goutte d'eau posée sur une feuille de lotus adopte une forme sphérique au lieu de se conformer à son substrat. Une goutte millimétrique peut donc ne pas couler ou ne pas mouiller. Ces deux cas mettent en lumière des questions d'adhésion et de mouillage à petite échelle, ce que nous nous proposons de traiter dans cette partie. Ces situations surprenantes sont des manifestations d'une particularité essentielle des liquides: la tension de surface.

## I. 2 Définition et signification

La superhydrophobie est le parfait exemple. Le terme hydrophobie vient du grec « hydro » (eau) et « phobos » (effroi, peur); il signifie donc étymologiquement « qui a peur de l'eau ». Cependant la peur de l'eau est désignée par le terme issu du latin *aquaphobie*. En effet, l'hydrophobie a un sens bien différent: on dit d'une surface qu'elle est superhydrophobe lorsqu'elle ne peut pas être mouillée par l'eau ou par toute autre substance aqueuse, elle les repousse. Ce phénomène, bien qu'insolite, est relativement courant dans la nature puisqu'il existe un nombre incommensurable d'êtres vivants utilisant cette propriété pour vivre [1].

### I. 2. 1 Surface Hydrophile [2]

Un composé est dit hydrophile à partir du moment où ce composé possède une affinité pour l'eau et a tendance à s'y dissoudre. Un composé hydrophile est typiquement polaire ce qui lui permet de créer des liaisons hydrogène avec l'eau ou un solvant polaire et il renferme au moins un groupe fonctionnel qui contient un azote ou un oxygène (groupe amine ; hydroxyle, carbonyle)

### I. 2. 2 Surface Hydrophobe [2]

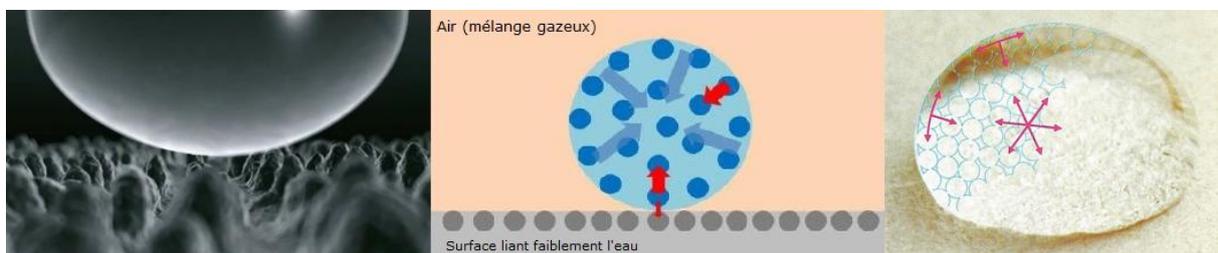
L'hydrophobie désigne le non solubilité dans l'eau. Un composé est dit hydrophobe quand il repousse l'eau ou en est repoussé. La molécule d'eau est polaire: Il existe un décalage entre le centre des charges positives et celui des charges négatives. Localement, il apparaît au voisinage de ces atomes des charges dites partielles. C'est la différence d'électronégativité entre les atomes d'oxygène et ceux d'hydrogène qui est à l'origine de cette propriété.

### I. 2. 3 Surface superhydrophobe [1]

La superhydrophobie réalise « à froid » et de façon permanente un état qui se rapproche d'un angle de contact de  $180^\circ$ . On dit qu'une surface est superhydrophobe si et seulement si une goutte d'eau reposant sur cette surface atteint un angle de contact d'au moins  $120^\circ$ . Pour cela une surface doit posséder deux caractéristiques: premièrement son matériau de surface est apolaire, dans un second temps sa texture de surface réalise le modèle Cassie.

### I. 2. 4 Tension de surface [3]

Dans les liquides, les différentes molécules sont maintenues groupées sous l'action de forces intermoléculaires faibles. Les molécules qui se trouvent à la surface du liquide peuvent simultanément entrer en liaisons intermoléculaires avec des molécules d'une autre nature provenant de l'environnement ou avec des molécules de même nature provenant du liquide. Les différentes molécules tendent à rejoindre l'état énergétiquement le plus favorable. En d'autres termes, elles recherchent la liaison la plus forte possible avec d'autres molécules. Si les plus puissants partenaires possibles de la liaison sont des atomes de même nature issus du liquide, ceci conduit dans le liquide à une tension orientée vers l'intérieur, la tension de surface (Fig. I. 1)



**Fig. I. 1:** Illustration de la tension de surface

Pour des motifs énergétiques, les atomes veulent être les plus nombreux possibles à se trouver à l'intérieur du liquide. La surface doit être la plus petite possible (minimisation de la surface). La forme de la plus petite surface est une sphère. Pour cette raison, les liquides présentant une tension superficielle élevée forment des gouttes. En outre, plus les liaisons intermoléculaires avec les molécules de l'environnement sont faibles et plus la forme de goutte est accusée. Le fait que des liquides perlent (forment des gouttes) sur certaines surfaces est donc la conséquence de liaisons intermoléculaires très faibles entre les molécules de liquide et celles de la surface, si l'on observe une goutte de pluie lors de sa chute, sa forme est le plus souvent sphérique (Fig. I. 2), à cause des interactions attractives intermoléculaires qui ont pour effet

de minimiser la surface entre le liquide et l'air qui l'entoure. Ces interactions permettent de définir la tension de surface.

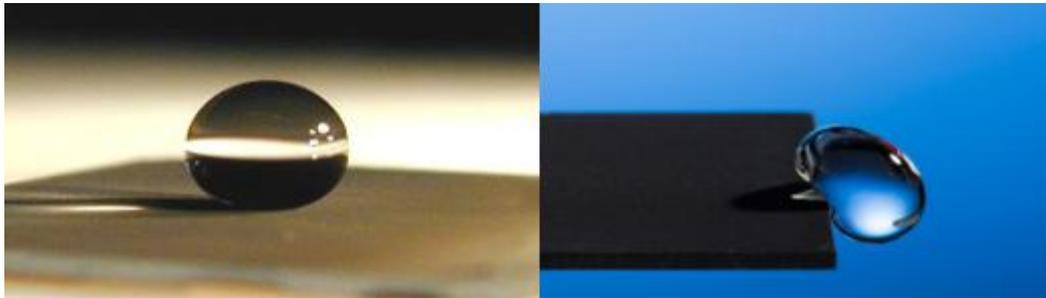


Fig. I. 2: Goutte de pluie sous l'effet de la tension de surface

### I. 2. 5 Mouillage

Lorsqu'une goutte d'eau rentre en contact avec un solide, des comportements différents se manifestent selon le substrat. Sur un verre très propre, le liquide s'étale complètement, au contraire, il reste rassemblé en goutte sur une surface plastique. Il est alors indispensable de ne plus considérer la seule tension de surface  $\gamma$  du liquide mais aussi les énergies de surface solide-liquide  $\gamma_{sl}$  et solide-vapeur  $\gamma_{sv}$ . L'angle de contact  $\theta$  est alors défini par la relation de Young-Dupré [4]:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma} \quad (\text{I.1})$$

Cette équation définit différents types de mouillage selon les valeurs des énergies interfaciales et donc de l'angle de contact (Fig. I. 3). Une goutte peut s'étaler et former un film ( $\theta = 0^\circ$ ), ou adopter la forme d'une capsule voire d'une quasi-sphère liquide ( $\theta \geq 140^\circ$ ). Cette dernière situation est comparable à la perle de pluie (Fig. I. 2), tout se passe comme si l'eau était entourée d'air. Ainsi, une goutte posée sur une feuille de lotus n'est au contact qu'avec le sommet des rugosités de la plante: elle repose principalement sur un coussin d'air [5].

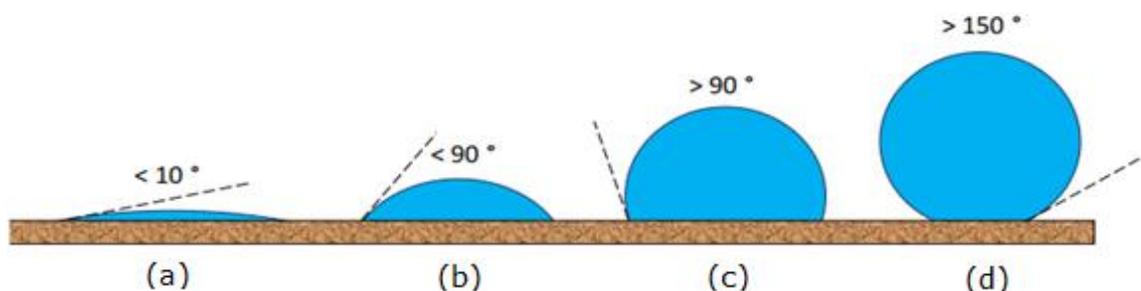


Fig. I. 3: Suivant l'angle de contact  $\theta$ , une goutte d'eau peut s'étaler totalement sur son solide ou conserver une forme sphérique (a: Mouillage total, b: hydrophile, c: hydrophobie, d: non-mouillage)

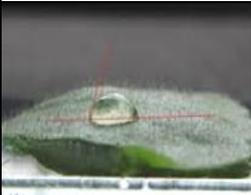
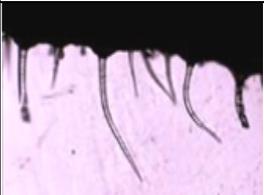
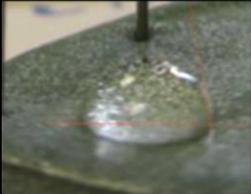
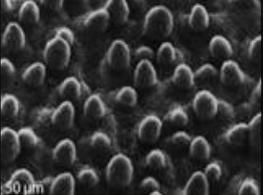
D'autres situations permettent de créer un film d'air ou de vapeur, qui isole le liquide de son substrat. Lorsqu'un liquide volatil est déposé sur une surface chaude, il peut ainsi léviter sur sa propre vapeur: c'est la caléfaction, ou effet Leidenfrost [6]. La goutte est alors dans un état strictement non-mouillant, où l'angle  $\theta$  vaut  $180^\circ$ .

### I. 3 Types de matériaux superhydrophobes

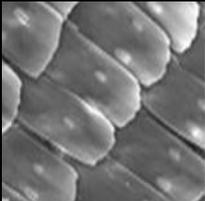
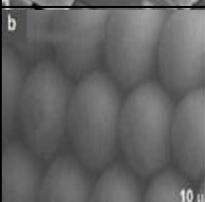
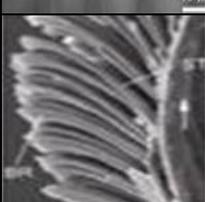
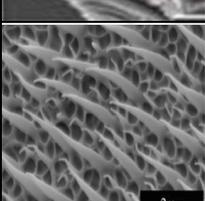
#### I. 3. 1 Types naturels

La nature est une source inépuisable de merveilles et d'ingéniosité. Il existe par exemple de nombreux êtres vivants qui réagissent de façon particulière à l'eau, ils ne peuvent pas être mouillés. Leurs intérêts sont bien réels et cette propriété est due à leur surface externe. Ces êtres vivants aux caractéristiques extraordinaires témoignent ainsi de la superhydrophobie dans la nature [1].

Dans le tableau suivant sont résumés quelques types de matériaux naturels.

Matériaux végétaux	Photos	Angle de contact	Echelle macroscopique	Photos de microscope
Feuille Géranium		$41^\circ$	Trichomes très espacés couleur terne	
Feuille grasse, crassula		$79^\circ$	Pas de trichome pellicule de la cire (probablement)	
Feuille lotus		Feuille superhydrophobe $160^\circ$	Nombreux trichomes coniques	
Salvinia géante		Superhydrophobe $170^\circ$	Nombreux trichomes	

Tab. I. 1: Matériaux végétaux à différents degrés d'hydrophobie

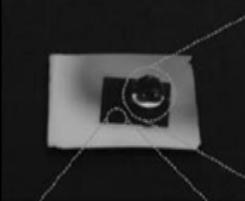
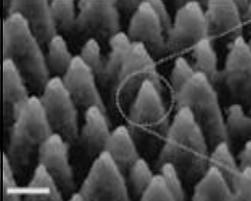
Matériaux insectes et animaux	Photos	Angle de contact	Echelle macroscopique	Photos de microscope
Les pattes de gerris		Superhydrophobe 175 °	Multiples trichomes en forme d'arborescence	
Aile de papillon		Superhydrophobe 161°	Multiples trichomes en forme d'arborescences	
La Lucilie		Superhydrophobe 167.6° ± 4.4°	Nombreux trichomes sphériques	
Les pattes de gecko		Superhydrophobe >150°	Multiples trichomes en forme d'arborescences	
Canards		Superhydrophobe 160°	Multiples trichomes en forme d'arborescences	

Tab. I. 2: Matériaux insectes et animaux à différents degrés d'hydrophobie

### I. 3. 2 Types artificiels

Aujourd'hui, il est aisé de créer une surface superhydrophobe en s'inspirant de la nature. En effet, le phénomène de la superhydrophobie donne naissance à des applications variées. Produire des surfaces superhydrophobes à partir de surfaces hydrophobes est devenue possible. Ainsi on pourrait créer des matériaux superhydrophobes comme des vitrages, du béton ou encore des tissus superhydrophobes. L'effet lotus pourrait aider à rendre plus commode la vie quotidienne grâce à la superhydrophobie en ne laissant pas les saletés et les liquides se répandre à la surface des matériaux [7-13].

Dans le tableau I. 3 sont donnés quelques types de matériaux artificiels.

Matériaux artificiels	Photos	Angle de contact	Echelle macroscopique	Photos de microscope
Tissu nano- tex		Superhydrophobe 150 °	Trichomes en forme de protubérances et des poils	
ZnNi + NaOH		Superhydrophobe 164 °	Trichomes en forme de protubérances et des poils	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> et H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		Superhydrophobe 161 °	Multiples trichomes à extrémités arborescentes	
Silicium + nanostructure SF <sub>6</sub>		Superhydrophobe 154 °	Multiples trichomes coniques	

Tab. I. 3: Matériaux artificiels à différents degrés d'hydrophobie

#### I. 4 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes

Généralement, pour obtenir une surface superhydrophobe, il suffit d'être hydrophobe, avec une basse énergie de surface, mais surtout rugueux, dans les échelles micrométriques et nanométriques, en favorisant l'emprisonnement d'air dans la topographie. Au courant des années 1990 et 2000, plusieurs techniques ont été proposées. Le procédé pour l'obtention de telles surface peut se faire en deux étapes: rendre un substrat rugueux dans le mode nano-micro et abaisser l'énergie de surface [14]. Toutefois, il est possible d'obtenir des rugosités tout en abaissant l'énergie de surface en une seule étape « Onestepprocess » [15]. Les techniques les plus communes sont décrites dans cette section, comme par exemple le dépôt par bain chimique, le dépôt électrochimique ou encore les revêtements au plasma.

##### I. 4. 1 Dépôt par bain chimique

Le dépôt par bain chimique [15] est une des méthodes les plus simples pour l'application de couches minces et de nanomatériaux, des matériaux ayant des caractéristiques

particulières à cause de leur taille nanométrique. Cette technique permet de faire de grandes quantités de substrats ou encore de travailler en continu. L'avantage majeur de cette technique c'est qu'elle ne requiert pas d'équipement dispendieux, seulement un contenant, une solution de déposition et un substrat. Lorsque le substrat est mis en contact avec la solution, il y a une réaction ou une décomposition survenant près de la surface formant des dépôts de topographie distincte.

#### **I. 4. 2 Dépôt par vapeur chimique**

Le dépôt par vapeur chimique [16] est une technique d'application de film solide de haute pureté et de haute performance. L'équipement utilisé est coûteux, demandant une chambre contrôlée (pression et température) réduisant la grosseur possible du substrat. Dans ce procédé, un substrat est exposé à des vapeurs chimiques pouvant réagir ou se décomposer à la surface, produisant le dépôt désiré.

#### **I. 4. 3 Dépôt électrochimique**

Le dépôt électrochimique (électrodéposition) [17] est une technique d'application de couche mince sur des métaux. Cette technique est rapide, peu coûteuse et permet des procédés à des températures normales. Le procédé consiste à placer deux substrats dans un liquide (produit chimique basique ou acide). L'un est la cathode, l'autre est l'anode. En utilisant du courant continu de différent voltage, certains composés sont déposés sur les surfaces. Il est possible de varier la grosseur et la quantité de composés à la surface. La nature du composé déposé et sa géométrie varient selon si la pièce est anode ou cathode.

#### **I. 4. 4 Gravure chimique**

La gravure chimique [18] est un procédé qui consiste à enlever des couches microscopiques de métaux à l'aide d'une base ou d'un acide. Le procédé utilisé est simple: le substrat de métal est déposé dans la solution qui attaque la surface. Cette technique est peu coûteuse et permet de varier plusieurs paramètres comme le temps d'attaque, la concentration de l'acide ou la température du procédé par exemple, permettant ainsi de modifier la géométrie et la nature des surfaces.

#### **I. 4. 5 Photolithographie**

Le procédé de photolithographie [19] est un procédé très utilisé en électronique pour l'application de couche mince sur une surface. Le procédé est simple au début, mais devient

complexe à la longue. Comme première étape il faut enduire la surface d'un film mince de polymère ou de photo résine laquelle est radiée par un faisceau lumineux de haute précision donnant la topographie requise. L'équipement s'avère coûteux, toutefois il permet d'obtenir des topographies continues.

#### **I. 4. 6 Techniques utilisant le plasma**

Le plasma [20] est beaucoup utilisé en nano-fabrication des surfaces. Il peut être utilisé comme technique d'arrachement de matière ou technique de déposition. Pour la gravure des substrats, la surface est attaquée par des ions arrachant ainsi certaines parties. Pour la déposition, les ions déposent sur la surface des ions pris dans un bain de vapeurs chimiques.

### **I. 5 Propriétés électriques et spécifiques et les paramètres de leur influence**

#### **I. 5. 1 Propriétés électriques [21]**

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

##### **I. 5. 1. 1 Permittivité**

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre ( $E_p$ ) à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique ( $E_e$ ) extérieur appliqué. Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ . La permittivité d'un matériau apolaire demeure presque constante dans un domaine de température et de fréquence bien déterminé ainsi par un facteur de dissipation diélectrique faible. La permittivité d'un matériau polaire varie en fonction de la température et de la fréquence, il est caractérisé par un facteur de dissipation maximale. L'humidité accroît dans de grandes proportions la permittivité et le facteur de dissipation. Les pertes diélectriques augmentent avec l'intensité du champ électrique appliqué, surtout à partir du moment où le seuil d'ionisation est dépassé et où les décharges intenses commencent à se produire dans les vides de l'isolant.

### **I. 5. 1. 2 Rigidité diélectrique**

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

#### **I. 5. 1. 2. 1 Rigidité diélectrique transversale**

Lorsque le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau.

#### **I. 5. 1. 2. 2 Rigidité diélectrique longitudinale**

Elle est obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface du matériau, elle dépend peu de la nature de l'isolant, mais beaucoup plus de son état de sécheresse et de propreté. Lorsque la température croît, la rigidité diélectrique est soit constante, soit légèrement décroissante. Puis à partir d'une certaine température limite appelée température de transition, une décroissance très rapide est amorcée. L'influence de la température sur la rigidité diélectrique pratique est un peu analogue à celle observée dans le cas de la rigidité diélectrique intrinsèque sauf que la température de transition dépend des conditions d'expérimentation. La grandeur intéressante de l'isolation testée dans le cadre de la présente étude se rapporte beaucoup plus à la rigidité diélectrique longitudinale.

### **I. 5. 1. 3 Résistance**

Trois types de résistances électriques sont distingués:

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

Concernant cette propriété, le matériau testé lors de cette étude est caractérisé par sa résistance superficielle. Elle correspond à celle qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le

dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

- La résistivité d'un matériau isolant en fonction du champ électrique est constante pour des valeurs inférieures ou égales à une certaine limite constituant la zone de linéarité. Au-delà de cette limite la résistivité superficielle est variable;
- La résistivité des matériaux isolants décroît en fonction de la température;
- L'influence de l'humidité sur la résistivité superficielle des matériaux isolants dépend de la teneur en eau à la saturation des matériaux considérés et de son état présent d'humidification.

#### **I. 5. 1. 4 Facteur de pertes**

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques.

### **I. 5. 2 Propriétés spécifiques**

#### **I. 5. 2. 1 Angle de contact**

L'angle de contact de l'eau sur la surface permet de déterminer si elle est hydrophile, hydrophobe ou bien superhydrophobe. L'appareil utilisé fonctionne avec le logiciel VCA version 1.71 [22]. Cet appareil est spécialement conçu pour mesurer l'angle de contact sur une surface plane. Des gouttes de 5  $\mu\text{l}$  ont été utilisées. Cinq valeurs aléatoires sur une même surface ont permis d'obtenir une valeur moyenne et une déviation.

#### **I. 5. 2. 2 Modèles de surfaces superhydrophobes**

D'après la littérature, il existe deux modèles permettant de décrire l'influence de la morphologie des surfaces texturées sur le mouillage. Par exemple, le modèle de Wenzel [23] considère une surface rugueuse imprégnée par le liquide et le modèle de Cassie-Baxter [24] modélise le mouillage d'un substrat rugueux lorsque le liquide n'envahit pas la rugosité.

##### **I. 5. 2. 2. 1 Modèle de Wenzel**

Dans le modèle du mouillage développé par Wenzel, la goutte est déposée sur une surface chimiquement homogène et rugueuse et le liquide formé envahit complètement les vides de la surface (Fig. I. 4a). Pour une telle surface, on note  $r$  la rugosité, rapport de la surface réelle du matériau sur sa surface apparente ( $r > 1$ ).

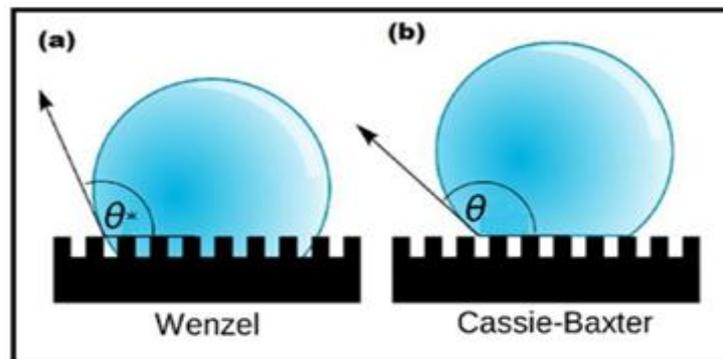
On en déduit que l'angle apparent  $\theta^*$  de la goutte s'écrit, en fonction de l'angle de Young  $\theta$  (Équation I. 2) [23].

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

### I. 5. 2. 2. 2 Modèle de Cassie-Baxter

Le modèle de Cassie-Baxter, dans sa forme générale, considère le mouillage statique d'une goutte liquide qui repose sur une surface lisse hétérogène (Figure I. 4b). Cette approche peut être appliquée aux cas des surfaces hydrophobes rugueuses non envahies par le liquide. Dans cet état, appelé état « fakir », le liquide repose sur un substrat composite formé par des sommets de la rugosité et par des poches de gaz piégé.

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



**Fig. I. 4:** Modèle de surfaces superhydrophobes (a: Modèle de Wenzel, b: Modèle de Cassie) [25]

L'équation I. 3 indique que la présence de gaz piégé permet à l'angle de contact apparent de se rapprocher de la valeur limite  $180^\circ$ , ce qui n'est pas réalisable en pratique, si la fraction du solide en contact  $\phi_s$  tend vers 0. En outre, ce modèle indique que la limite du mouillage nul ( $\theta = 180^\circ$ ) ne peut être atteinte, puisqu'il faudrait pour cela que le liquide repose sur une fraction solide nulle [26].

### I. 5. 2. 3 Hystérésis de l'angle de contact

Un angle de contact supérieur à  $150^\circ$  n'est pas le seul critère permettant de qualifier les surfaces superhydrophobes. Ces surfaces démontrent aussi une faible hystérésis de l'angle de contact (HAC) [27]. Ce dernier nous permet de comprendre le comportement d'une goutte d'eau vis-à-vis d'une surface en mouvement. C'est-à-dire de savoir si la goutte va s'accrocher ou glisser sur la surface. Pour cela, on mesure l'angle d'avancée et de reculée (Fig. I. 5). On note HAC la différence entre l'angle d'avancée ( $\theta_a$ ) et l'angle de reculée ( $\theta_r$ ) (Équation I. 4).

Plus l'hystérésis de l'angle de contact est grande, plus l'accrochage des gouttes est important. A l'opposé, plus il est petit, plus la goutte glisse facilement sur la surface.

L'importance de l'hystérésis de l'angle de contact est souvent attribuée aux surfaces chimiquement et morphologiquement hétérogènes et aussi à la présence d'une rugosité [28].

$$HAC = \theta_a - \theta_r \tag{I.4}$$

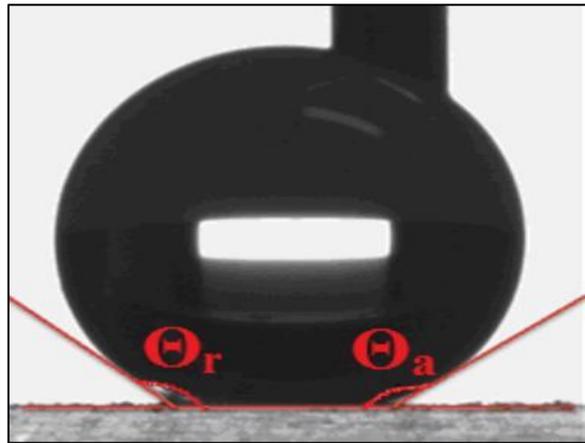


Fig. I. 5: Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact

Les surfaces superhydrophobes possèdent un large champ d'applications dans divers domaines. L'application la plus courante est celle des surfaces autonettoyantes [29]. Cette propriété permet l'élimination de poussières et autres saletés des surfaces (Fig. I. 6).

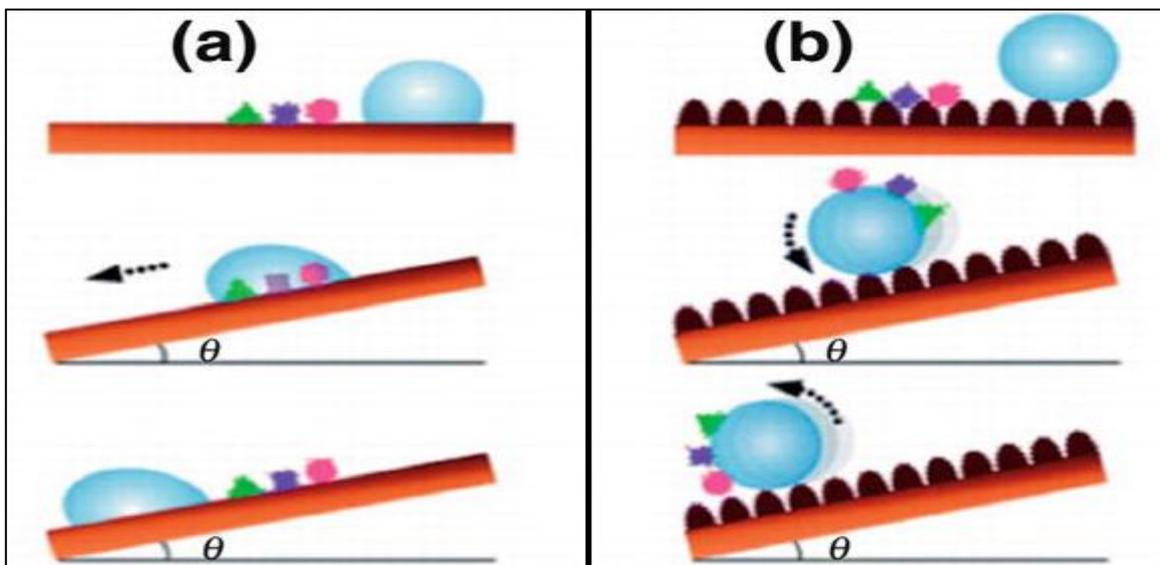


Fig. I. 6: Démonstration de la propriété autonettoyante (a: une surface lisse, l'eau n'enlève pas les contaminants, b: surface superhydrophobe et autonettoyante) [30]

Les surfaces superhydrophobes sont souvent utilisées dans le domaine biomédical [31], empêchant les contaminants de se propager sur les surfaces. De plus, ces surfaces peuvent servir comme des agents anticorrosifs [32]. Aussi, elles sont applicables afin de protéger différentes structures et équipements de la neige ou le givre qui y adhèrent [33].

#### **I. 5. 2. 4 Adhésion [34]**

Dans des cas plus banals, le liquide s'accroche sur le substrat qu'il mouille, telle une goutte de pluie retenue contre une vitre. Lors de la cuisson d'un aliment, le même problème se pose. Si un liquide alimentaire adhère à la surface, il est susceptible de se dégrader en température et de polluer la surface de cuisson. Depuis plusieurs dizaines d'années, des revêtements culinaires anti-adhérents ont été conçus pour éviter l'accrochage des aliments et favoriser le nettoyage des articles culinaires. Les surfaces les plus performantes reposent sur des surfaces téflon nées de chimie hydrophobe. En effet, le liquide, dans une conformation non-mouillante, minimise le contact avec son substrat.

#### **I. 6 Domaines d'application des surfaces superhydrophobes [35]**

Pour l'application de l'effet superhydrophobe, on peut très bien imaginer le potentiel de l'utilisation d'un tel phénomène pour les recherches scientifiques, mais aussi pour les industriels, ainsi que pour les consommateurs. Qu'il s'agisse de limiter la buée, le givre ou le dépôt de salissures, nombreuses sont les situations pratiques où l'on cherche à empêcher les gouttes d'adhérer à leur support.

##### **I. 6. 1 Dans la recherche scientifique**



**Fig. I. 7:** Goutte d'eau sur une feuille de *salvinia molesta*

Des chercheurs prévoient d'utiliser la *salvinia molesta* (Fig. I. 7), une algue hydrophobe, dans le domaine de l'aéronautique, en la collant sur les coques des bateaux, ce qui permettraient de réduire les frottements avec l'eau, et ainsi d'améliorer le glissement sur l'eau, et donc de réduire la consommation de carburant de 10 %. Cette découverte, liée au biomimétisme, s'inscrit dans le développement durable, et si elle est effective, pourrait se généraliser à tous les revêtements de bateaux.

### I. 6. 2 Chez les industriels

En outre, depuis 1 an sont commercialisées des peintures de façade autonettoyantes, le premier produit commercialisé étant la peinture lotus an. Plus de 50 000 façades de bâtiments ont été revêtues de cette peinture autonettoyante. En 2012, le fabricant a mis sur le marché une peinture utilisant une nouvelle technologie. Il s'agit d'une peinture hydrophobe qui imite la microstructure des feuilles de lotus une fois qu'on l'applique sur une surface.

Cette peinture rend le lavage des murs et des plafonds recouverts de cette dernière très facile, il suffit simplement d'asperger le mur d'eau, et la poussière et les résidus sont lavés. Ces murs et plafonds sont donc extrêmement faciles d'entretien.



Fig. I. 8: Façade autonettoyante

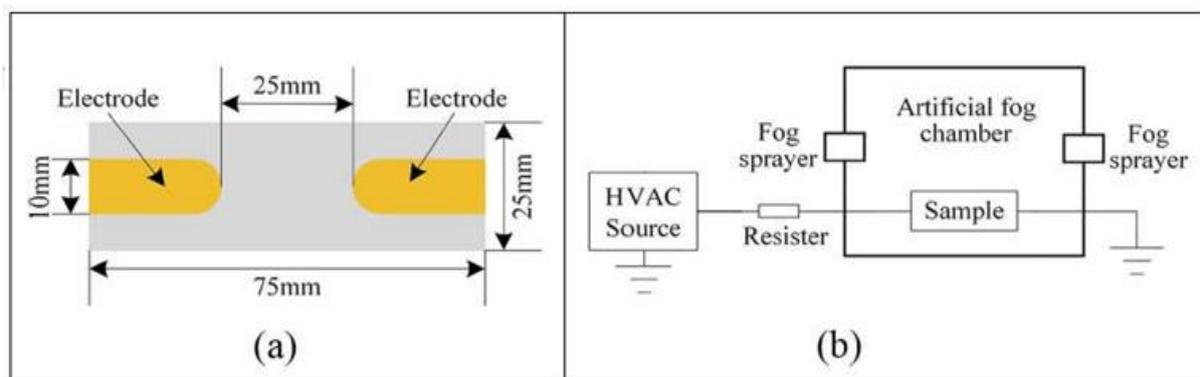
### I. 6. 3 Limites

L'effet superhydrophobe induit par les sprays et par la micro-lithogravure, sont seulement temporaires, ou vieillissent mal car les micro-structures, les « créneaux », les nanos-rugosités, peuvent en effet se remplir en présence des huiles présentes dans l'air,

comme la vapeur d'eau par exemple. Or les matériaux superhydrophobes sont par construction très difficile à nettoyer. De plus, on ne sait pas encore quelle forme donner aux matériaux ainsi qu'aux nanos- rugosités pour optimiser la superhydrophobie des matériaux, en fonction des propriétés recherchées.

### I. 7 Quelques travaux antérieurs très récents sur la performance électrique des isolations superhydrophobes

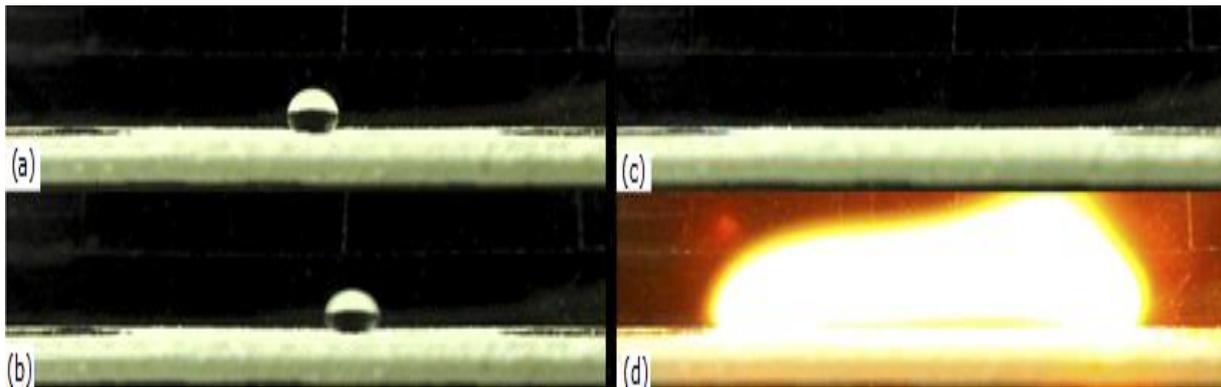
Y. Li et all [36] a étudié l'influence de la faible adhérence de la surface superhydrophobe sur ses caractéristiques de contournement dans des conditions humides. La première consiste en un dépôt d'une gouttelette d'eau de volume constant sur la surface en silicone délimitée par deux électrodes (Fig. I. 9a). La deuxième est que la surface en silicone est mouillée par un brouillard salin (Fig. I. 9b). Une comparaison des caractéristiques des surfaces hydrophobe et superhydrophobe a été faite.



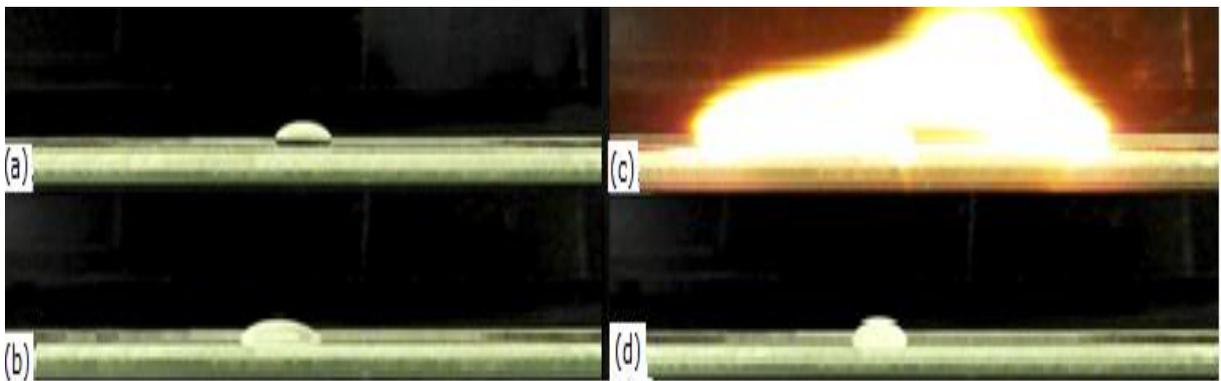
**Fig. I. 9:** Dispositif expérimental (a: Formes des échantillons, b: Configuration expérimentale)

Posée sur une surface superhydrophobe, une gouttelette d'eau reste sphérique et son angle de contact demeure supérieur par rapport à celui affiché sur une surface en silicone même après application de la tension. La goutte d'eau glisse sans s'allonger sur la surface superhydrophobie raison de la faible adhérence sur celle-ci (Fig. I. 10) Au moment du contournement de la surface superhydrophobe, la gouttelette d'eau n'est plus présente sur sa surface.

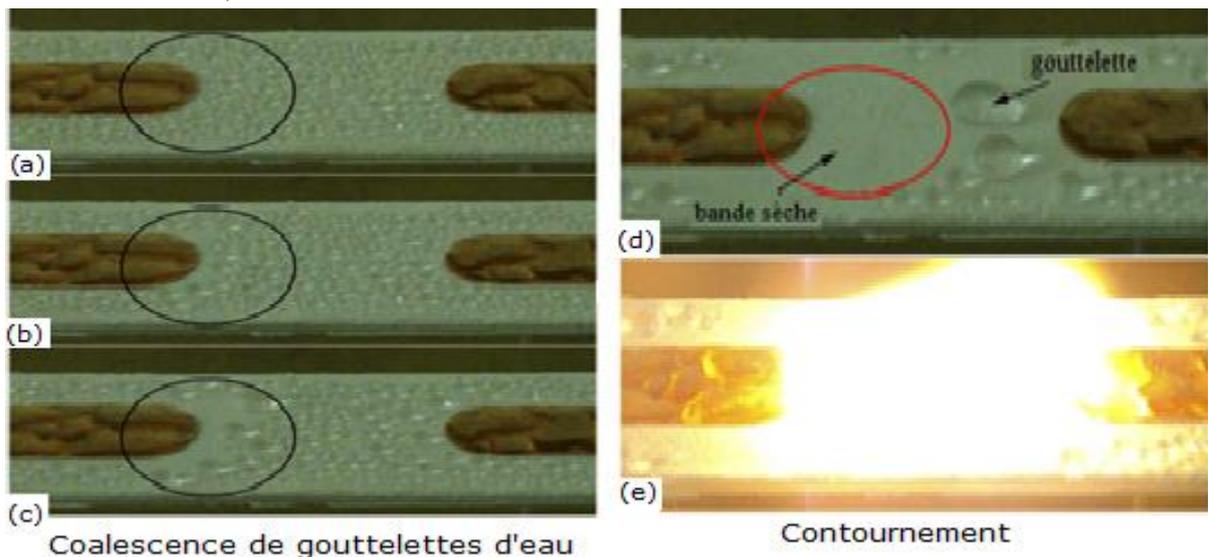
Par contre une goutte d'eau de même volume sur une surface hydrophobe voit sa forme hémisphérique en absence de tension. Au moment de l'application de la tension, celle-ci s'allonge vers les deux électrodes. Finalement, le contournement de la surface hydrophobe se produit. Après le contournement, la gouttelette reste encore sur la surface (Fig. I. 11).



**Fig. I. 10:** Processus de contournement de la surface en silicone superhydrophobe avec une gouttelette de 20 µl (a: Absence de tension, b: Glissement de la gouttelette, c: Juste avant le contournement, d: Contournement)



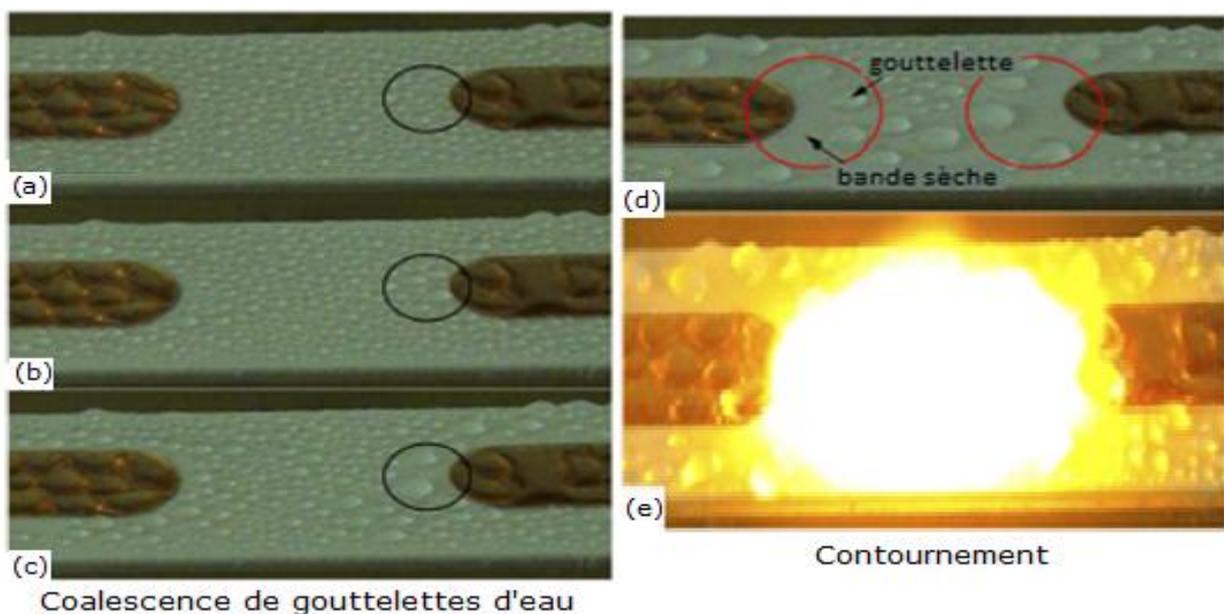
**Fig. I. 11:** Processus de contournement sur une surface en silicone avec une gouttelette de 20 µl (a: Aucune tension appliquée, b: Juste avant le contournement, c: Contournement, d: Après le contournement)



**Fig. I. 12:** 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)

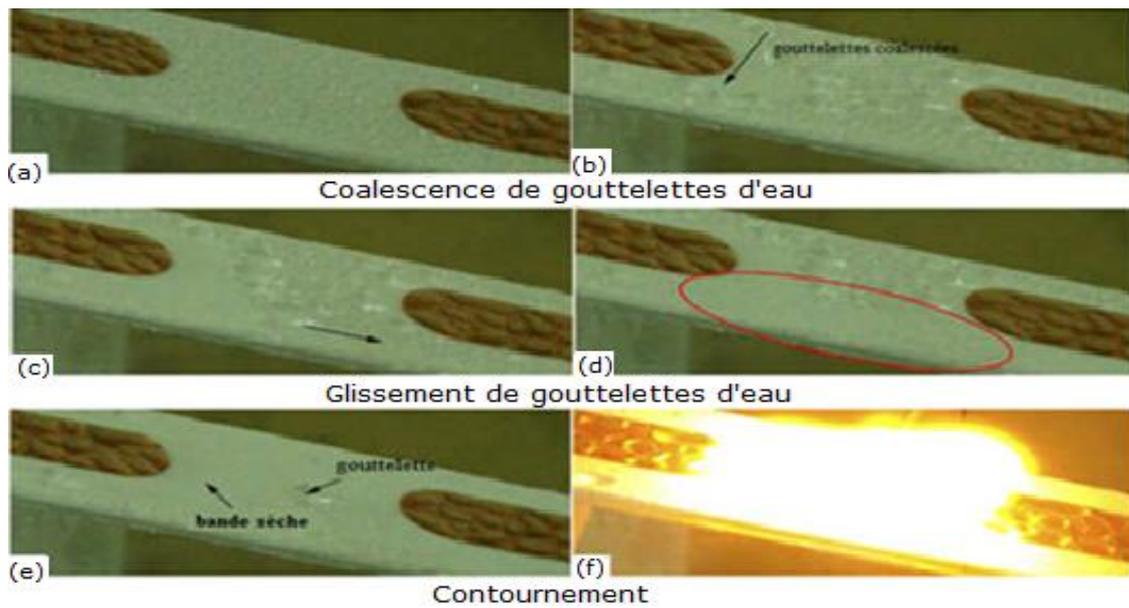
Sous un brouillard salin, les gouttelettes atterrissant sur la surface superhydrophobe en position horizontale, se coalescent et le contournement finit par se produire. En raison de la coalescence des gouttelettes, leur nombre diminue et leur volume augmente. Par conséquent, le nombre de zones sèches est plus élevé sur la surface superhydrophobe (Fig. I. 12).

Contrairement à la surface superhydrophobe, la surface hydrophobe en position horizontale, recouverte de gouttelettes d'eau, issues du brouillard salin, voit celles-ci se coalescer et donner naissance à de très grosses gouttes qui finissent par provoquer le contournement de la surface hydrophobe. En raison de la coalescence des gouttelettes d'eau, leur nombre diminue et leur volume s'accroît et par conséquent le nombre de zones sèches augmente, mais reste inférieur au cas d'une surface superhydrophobe (Fig. I. 13).



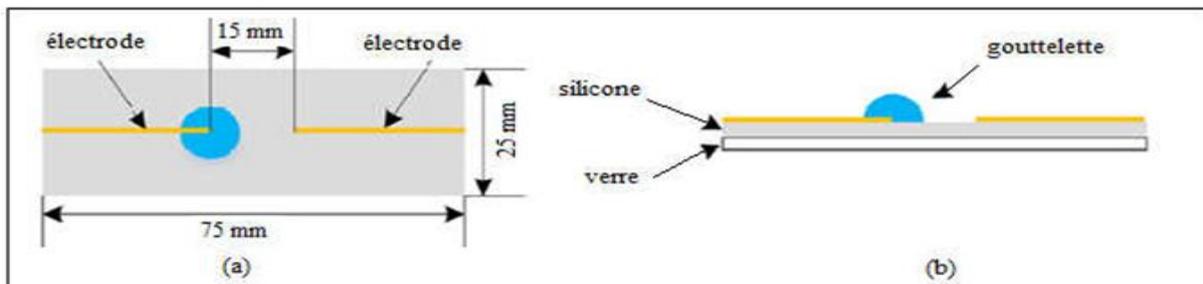
**Fig. I. 13:** Processus de contournement quand une surface de silicone commune a été placée horizontalement (a- c: Coalescence des gouttelettes d'eau avec la tension croissante, d: Phénomène juste avant le contournement, e: Contournement)

Le processus de contournement d'une surface superhydrophobe sous un angle d'inclinaison égal à  $20^\circ$  peut être décrit en trois parties : coalescence de gouttelettes d'eau, glissement des gouttelettes d'eau et contournement de la surface. Au début, des gouttelettes d'eau coalescent et forment de grosses gouttes d'eau. 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. De plus il a été remarqué la présence de peu de gouttelettes sur sa surface et la taille des bandes sèches est plus grande que dans d'autres cas de figures (Fig. I. 14).



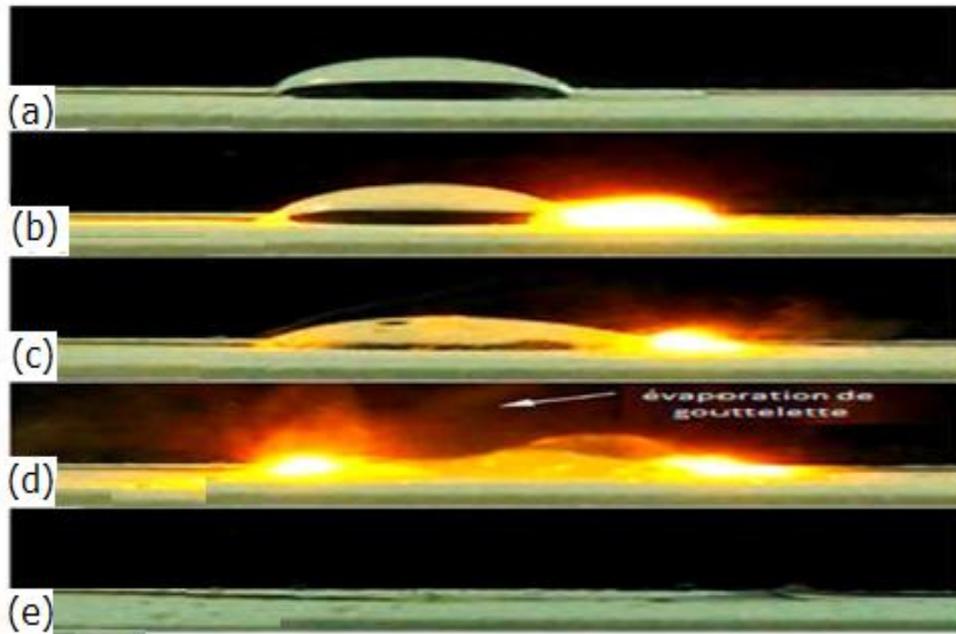
**Fig. I. 14:** Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20° (a-b: Coalescence des gouttelettes d'eau, c-d: Glissement des gouttelettes d'eau, e: Phénomène juste avant le contournement, f: Contournement).

Y. Li all [37] ont étudié l'influence de la superhydrophobe sur la dégradation d'une isolation en silicone sous tension alternative. A titre de comparaison, les auteurs ont étudié le degré de dégradation de la surface hydrophobe et superhydrophobe. La tension appliquée à leurs modèles expérimentaux (fig. I. 15a) est fournie par la station, illustrée par la figure I. 15b.



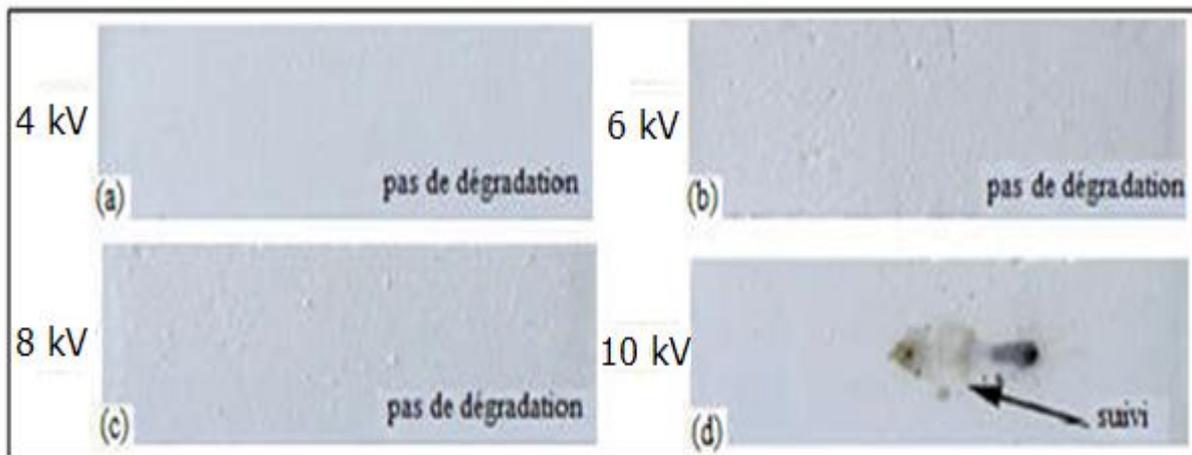
**Fig. I. 15:** Système d'électrodes (a: vue de dessus, b: vue de face)

Après application d'une tension alternative croissante à une surface superhydrophobe sur laquelle repose une goutte de 50  $\mu\text{l}$  en contact avec l'électrode pointue sous tension (Fig. I. 16a), une décharge électrique de contournement de la surface se produit à 3,4 kV pour une distance interélectrode de 15 mm et une décharge d'arc s'établit entre l'extrémité de la goutte et la pointe à la terre (Fig. I. 16b). La goutte s'allonge et l'arc se rétrécit en brûlant autour de l'électrode terre et un arc prend naissance au niveau de l'électrode haute tension (Figs. I. 16c et I. 16d). Ce processus accélère l'évaporation de la goutte d'eau à la fin de laquelle l'arc électrique s'éteint (Fig. I. 16e).

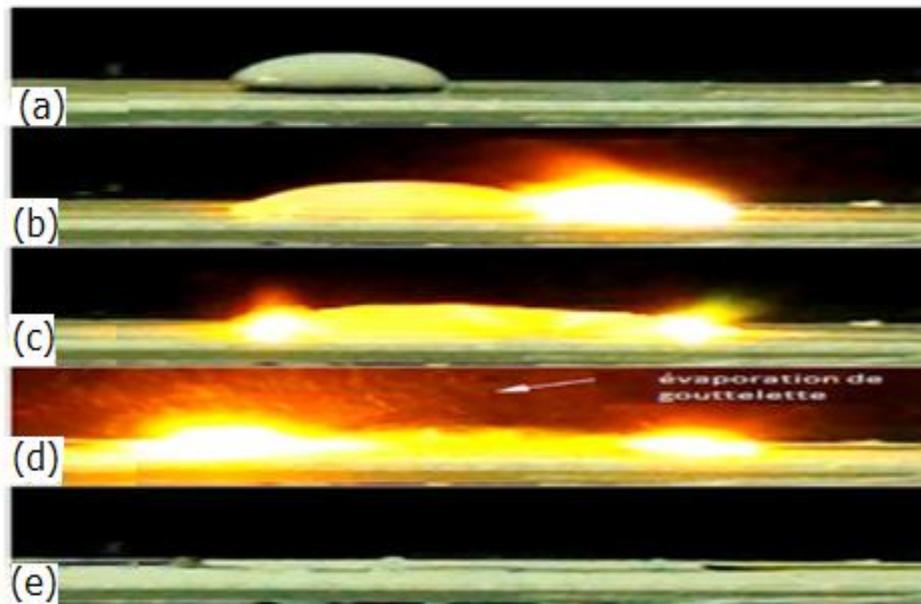


**Fig. I. 16:** Processus de la décharge durant le quatrième essai: (a: Absence de tension appliquée, b: décharge d'arc, c: formation d'un pont entre électrodes, d: Evaporation des gouttelettes, e: Extinction de la décharge)

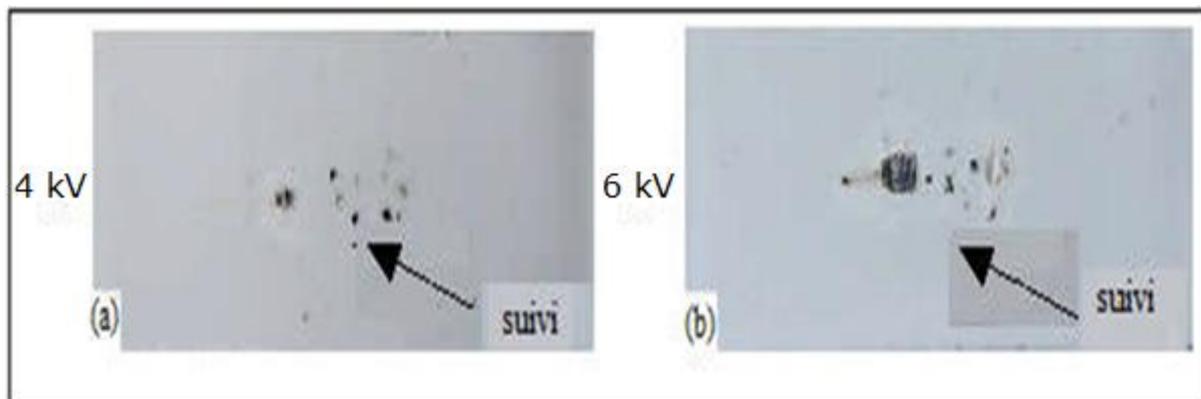
Pour des niveaux de tension inférieurs à 8 kV, aucune dégradation de l'isolation n'est constatée (Figs. I. 17a, 17b et 17c). Par contre à partir de la valeur de la tension de l'ordre de 10 kV, la surface superhydrophobe commence à se dégrader particulièrement au niveau des électrodes (Fig. I. 17d). Par comparaison à une surface superhydrophobe dans les mêmes conditions que précédemment, le phénomène de contournement de la surface hydrophobe est pratiquement similaire (Fig. I. 18), sauf que la dégradation de sa surface hydrophobe est plus accentuée (Fig. I. 19).



**Fig. I. 17:** Processus de dégradation de la surface superhydrophobe

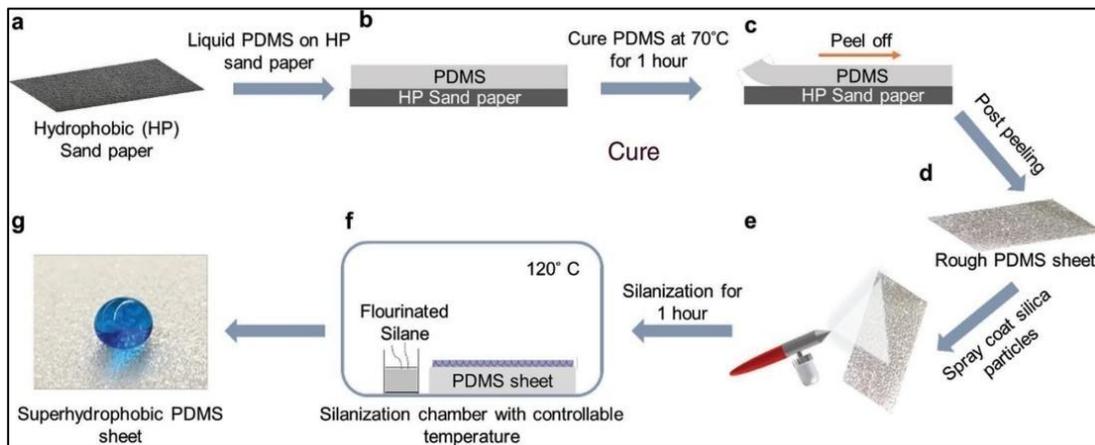


**Fig. I. 18:** Processus de décharge sur l'échantillon de silicone hydrophobe au bout du deuxième essai (a: Absence de tension, b: décharge d'arc à 4 kV, c: Formation d'un pont entre les électrodes, d: évaporation des gouttelettes, e: Extinction de la décharge)

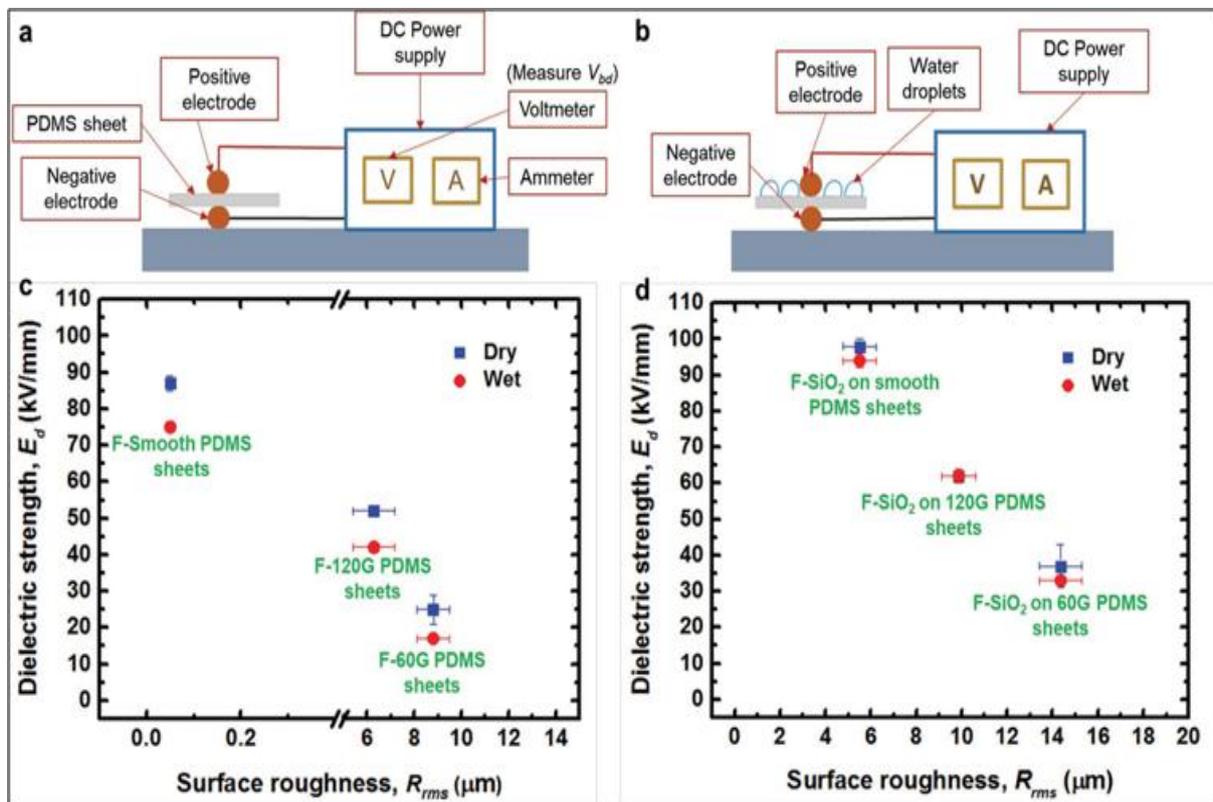


**Fig. I. 19:** Dégradation d'une surface hydrophobe

Sravanthi Vallabhuneni and all [38] ont étudié la performance électrique des isolations à revêtements superhydrophobes. Sachant que la rigidité diélectrique des isolateurs est affectée par l'humidité et la rugosité de la surface à cause d'un claquage accéléré, un revêtement superhydrophobe peut éviter l'accumulation d'eau et aider à la rétention de la rigidité diélectrique des isolateurs sous conditions humides. Ce n'est pas encore clair que la présence ou l'absence de cette texture peut permettre la rétention de la rigidité diélectrique des isolateurs. Dans ce travail au moyen d'expériences et d'analyses il a été conclu que le revêtement poreux superhydrophobe maintient la rigidité diélectrique de ces types d'isolateurs.



**Fig. I. 20:** Fabrication d'une surface superhydrophobe à l'aide d'une surface hydrophobe à base de papier-sable



**Fig. I. 21:** Rigidité diélectrique des matériaux hydrophobes et superhydrophobes en fonction de la rugosité de la surface (a: surface sans gouttes, b: surface avec gouttes, c: isolation hydrophobe, d: isolation superhydrophobe)

Après avoir fabriqué des feuilles de PDMS avec différentes rugosités de surface et mouillabilité (fig. I. 20) ils ont étudié leur influence sur la rigidité diélectrique à la fois sous conditions sèches et humides. Contrairement aux feuilles de PDMS hydrophobes, les feuilles de SPP superhydrophobes ne présentaient pas d'effet significatif sur les concentrations de baisse de la rigidité diélectrique dans des conditions humides par rapport à l'eau à des

conditions sèches. bien que la rigidité diélectrique des feuilles PDMS superhydrophobes ait diminué avec l'augmentation de la résistance diélectrique des feuilles PDMS (Fig. I. 21).

La figure I. 21 décrit la diminution de la rugosité globale de la surface celle-ci est due à l'augmentation de la rugosité de surface des feuilles PDMS sous-jacentes plutôt que la rugosité de surface de la couche poreuse de SiO<sub>2</sub>. Les revêtements superhydrophobes poreux sont plus fiable que les revêtements de surfaces rugueuses monolithiques superhydrophobes. Ceci permet de conserver la rigidité diélectrique de l'isolant, dans des conditions humides malgré la réduction de la rugosité de la surface.

R. Torchiati et F. Aggoune [39] ont étudié l'impact des gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une isolation superhydrophobe sous tension alternative 50 Hz. Afin de réaliser cette étude une centaine d'échantillons à surface superhydrophobe à base de silicone ont été fabriqués et l'angle de contact de gouttes d'eau sur cette surface est de l'ordre de 161°. Durant leur travail ils ont utilisé trois jeux d'électrodes de différente géométrie. Ces trois formes d'électrodes sont illustrées par la figure I. 22.

Le premier profil correspond à des électrodes parallélogrammiques pleines (Fig. I. 22a et I. 22b), le 2ème profil à des électrodes cylindriques à dents (Figs. I. 22c et I. 22d), le 3ème profil à des électrodes cylindriques à pont (Figs. I. 22e et I. 22f). À travers ces géométries, le meilleur profil empêchant la naissance des décharges électriques partielles et de contournement de la surface de l'isolation superhydrophobe, a été trouvé.

Concernant l'effet du nombre de rangées de gouttes d'eau disposées en lignes droites comprenant 4 gouttes chacune, leur résultats ont montré qu'il existe une limite du nombre de rangées au-delà de laquelle la tension d'évacuation des gouttes demeure constante et est de l'ordre de 32 % de la tension de contournement de l'isolation à sec sous électrodes pleines (fig. I. 23) il a été déduit que l'expulsion des gouttes de la surface de l'isolation s'effectuait selon un mode group-individuel et bidirectionnel.

Quant à l'effet du volume, les résultats résumés en figure. I. 24 montrent que la tension d'éjection des gouttes d'eau diminue avec celui-ci et à partir de la valeur du volume égale à 60 µl, celle-ci devient constante. Ils ont justifié cela par le fait que plus le volume augmente plus l'effet Cassie-Baxter est prépondérant, c'est-à-dire que la goutte d'eau de tel volume repose sur les sommets des aspérités et c'est plus facile à se faire évacuer.

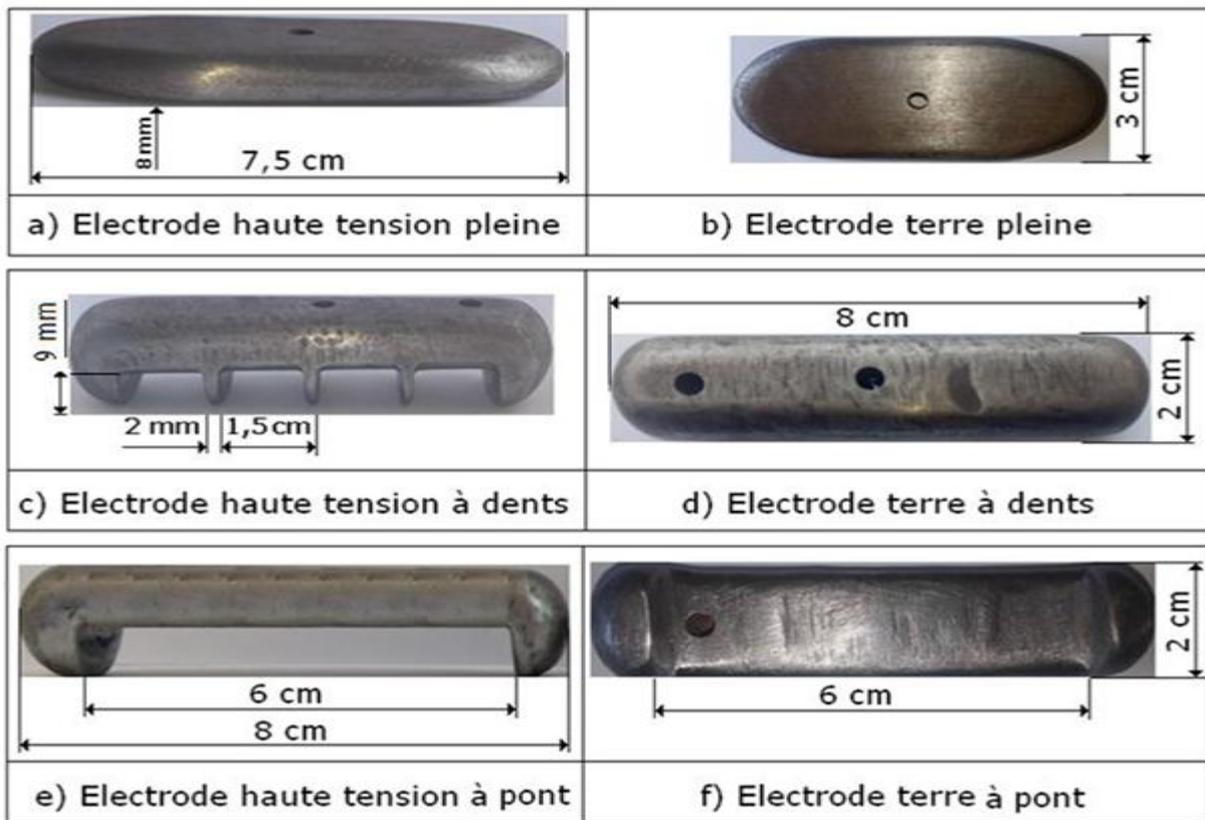


Fig. I. 22: Systèmes d'électrodes confectionnés

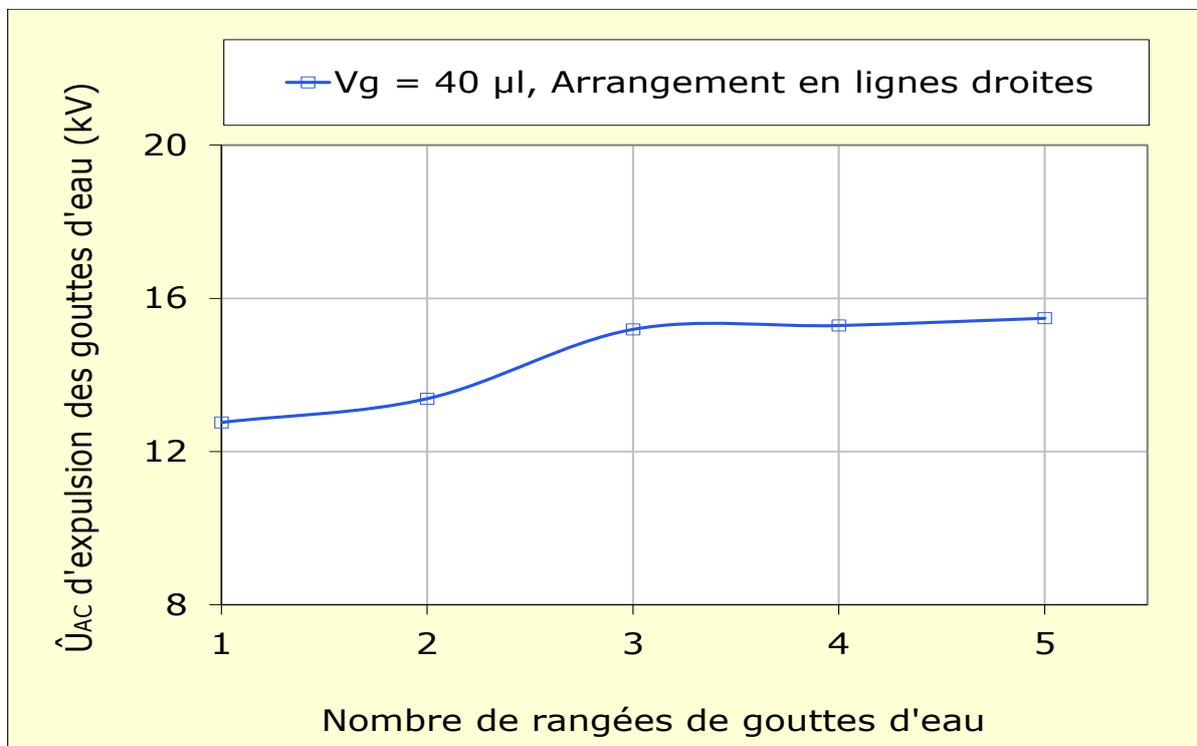
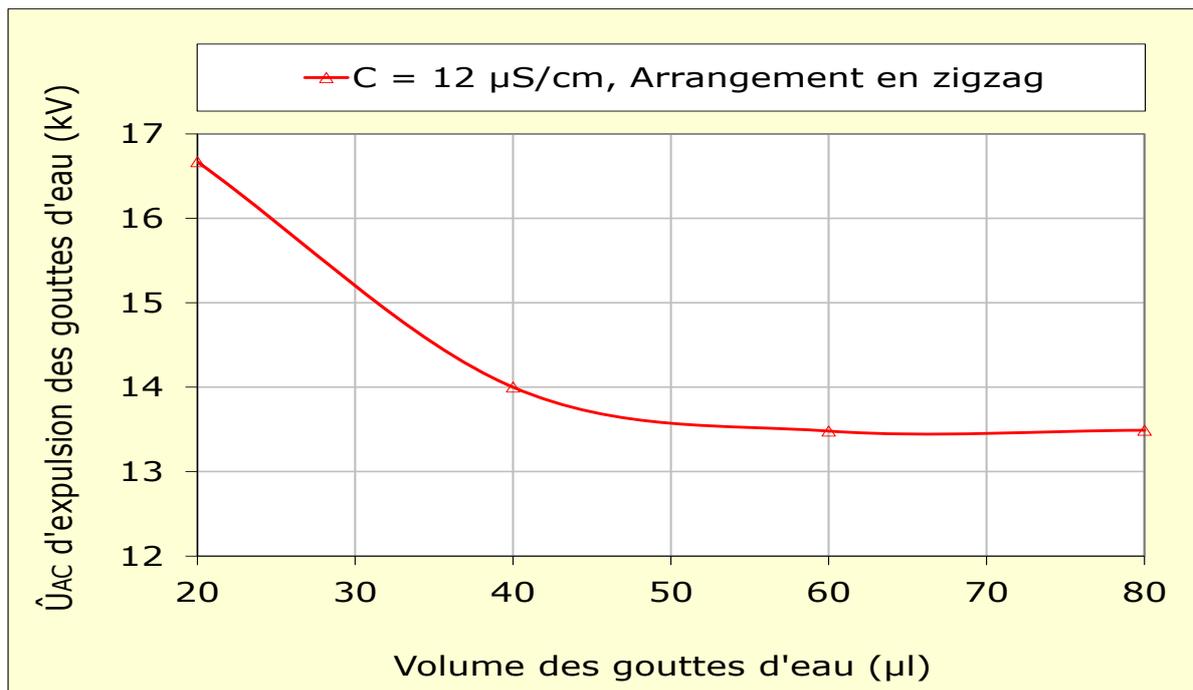
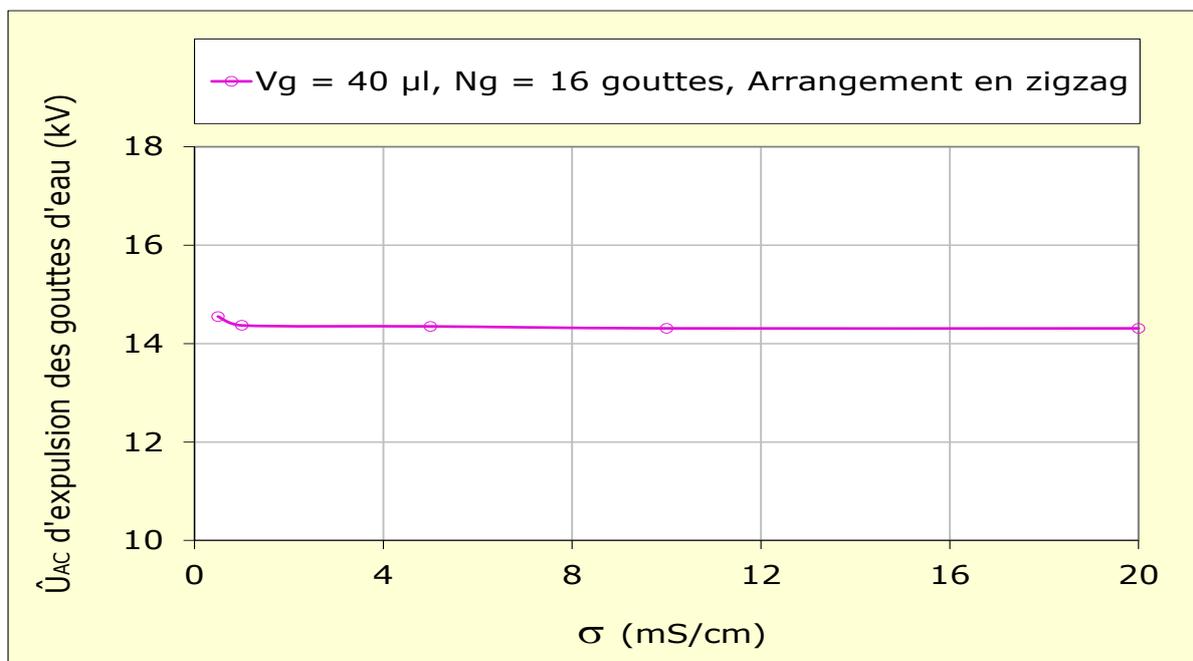


Fig. I. 23: Tension alternative d'expulsion en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe



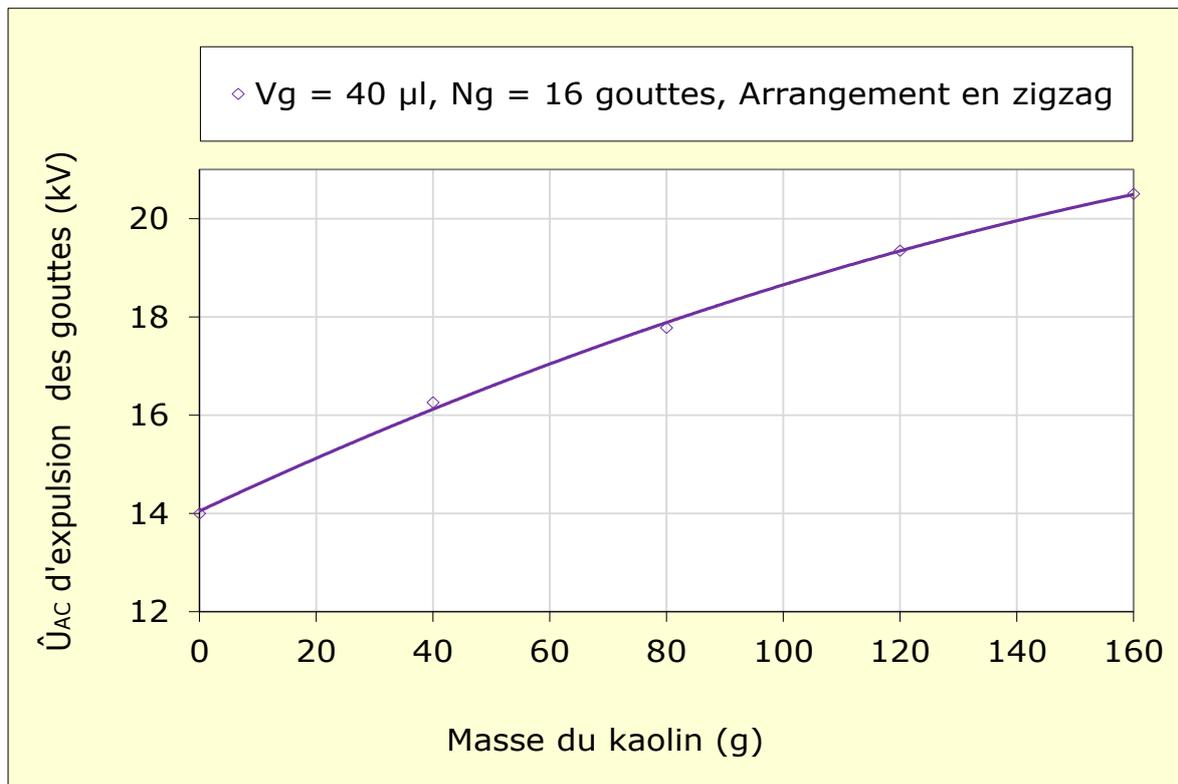
**Fig. I. 24:** Tension alternative d'expulsion en fonction du volume des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

Les résultats émanant de la figure I. 25 et donnant l'allure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau en fonction de leur conductivité, montrent que celle-ci diminue très légèrement au début avec l'augmentation de la conductivité et à partir de 1 mS/cm elle devient constante quelle que soit sa valeur prise.



**Fig. I. 25:** Tension alternative d'expulsion en fonction de la conductivité électrique des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe

Il résulte de la figure I. 26 illustrant l'évolution de la tension d'expulsion en fonction de la masse du kaolin, qu'avec son élévation, la tension de libération des gouttes d'eau de la surface augmente. Ceci lié au fait qu'avec l'augmentation de la masse du kaolin, la goutte d'eau devient lourde et s'introduit partiellement entre les aspérités, celle-ci se coince et se fait difficilement évacuer et par conséquent la tension de son expulsion croît.



**Fig. I. 26:** Tension alternative d'expulsion en fonction de la masse du kaolin ajoutée aux gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe

## I. 8 Conclusion

L'objectif convoité à travers ce chapitre était la caractérisation de la superhydrophobicité des surfaces et sa comparaison à l'hydrophobicité. Différents types d'animaux, d'insectes et de plantes possédant cette propriété ont été présentés dans ce chapitre. Les diverses techniques de fabrication de matériaux artificielles à caractère superhydrophobe y ont été aussi décrites ainsi que leurs propriétés et leurs domaines d'application ont été passés en revue.

Les résultats émanant des travaux effectués par différents chercheurs se rapportaient à la comparaison de la performance électrique des isolations hydrophobes et superhydrophobes sous tension alternative. Il ressort des applications données dans ce chapitre que la superhydrophobicité n'a pas été introduite dans le domaine électrique. Donc il serait très

intéressant d'investir dans ce domaine si l'on désire améliorer la performance électrique des surfaces isolantes de protection des équipements électriques.



## CHAPITRE 2

Pollution et contournement  
électrique sous tension  
alternative

## II. 1 Introduction

Dans les régions polluées, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension [40]. Ces derniers sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité du service, souvent confrontés au milieu dans lequel ils sont exposés, notamment à la pollution atmosphérique [41]. Cette pollution en se fixant sur les surfaces isolantes réduit considérablement la résistivité superficielle d'un isolateur et le contournement peut alors survenir. Les conséquences de contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé [42]. Mais ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause de grand nombre de facteurs difficiles à cerner qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques [40]. A l'état sec, la pollution n'engendre pratiquement pas de dégradation de la rigidité diélectrique des isolateurs. Cependant, l'humidification provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique à la surface de ces mêmes isolateurs. Des courants de fuite prennent alors naissance et des arcs partiels peuvent apparaître et évoluer jusqu'au contournement total des isolateurs [43]. Pour mieux connaître et maîtriser la pollution atmosphérique et le phénomène du contournement, il est nécessaire de suivre l'enchaînement de ce présent chapitre.

## II. 2 Pollution

La pollution est une contamination de l'environnement, par des molécules ou des particules, qui résulte des activités humaines [44]. Celle-ci engendre une modification défavorable du milieu naturel qui apparait en totalité ou en partie, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, les niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel [45], ou encore enlaidissant la nature [46]. Les niveaux de concentration Les niveaux de concentration des substances dans l'air sont significatifs de l'état de l'environnement [47]. Ils dépendent de l'importance des rejets dans l'atmosphère liés aux activités anthropiques (chauffage, transport, activité industrielle) et aux phénomènes naturels (volcan, foudre, et autres) qui constituent des indicateurs de pression sur l'environnement [48].

### II. 2. 1 Salinité

La salinité est par définition l'accumulation des sels solubles dans le sol ou sur sa surface. Au-delà d'une certaine concentration ( $\text{kg/m}^3$ ), elle a pour conséquence la dégradation des sols réduisant ainsi leur rendement [49]. Les sols sont considérés salins dès que la conductivité électrique dépasse  $1\text{mS/cm}$  à  $25^\circ\text{C}$  [50].

### II. 2. 2 Degré de pollution [51]

La norme CEI 60664-1 définit 4 degrés de pollution. Afin d'évaluer les lignes de fuite et les distances d'isolement, les quatre degrés de pollution suivants sont définis pour le microenvironnement:

- Degré de pollution 1: Il n'existe pas de pollution ou il se produit seulement une pollution sèche, non conductrice. La pollution n'a pas d'influence.
- Degré de pollution 2: Il ne se produit qu'une pollution non conductrice. Cependant, on doit s'attendre de temps en temps une conductivité temporaire provoquée par de la condensation.
- Degré de pollution 3: Présence d'une pollution conductrice ou d'une pollution sèche, non conductrice, qui devient conductrice par suite de la condensation qui peut se produire.
- Degré de pollution 4: La pollution produit une conductivité persistante causée par la poussière conductrice ou par la pluie ou la neige.

### II. 2. 3 Couche de pollution

C'est une couche électrolytique conductrice mise sur la surface de l'isolateur. Celle-ci est composée du sel et des matériaux inertes. Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions [52-54]. Celle-ci peut apparaître sous forme de poussières de terre, sable ou encore de l'engrais tout dépend du positionnement des lignes électriques.



Fig. II. 1: Couche de pollution sur des isolateurs en silicone et en verre [55]

## **II. 2. 4 Différents types de polluants**

Les polluants atmosphériques peuvent être d'origine naturelle ou provenir des activités humaines de type industries ou du aux transports [45].

### **II. 2. 4. 1 Polluants naturels**

Cette pollution peut être désertique, marine ou autres, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les facteurs naturels (vents, pluie), tout dépend de la localisation des lignes électriques. Les polluants d'origine naturelle sont principalement le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ). Ces polluants naturels sont peu dangereux car ils ne restent pas très longtemps dans l'atmosphère [48].

### **II. 2. 4. 2 Polluants dus aux activités humaines**

Les principaux polluants que les hommes rejettent dans l'atmosphère sont : le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), méthane ( $\text{CH}_4$ ), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), l'ozone ( $\text{O}_3$ ) et des particules en suspension. Ces polluants proviennent de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), des industries (usines métallurgiques et sidérurgiques, incinérateurs de déchets, raffineries de pétrole, et autres) et des transports routiers. Cette pollution est plus forte les jours où la température est élevée (forte chaleur) et lorsqu'il n'y a pas de vent. La variété et la distribution granulométrique des particules de pollution suspendues dans l'air ont été décrites par Thompson [56].

## **II. 2. 5 Formation et répartition des couches polluantes**

La disposition des isolateurs dans les lignes forme un obstacle à l'écoulement d'un air transportant de la poussière. Une couche de pollution se développe progressivement sur la surface de l'isolateur. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes, et par suite, la diminution de la tension de tenue des isolateurs [57]. La couche de pollution se concentre en général, dans les parties protégées contre les facteurs de nettoyage naturel (vent violent, pluie abondante, et autres). La répartition de la pollution est loin d'être uniforme et homogène et dépend essentiellement du profil de l'isolateur (forme géométrique de la surface), de l'orientation (verticale ou inclinée), de la chaîne par rapport au sol, de la distance à la source de la pollution, de la nature des dépôts, poids et taille des particules, des caractéristiques climatiques du site (vent, pluie, givre), des caractéristiques géographiques de la zone (urbaine, industrielle, Sahara) [58].

**II. 2. 6 Sources de pollution**

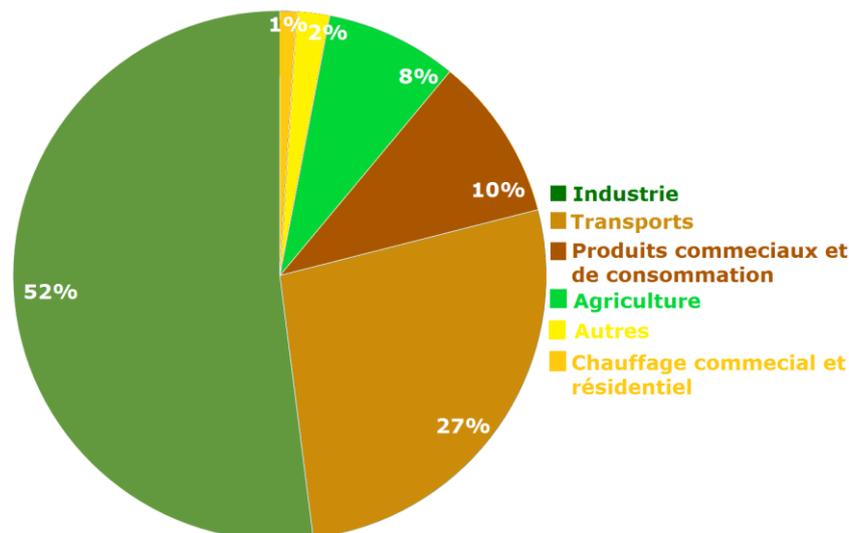
Les principales sources de pollution pouvant être rencontrées sont la pollution naturelle: marine, désertique et la pollution industrielle. La pollution mixte représente l’ennemi majeur des ouvrages électriques car, elle est la combinaison des deux pollutions, naturelle et industrielle [59].

**II. 2. 7 Classification et origine de la pollution**

La variation des agents constituant la pollution dépend des sources de contamination et des conditions auxquelles sont soumises les isolations [60]. D’après la norme CEI 815 [61] nous citons les principales sources de pollution dans le tableau suivant

Origine et classification de la pollution		Types de polluants
Pollution naturelle	Pollution marine	Embruns marins (couche de sel)
	Pollution désertique	Particules de sable, terre, poussière
	Pollution du sol et zones agricoles	Poussières du sol, (pollen, insectes, engrais)
Pollution industrielle		Poussière industrielle, dépôts ferromagnétiques, gaz présent dans les fumées
Pollution mixte		Une combinaison des pollutions précédentes, elle représente le cas le plus nocif.

**Tab. II. 1 :** Tableau récapitulatif des principales sources de pollution et leurs classifications



**Fig. II. 2 :** Secteur de statistique des différentes sources de pollution en fonction de l’origine de celle-ci (1: Chauffage commercial et résidentiel, 2: Autres, 3: Agriculture, 4: Produits commerciaux et de consommation, 5: Transports, 6: Industrie)

### II. 3 Mesure de la sévérité de pollution d'un site

La connaissance de la sévérité de la pollution est indispensable afin de dimensionner convenablement l'isolation en vue d'assurer un service sans défaillance [62]. Dans ce qui suit, nous passerons en revue différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées. Dans ce cas, les principales méthodes suivantes ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site.

### II. 4 Méthodes de mesure des caractéristiques électriques de pollution

#### II. 4. 1 Conductivité superficielle

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $\sigma$  par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur [63,65]. Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général, elle présente des résultats dispersés [67].

##### II. 4. 1. 1 Conductivité superficielle électrique de la pollution [67]

La conductivité d'un dépôt polluant dépend de la température. cette dernière peut être lue directement sur l'appareil de mesure considéré. La conductivité correspondant à 20°C ( $\sigma_{r20^\circ\text{C}}$ ) est déduite de la formule suivante:

$$\sigma_{r20^\circ\text{C}} = (\sigma_{rT}/\alpha) \quad (\text{II. 1})$$

Avec :  $\sigma_{rT}$  : Conductivité de la couche de pollution à la température T ( $\mu\text{S}$ ) et  $\alpha$ : Facteur de correction donné par le tableau II. 2:

Température T (°C)	0	9	10	15	20	25	30	35	40
Facteur de correction $\alpha$	0.6	0.68	0.77	0.89	1.00	1.12	1.23	1.34	1.45

**Tab. II. 2:** Facteur de correction  $\alpha$  en fonction de la température.

#### II. 4. 2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) [71, 82]

La densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) est normée (IEC TC 36-WG11-60815). Cette dernière est exprimée en mg de NaCl/cm<sup>2</sup> de la surface d'un isolateur, ayant une conductivité équivalente égale à un dépôt polluant réel dissous dans la même quantité de solution. Des échantillons de sel sont prélevés à la surface d'un isolateur témoin, en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier, éponge, brosse) et de l'eau distillée. Le

dépôt est ensuite dissout dans une quantité de solution connue. La conductivité de la solution obtenue ainsi que les caractéristiques de l'isolateur permettent de déterminer la salinité équivalente. Pour la détermination de la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel.

En conséquence, plusieurs isolateurs ou collecteurs doivent être exposés pendant toute la période d'essais.

Si le lavage naturel est rare, des intervalles entre prélèvements d'un mois ou plus peuvent être suffisants pour acquérir l'information sur l'accumulation en fonction du temps. D'autre part, si la pollution se dépose très rapidement, il sera nécessaire de raccourcir l'intervalle entre prélèvements, pour obtenir un résultat plus sûr, les prélèvements sont habituellement effectués sur plusieurs isolateurs ou collecteurs. La DDSE ne dépend pas seulement de la forme de l'isolateur mais aussi de la position dans laquelle il est installé, c'est-à-dire l'angle qu'il fait avec la verticale et son orientation.

Cette méthode mesure l'équivalent du composant actif du contaminant sans tenir compte de certains facteurs à savoir l'humidification de la couche de pollution et le processus d'amorçage des arcs. Elle est définie comme le rapport du courant à fréquence industrielle qui traverse l'isolateur à la tension appliquée. La tension utilisée est d'environ 30 kV par mètre de longueur de l'isolateur, mais inférieure à la tension de service. Ceci concerne les phases 1 et 2 du processus de contournement la suspension obtenue est constamment agitée au moins pendant deux minutes avant de procéder à la mesure de la conductivité volumique  $\sigma_0$  de la suspension à température  $\theta$  en °C. La conductivité à la température ambiante ( $\theta=20^\circ\text{C}$ ) est donnée par la relation :

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} [1 - b (\theta - 20)] \quad (\text{II. 2})$$

Où les grandeurs sont:  $\theta$  est la température de la suspension en °C,  $\sigma_{\theta}$  est la conductivité volumique à la température de  $\theta$  °C en (S/m),  $\sigma_{20}$  est la conductivité volumique à la température de 20 °C en (S/m);  $b$  est le facteur dépendant de la température  $\theta$  °C, qui est donné par la relation suivante:

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

Lorsque  $\sigma_{20}$  est à l'intérieure de l'intervalle (0,004 – 0,4) S/m, la salinité de la suspension est déterminée par la formule suivante :

$$S_a = (5,7 \cdot \sigma_{20})^{1,03} \quad (\text{II. 4})$$

Avec:  $S_a$  en  $\text{kg/m}^3$  et  $\sigma_{20}$  en  $\text{S/m}$ . La densité du dépôt de sel équivalent est donnée par la formule suivante:

$$\text{DDSE} = \frac{S_a \cdot V}{S} \quad (\text{II. 5})$$

Citons les grandeurs suivantes:  $V$  (volume de la suspension en  $\text{m}^3$ ),  $S$  (surface nettoyée en  $\text{m}^2$ ) et la DDSE en  $\text{mg/cm}^2$

Niveau de pollution	<b>Pollution artificielle: Sévérité équivalente</b>		
	Couche liquide conductivité ( $\mu\text{S}$ )	Couche solide DDSE ( $\text{mg/cm}^2$ )	Ligne de fuite efficace ( $\text{cm/kV}$ )
Léger	5 à 10	0.05 à 0.1	2.7
Moyen	10 à 15	0.1 à 0.2	3.5
Fort	15 à 30	0.2 à 0.6	4.3
Très fort	30 à 50	0.6 à 1.1	5.4

**Tab. II. 3 :** Niveau de pollution en fonction de la sévérité équivalente

Après avoir trouvée la valeur de la DDSE qui est déterminée par la formule II. 6 à celle-ci correspond la valeur de la ligne de fuite efficace d'un isolateur qui est représenté par la 4 ème colonne du tableau ci-dessus (Tab. II. 3). Le niveau de pollution et le degré d'humidification de la couche, permettent de déterminer les performances de l'isolateur, ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de pollution d'un site. La conductance superficielle  $G$  est obtenue en appliquant pendant 2 à 5 périodes une tension, alternative 50 Hz donnée  $V$ , en mesurant le courant de fuite maximum  $I$  traversant la couche de pollution, la conductance est donnée par la formule II. 6 :

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

Avec :  $I$  le courant en (A),  $V$  la tension en (V) et  $G$  la conductance en (S).

La conductivité superficielle  $\sigma$  des isolateurs est obtenue en multipliant la conductance superficielle  $G$  par le facteur de forme  $f$ , défini par la formule II. 7 :

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

#### II. 4. 3 Densité de dépôt non soluble (DDNS)

Elle correspond à la quantité de dépôts polluant non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . La mesure de la DDNS s'accompagne souvent d'une analyse physicochimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [57]. La détermination de la DDNS (Fig. II. 1) s'effectue comme suit: La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé. La DDNS peut être calculée par la formule suivante:

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \quad (\text{II.8})$$

DDNS: La densité de dépôt non soluble en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ .  $m_f$ : 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  $\text{cm}^2$ . [57]

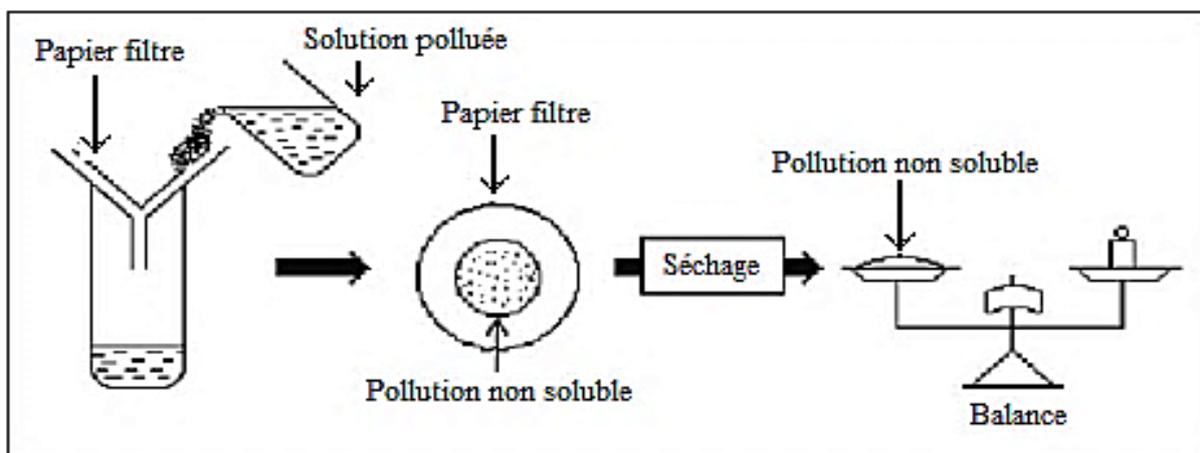


Fig. II. 3 : Schéma et procédé de mesure de la DDNS

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

Les mesures de la pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air dans un site. Les méthodes de mesures adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne le phénomène de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air d'un site donné et la sévérité de la pollution de ce même site [64-65,69].

#### **II. 4. 5 Mesure optique**

Le but de cette méthode consiste à évaluer l'épaisseur de la couche déposée à la surface d'isolation. Un dispositif de prédiction par sonde laser effectue les mesures en se fondant sur une technique elliptométrique. Un rayon à polarisation rectiligne traverse un analyseur et aboutit à un photodétecteur. Une analyse avancée des caractéristiques du rayon réfléchi (amplitude, décalage de phase) permet de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [65-68].

#### **II. 5 Technique de lutte contre la pollution**

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées [71].

##### **II. 5. 1 Allongement de la ligne de fuite**

Utiliser de longs isolateurs avec des lignes de fuite plus longues possibles (jusqu'à 10m pour les réseaux THT) [72]. L'efficacité de cette solution dépend du degré de pollution des régions, elle permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux méthodes sont utilisées :Le changement de type d'isolation par une autre de longueur de la ligne de fuite supérieur [73]. Ou bien l'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolations existantes [74].

##### **II. 5. 2 Graissage des surfaces isolantes**

Une graisse chimique spéciale, imperméable et possédant une grande résistance superficielle, est appliquée sur la surface de l'isolateur. La graisse utilisée est à base de silicone. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement l'isolation [75-76]. Ceci permet de rendre l'eau accumulée à la surface dispersée en gouttes, par conséquent le courant de fuite diminue sensiblement [72].

##### **II. 5. 3 Nettoyage de l'isolation**

Pour éviter la mise hors service des équipements électriques, un lavage sous tension des isolations est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les

distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [77]. L'utilisation d'un abrasif pulvérisé sous pression pour le nettoyage des pollutions très adhérentes (ciment, et autres) est possible [73].

#### **II. 5. 4 Utilisation des isolateurs plats**

Même avec une ligne de fuite moins longue que pour les isolateurs traditionnels [45], les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoient très bien sous l'effet du vent [78]. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [45].

#### **II. 5. 5 Revêtements à base de silicones**

Il suffit de pulvériser ou teinter par un pinceau la surface des isolations par un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante. Ce revêtement joue le rôle de protection d'isolation et l'amélioration de sa tenue sous pollution [48]. En général, nettement supérieure à celle du graissage [73].

### **II. 6 Contournement**

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves [72].

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur. Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre). Le contournement cause habituellement l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau. De telles interruptions, bien qu'étant nocives, peuvent être tolérées dans des endroits ruraux.

Dans des secteurs urbains avec les industries de pointe (domaines pharmaceutiques, production de véhicule) les interruptions ne sont pas acceptables parce qu'elles mènent à d'énormes pertes financières de production, de machines bloquées et des pertes de contrôle du cycle du processus [72].

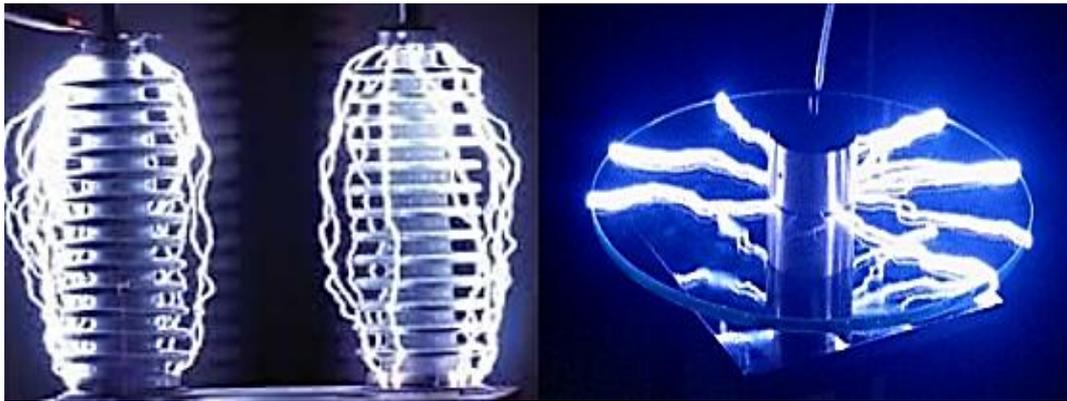


Fig. II. 4 : Contournement des isolateurs électrique de haute tension

### II. 6. 1 Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. Elle dépend [79], de la résistivité volumique moyenne de la pollution, du profil et des dimensions de l'isolateur.

D'après A. Cimador [80] elle dépend de, la nature de la tension et sa polarité, de la longueur de l'isolateur et son profil (largeur de la couche de pollution), dépendante aussi à la forme des électrodes (pointe-plan, plan-plan, et autre), la résistivité volumique moyenne de la couche polluante, la répartition de la couche de pollution et aux conditions climatiques telles que la pression, l'humidité et la température.

### II. 6. 2 Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement des isolateurs, Fig. II. 4) [79, 81].

### II. 6. 3 Courant de fuite

C'est un courant de nature impulsionnelle. Il est de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur.

Il est donc à caractère électrolytique et de type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche à la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques [40].

### II. 6. 4 Courant de fuite critique

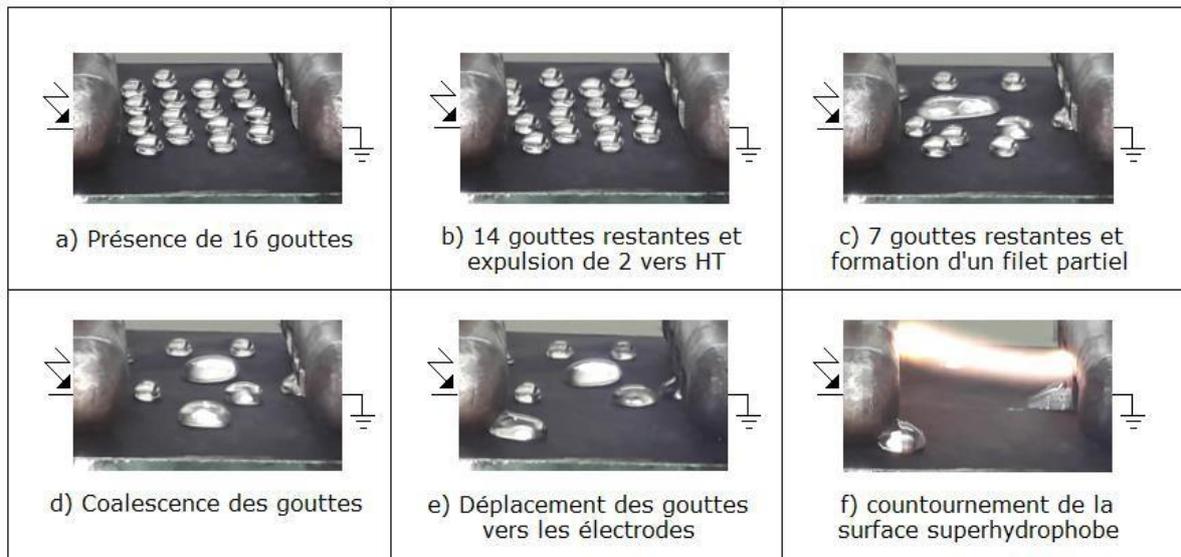
C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à une tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que de la

forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend ce courant sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est-à-dire la contrainte spécifique exprimée en kV/cm [79].

### II. 6. 5 Longueur critique d'arc

C'est la longueur limite  $X_C$  de l'arc partiel au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total [57].

### II. 6. 6 Déroulement du contournement



**Fig. II. 5:** Principales phases de contournement de la surface d'un matériau superhydrophobe sous électrodes à dents

La figure II. 5 montre les différentes phases de contournement de la surface d'un matériau superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau et délimitée par des électrodes à dents. Il en ressort qu'après application de la tension, celles-ci commencent à être expulsé (Fig. II. 5b). Leur déformation engendre des flaques d'eau au niveau des électrodes HT et terre (Figs. II. 5d et 5e), la formation des flaques d'eau entraîne le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation. A ce moment-là une décharge électrique émane de l'électrode sous tension et s'amorce dans l'intervalle d'air interélectrode et finit par contourner la surface isolante superhydrophobe (Fig. II. 5f) [39].

## II. 7 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 devient donc un point très important en vue de

réduire les pertes occasionnées par le contournement [82], car ils sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [40]. La performance électrique d'une isolation dans un milieu pollué et humidifié varie en fonction de l'état de surface de l'isolation, qui est influencé par des facteurs de pollution (vent, ensoleillement, topologie locale, température, pluie, et autres) [59, 64 et 83].

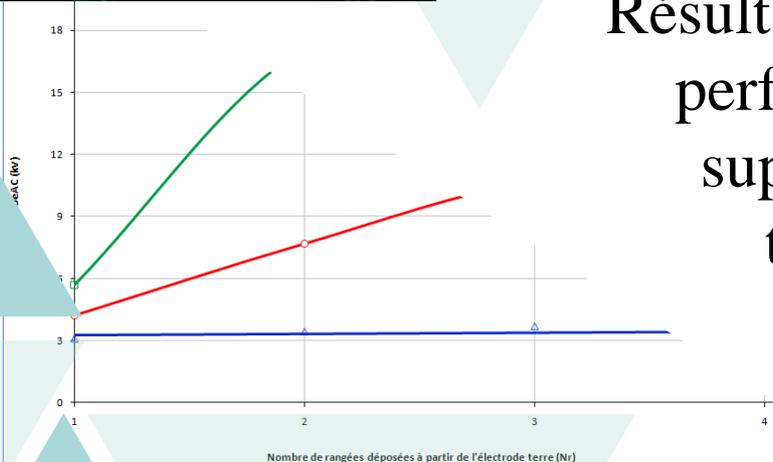
Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (allongement de la ligne de fuite, graissage, lavage, revêtements, le choix des isolateurs sans nervures) permettent de disposer aujourd'hui des solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants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

Les isolateurs les mieux adaptées à un environnement donné sont ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage (isolateur plat) [40]. Afin de trouver la solution efficace au sérieux problème de contournement, l'étude de la performance électrique sous tension alternative d'un revêtement des surface isolantes en couche superhydrophobe a base de silicone fera l'objet du prochain chapitre.



# CHAPITRE 3

Résultats expérimentaux sur la performance des surfaces superhydrophobes sous tension alternative



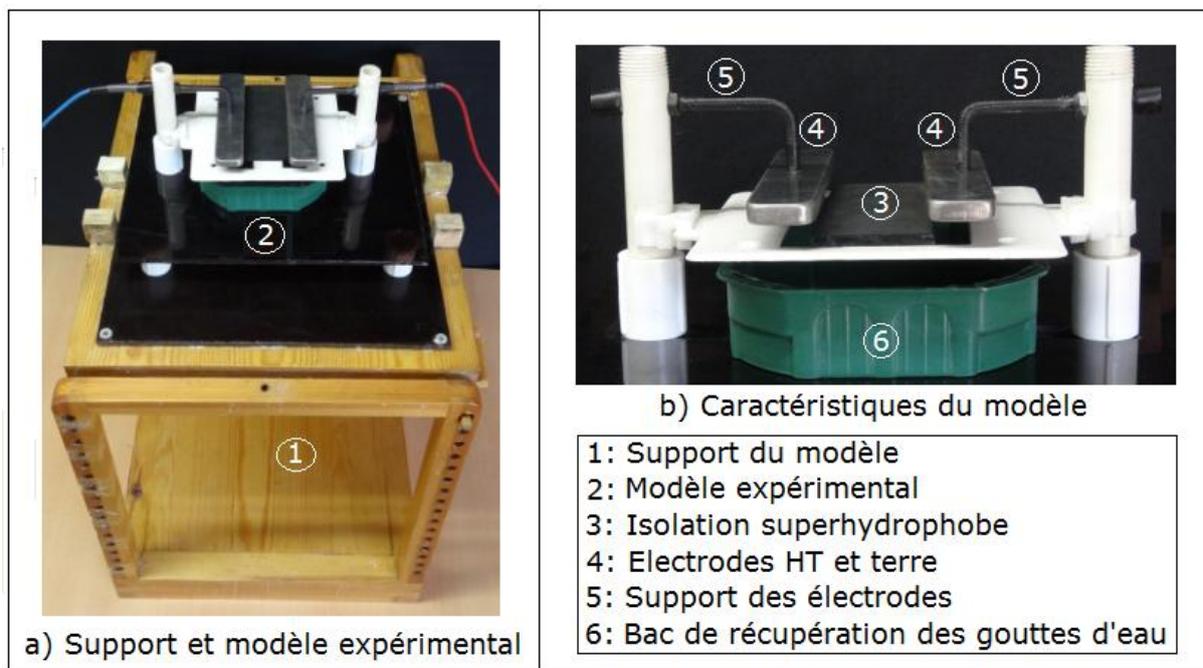
### III. 1 Introduction

Les résultats des travaux antérieurs ont montré que parmi les trois profils choisis d'électrodes délimitant une isolation superhydrophobe, recouverte de gouttes d'eau, seule la géométrie d'électrodes à pont contribue mieux à l'évacuation des gouttes d'eau de la surface de l'isolation considérée [39]. Cependant, quelques gouttes s'accrochent par fois aux pieds des deux électrodes hydrophiles lors de leur expulsion en dehors de l'isolation. Leur collage au pieds de ces électrodes et leur effilement sous l'action d'un champ électrique alternatif croissant, engendre le raccourcissement de la ligne de fuite sèche de l'isolation et par conséquent, des décharges électriques partielles résultantes peuvent entraîner le contournement de celle-ci et engendrer son vieillissement. Justement, l'objectif visé à travers ce présent chapitre consiste en la recherche d'un autre profil d'électrodes très adéquat et la technique de leur montage sur l'isolation afin d'éliminer le problème de persistance de ces gouttes quels que soient leurs paramètres électrogéométriques considérés, à savoir, leur volume, viscosité, conductivité électrique et particulièrement la non uniformité de leur distribution sur la surface de l'isolation. Donc, la performance électrique d'une isolation superhydrophobe, similaire à celle utilisée dans les travaux antérieurs sera déterminée en fonction des grandeurs d'influence suscitées et le mode d'éjection des gouttes d'eau en dehors de l'isolation sera visualisé à l'aide d'une caméra.

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

La variation par rapport à l'horizontale de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  de l'isolation est obtenue au moyen d'un dispositif illustré par la figure III. 1. Un support à paroi supérieure mobile est confectionné en bois. 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. Selon les travaux de recherche antérieurs, tout impact d'humidité sur la surface des isolations superhydrophobes, à angle d'inclinaison supérieur ou égal à  $2^\circ$ , n'affecte pas leur performance électrique, car celle-ci n'adhère pas sur elles et elle disparaît aussitôt entrée en contact avec leur surface. Ceci explique justement l'emplacement de l'armature supérieure mobile en position horizontale durant tous nos essais. Cette position est prise pour des raisons

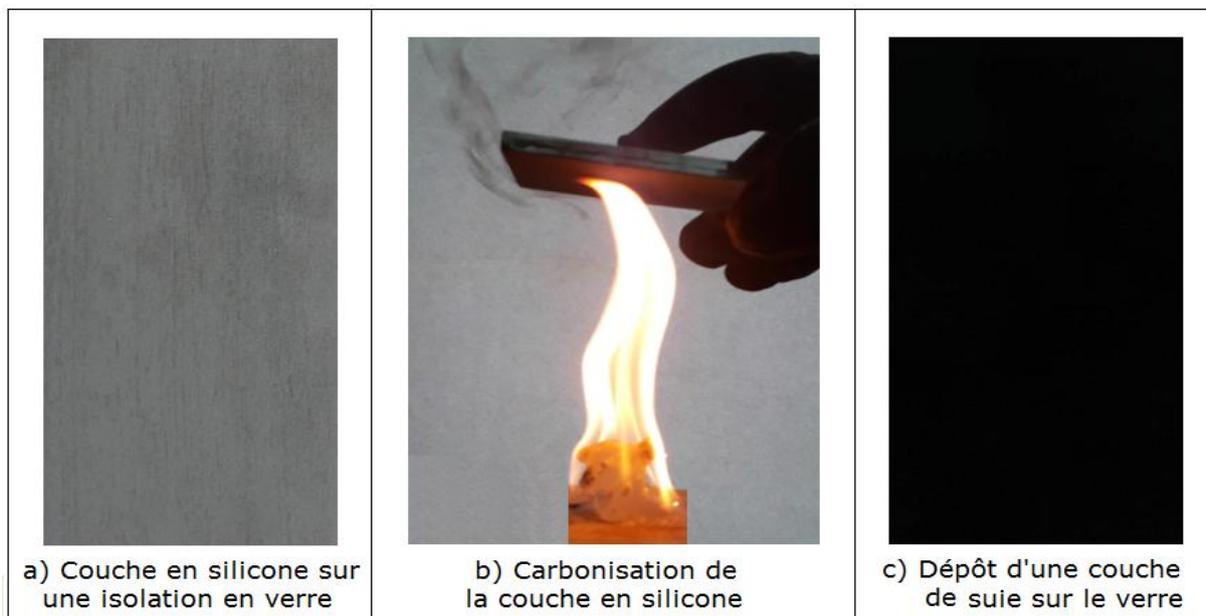
de reproduction de la situation la plus défavorable, correspondant à une performance électrique la plus faible de l'isolation superhydrophobe. Ceci est dû justement à la très faible mobilité des gouttes d'eau dans cette position et la probabilité élevée de contournement de l'isolation par des décharges électriques, engendrées par ces perles d'eau, suite à leur coalescence et leur effilement sous l'action d'un champ électrique [84-85].



**Fig. III. 1:** Modèle expérimental et ses caractéristiques

Dans les travaux antérieurs [39], trois géométries de jeux d'électrodes parallélépipédiques pleines à bornes arrondies, cylindriques à dents et cylindriques à pont, ont été fabriquées. Parmi ces trois 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. Leurs caractéristiques sont illustrées par la figure III. 1. Leur largeur ( $l_e$ ) est de 30 mm, leur épaisseur ( $e_e$ ) est égale à 8 mm et leur longueur ( $L_e$ ) de 120 mm. Elles sont suspendues à 10 mm de la surface de l'isolation superhydrophobe à l'aide de deux pitons. La taille de cet interstice est choisie de telle sorte à faciliter l'évacuation des gouttes d'eau volumineuses de la surface de l'isolation et leur récupération par le bac en couleur verte et leur réutilisation (Fig. III. 1b6). La ligne de fuite de l'isolation ( $L_c$ ) délimitée par ces

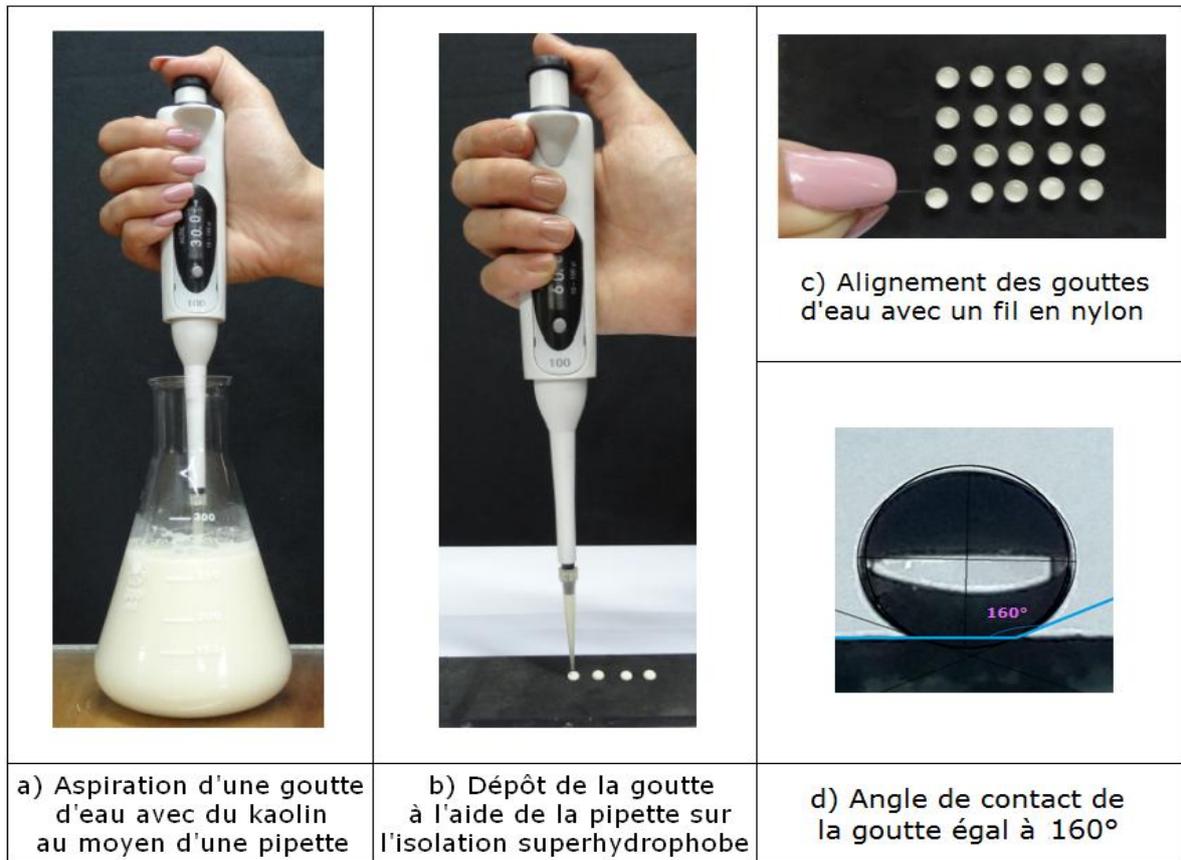
électrodes est de 4 cm (Figs. III. 1a2 et 1b3). Le support en bois est peint de plusieurs couches de vernis afin de l'empêcher d'absorber les gouttes d'eau quittant la surface de l'isolation et atterrissant sur les parois de celui-ci à la fin de chaque essai d'éjection des gouttes. La surface superhydrophobe est obtenue en étalant, dans un premier temps, manuellement et uniformément une quantité de gel en silicone fraîche sous forme d'une couche très fine sur la face supérieure d'une plaque en verre (Fig. III. 2a). Dans un deuxième temps, une autre quantité du même produit est déposée sur un morceau de bois et à laquelle nous mettons le feu (Fig. III. 2b). En dernier lieu, la plaque en verre, de dimensions 120 mm x 50 mm x 5 mm, est approchée de la flamme pour la recouvrir de suie émanant de la carbonisation de la silicone (Fig. III. 2b). La figure III. 2c montre la plaque totalement noircie et nettoyée à l'eau du robinet.



**Fig. III. 2:** Etapes de confection d'une surface en verre superhydrophobe à base de silicone

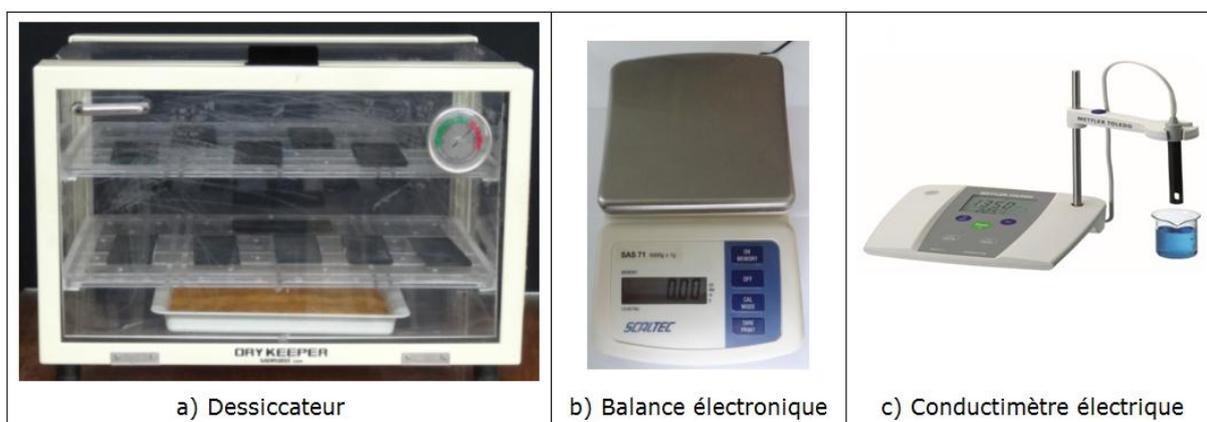
Le volume des gouttes d'eau est mesuré à l'aide d'une micropipette, graduée de 5 à 100  $\mu\text{l}$ . Le choix de la quantité d'eau à aspirer d'un bécher par la pipette est réglée grâce à son compteur (Figs. III. 3a et 3b). Cette même quantité d'eau est déposée sous forme d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. III. 3b). Le positionnement des gouttes sur la surface de l'isolation est effectué à l'aide d'un fil en nylon (Fig. III. 3c). La mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe est réalisée au moyen d'un logiciel (Image J) disponible sur internet. La valeur de l'angle de contact statique d'une goutte d'eau, de 20  $\mu\text{l}$  de volume, est de l'ordre de  $160^\circ$  (Fig. III. 3d). Son angle de glissement sur la même surface inclinée par rapport à l'horizontale est inférieur à  $2^\circ$ .

Ces valeurs sont conformes à celles obtenues par d'autres chercheurs sur une surface de nature différente [84-85].



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

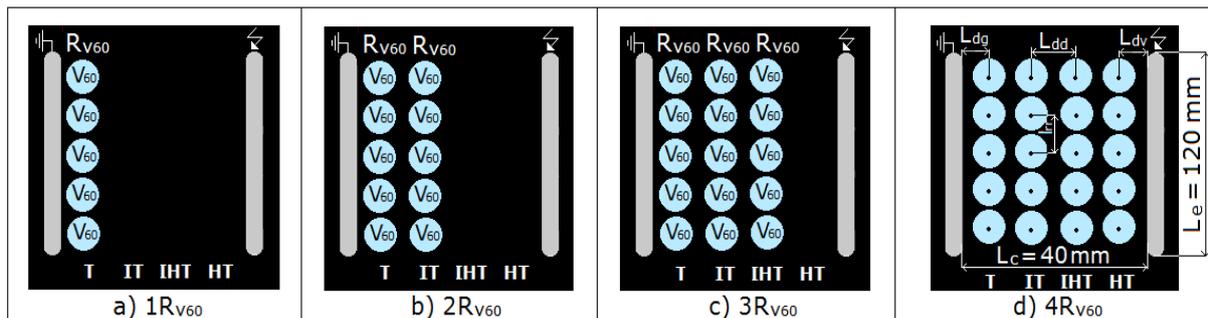
Plusieurs échantillons de cette isolation ont été confectionnés de la même manière et mis dans un dessiccateur afin de les conserver à l'abri de toute humidité régnant au laboratoire d'essai ou leur enlever celle accumulée sur leur surface durant la période de leur essai sous tension (Fig. III. 4a). Plusieurs solutions avec ou sans kaolin ont été préparées et mises en bouteilles.



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

Ces solutions contiennent de l'eau distillée et du sel de cuisine. La masse de kaolin ajoutée à la solution est mesurée à l'aide d'une balance électronique (Fig. III. 4b) et sa conductivité électrique au moyen d'un conductimètre à sonde mobile (Fig. III. 4c).

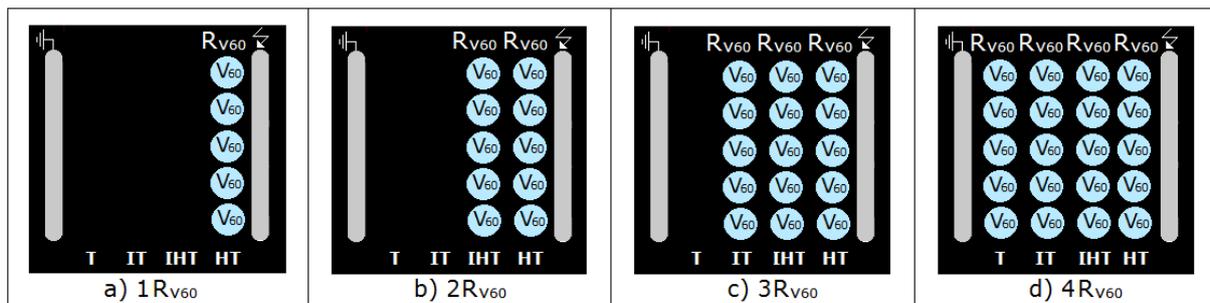
Dans le cadre de cette investigation, un recouvrement partiel variable en rangées de gouttes d'eau en lignes droites ainsi qu'une technique de leur positionnement sur la surface de l'isolation ont été choisis. Disposées en lignes droites, parallèlement aux électrodes sous tension et terre (Figs. III. 5, 6, 7, 8, 9 et 10), ces rangées sont composées chacune d'un ensemble de 5 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 ( $l_{rr}$ ) sont maintenues constantes tout au long de l'expérimentation (Fig. III. 5d). Ce type d'arrangement en lignes droites est choisi afin de simuler le phénomène de coalescence de gouttes d'eau lors de leur évacuation de la surface de l'isolation superhydrophobe.



**Fig. III. 5:** Recouvrement de la surface de l'isolation en nombre variable de rangées de gouttes d'eau de l'électrode terre vers celle sous tension (T: Zone terre, IT: Zone intermédiaire terre, IHT: Zone intermédiaire haute tension, HT: Zone haute tension)

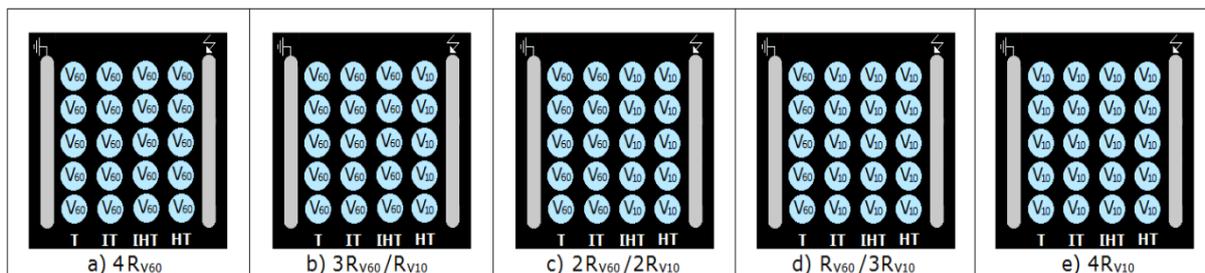
Concernant l'emplacement de la première rangée de gouttes d'eau, il existe plusieurs possibilités. Celles-ci consistent en le positionnement de la première rangée soit au voisinage immédiat de l'électrode terre (Fig. III. 5) ou sous tension (Fig. III. 6) ou bien dans la zone intermédiaire. Cette technique permet la création de deux zones de taille variable et leur emplacement sur la surface de l'isolation, parallèlement aux électrodes HT et terre l'une humide avec gouttes d'eau et l'autre sèche sans celles-ci. Ce type de constellation peut être rencontré sur des isolations installées sur site lors d'une pluie ou phénomène de condensation naturelle [86-87]. Il existe une deuxième variante, pour laquelle, la première rangée est apportée soit à l'extrémité droite ou gauche de l'isolation ou bien dans la zone intermédiaire parallèlement à la ligne de fuite de celle-ci. Le but recherché à travers ce travail consiste en l'étude de l'effet de la première variante conformément aux figures III. 5 et III. 6 sur la

performance électrique de l'isolation. La figure III. 5 donne les images des différentes étapes d'un partiel recouvrement en rangées de gouttes d'eau d'une surface isolante, subdivisée en deux zones de taille variable, dont celle humide est située du côté terre et celle sèche du côté haute tension. La figure III. 6 illustre le cas contraire de la précédente. Le volume des gouttes d'eau dans ces deux cas de figure est fixé à 60  $\mu\text{l}$ .

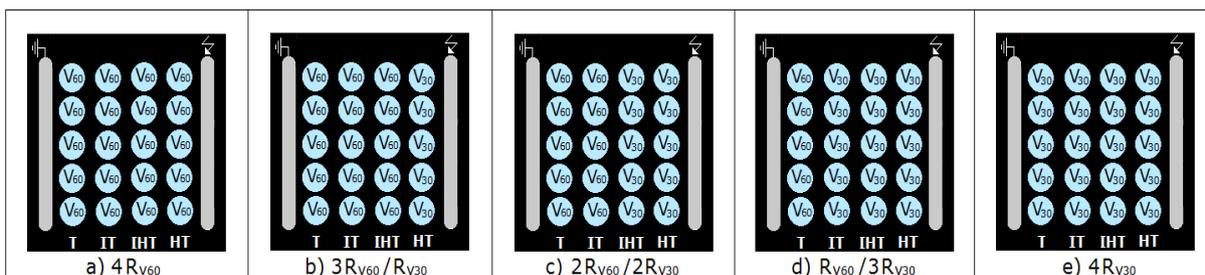


**Fig. III. 6:** Recouvrement partiel de la surface de l'isolation en rangées de gouttes d'eau de l'électrode sous tension vers celle terre

Les gouttes d'eau formées sur une surface isolante superhydrophobe lors du phénomène de condensation ou de pluie naturelle ne sont pas toutes de même taille et leur répartition sur l'isolation est arbitraire [86-87]. Afin de reproduire qualitativement ce phénomène, l'isolation, illustrée par les figures III. 7 et III. 8, est subdivisée en deux zones de taille variable et sur lesquelles sont déposées des rangées de gouttes d'eau à petit volume ( $V_p$ ) et grand volume ( $V_G$ ). La figure III. 7 est obtenue pour un rapport de ces volumes  $R_v = V_p/V_G = 10/60$  et la figure III. 8 pour  $R_v = 30/60$ .

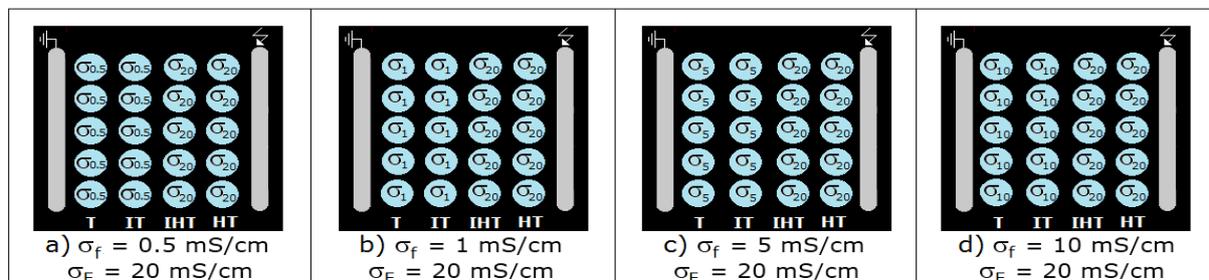


**Fig. III. 7:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en nombre de rangées et volume des gouttes d'eau variables ( $V_p$ : petit volume,  $V_G$ : grand volume,  $R_v = V_p/V_G = V_{10}/V_{60}$ )



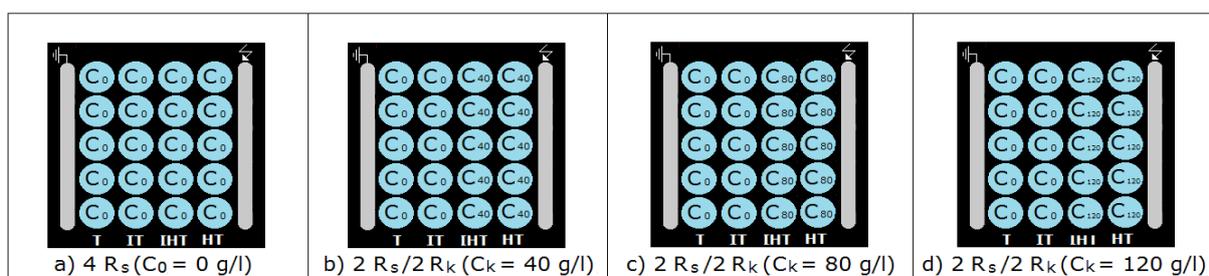
**Fig. III. 8:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en nombre de rangées et volume des gouttes d'eau variables ( $R_v = V_{30}/V_{60}$ )

Le sel marin peut-être emporté par le vent et se déposer sur les différentes parties d'un isolateur réel. Lors de la pluie ou de la condensation naturelle, ce sel peut être dissous dans les gouttes d'eau ainsi formées sur l'isolation. Du fait de son profil quelconque, ses divers secteurs ne reçoivent pas la même quantité de sel, donc la conductivité électrique résultante des gouttes d'eau peut différer d'un secteur à l'autre [89]. Afin de reproduire ce phénomène, la surface de l'isolation superhydrophobe considérée dans cette étude est subdivisée en deux zones de même taille, sur lesquelles sont déposées des rangées de gouttes d'eau à rapport de conductivité électrique faible et forte ( $\sigma_f/\sigma_F$ ) variable (Fig. III. 9). La conductivité électrique faible  $\sigma_f$  prend des valeurs égales à (0.5, 1, 5 et 10) mS/cm et  $\sigma_F$  est maintenue constante et égale à 20 mS/cm. Ces valeurs ont été choisies de telle sorte à simuler les divers degrés de pollution des sites compris entre un niveau de contamination très léger et celui très fort.



**Fig. III. 9:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en rangées de gouttes d'eau à rapport de conductivités électriques variable ( $\sigma_f$ : Conductivité faible,  $\sigma_F$ : Conductivité forte)

De même, les gouttes d'eau issues de la condensation ou la pluie naturelle peuvent devenir visqueuses lors de leur entrée en contact avec les diverses impuretés déposées au fil du temps sur les isolations sur site. Afin de simuler ce phénomène, des solutions de différentes concentrations en kaolin ont été préparées. L'isolation superhydrophobe est subdivisée en deux zones de même taille (Fig. III. 10). Sur l'une d'elle est déposée des rangées de gouttes de concentration en kaolin variable ( $C_k = 40, 80$  et  $120$  g/l). Sur l'autre zone, les rangées de gouttes la recouvrant ne contiennent pas de kaolin ( $C_k = C_0 = 0$  g/l).

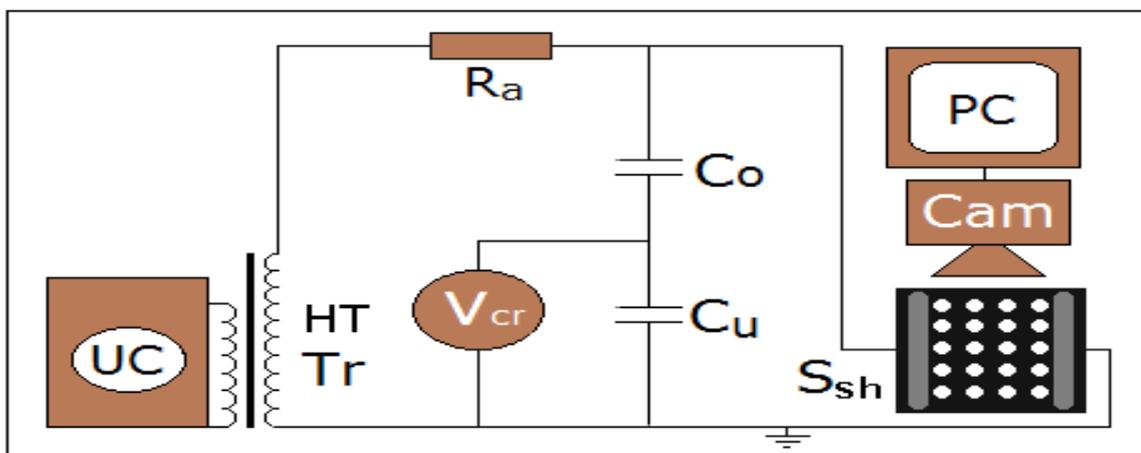


**Fig. III. 10:** Recouvrement de deux zones de l'isolation en rangées de gouttes d'eau à différence de concentration en kaolin ( $\Delta C_k = C_k - C_0$ ) variable ( $R_s$ : Rangée de gouttes d'eau sans kaolin,  $R_k$ : Rangée de gouttes d'eau avec kaolin)

La station de mesure, illustrée par la figure III. 11, est composée d'un circuit de mesure de la tension alternative d'éjection à l'extérieur d'une surface isolante superhydrophobe de toutes sortes de gouttes d'eau la recouvrant et d'un circuit de visualisation du mode de leur expulsion en dehors de celle-ci. Cette station d'essai est constituée d'un transformateur haute tension (0,08 A/135 kV), un diviseur de tension capacitif ( $C_o/C_u$ ), un voltmètre de crête ( $V_{cr}$ ) à affichage numérique et une surface superhydrophobe isolante (SSH). Le circuit de visualisation comprend une caméra rapide (Cam) pour l'enregistrement des différentes séquences d'évacuation des gouttes d'eau recouvrant sa surface superhydrophobe et un PC pour le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Vidéo studio.

La tension d'essai appliquée à l'isolation superhydrophobe variante de gouttes d'eau est augmentée manuellement par pas de 0.5 kV jusqu'à l'expulsion de la dernière goutte d'eau en dehors de la surface isolante. Les tensions d'essai correspondant à l'éjection de chacune des gouttes d'eau et ainsi que leur destination ont été prélevées.

Pour chacun des paramètres d'influence investigués dans ce projet, une série de 20 essais a été réalisée et la valeur retenue de la tension d'essai déclenchant l'expulsion des gouttes d'eau est la moyenne arithmétique de l'ensemble de celles obtenues sur la même série de mesure. 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 [90-91].



**Fig. III. 11:** Schéma de mesure de la tension d'essai entraînant l'expulsion des gouttes de l'isolation et de visualisation de leur évacuation (Tr: Transformateur, UC: Appareil de commande, SSH: Surface superhydrophobe, Cam: Caméscope, PC: Ecran Ordinateur)

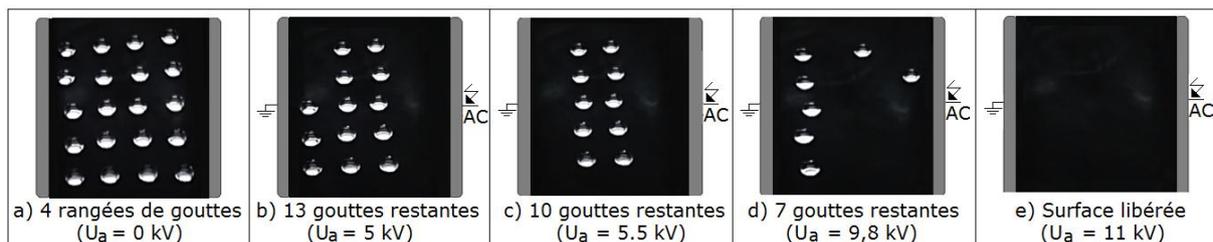
### III. 3 Résultats et leur interprétation

#### III. 3. 1 Mode d'expulsion des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation

Trois modes distincts d'éjection à l'extérieur de l'isolation superhydrophobe des gouttes d'eau, sous arrangement en lignes droites, ont été recensés: éjection individuelle, par groupes,

ou bien groupe-individuelle des gouttes d'eau. Le mode d'expulsion par groupes 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'éjection groupe-individuelle est la combinaison des deux types précédents et consiste en une évacuation successive d'un ensemble de groupuscules de gouttes d'eau, accompagnés chacun d'eux, parfois, d'une ou plusieurs gouttes d'eau individuelles. Pour ce qui est du sens du déplacement des gouttes, celui-ci a lieu dans les deux directions opposées, c'est-à-dire, transitant par les électrodes sous tension et terre. Il résulte de la visualisation du comportement électrohydrodynamique des gouttes d'eau, une apparition plus fréquente du mode d'expulsion groupe-individuelle et bidirectionnelle de celles-ci. Les deux autres modes sont très rares.

La figure III. 12 résume justement certaines phases importantes du mode d'expulsion groupe-individuelle et bidirectionnelle de vingt gouttes d'eau, arrangées en lignes droites. La figure III. 12a montre un dépôt de 4 rangées, à raison de 5 gouttes d'eau chacune, recouvrant toute la surface de l'isolation en absence de tension.



**Fig. III. 12:** Phases essentielles d'éjection groupe-individuelle et bidirectionnelle de 20 gouttes en dehors de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

L'image de la figure III. 12b montre la suppression de la rangée de gouttes d'eau avoisinant l'électrode HT et deux gouttes de la rangée très proche de l'électrode terre sous l'application d'une tension de l'ordre de 5 kV. La figure III. 12c illustre la persistance de deux rangées de gouttes d'eau sur les deux zones respectivement intermédiaires aux électrodes HT et terre sous une tension d'essai égale à 5.5 kV. Cela sous-entend que les deux rangées de gouttes d'eau supprimées ont été tout simplement évacuées en dehors de l'isolation de manière équitable, l'une via l'électrode HT et l'autre via l'électrode terre. La figure III. 12d montre la persistance de 7 gouttes d'eau de la zone intermédiaire de l'isolation sous une tension d'essai égale à 9.8 kV. Cette séquence survient suite à l'élimination de 3 gouttes d'eau de la zone intermédiaire à l'électrode HT. Au fait, il est à remarquer que la disparition d'une rangée de gouttes d'eau s'effectue, en moyenne, en deux temps. La figure III. 12e donne l'image d'une isolation

débarrassée de toutes ses gouttes des côtés des électrodes HT et terre sous une tension de l'ordre de 11 kV.

L'évolution de la tension d'essai provoquant l'expulsion en dehors de l'isolation de 4 x 5 gouttes d'eau en fonction de leur rang et leur destination, est illustrée par la figure III. 13. Son histogramme reflète un mode d'évacuation grupo-individuelle, bidirectionnelle des 20 gouttes d'eau. Celui-ci est subdivisé en 7 séquences. La première est caractérisée par une expulsion d'un groupe de 3 gouttes d'eau sous l'application à l'isolation d'une tension égale à 2.9 kV. Deux gouttes ont transité par l'électrode HT et une par celle mise à la terre. Lors de la deuxième séquences, 4 gouttes d'eau sont évacuées à l'extérieur de l'isolation dont 3 via l'électrode HT et une via à l'électrode terre. Ce groupe est suivi par l'éviction de 3 gouttes via l'électrode terre sous une tension égale à 5.5 kV. Puis s'ensuit une expulsion successive de 3 gouttes individuelles via l'électrode HT sous des tensions égales respectivement à 9.6, 10.5 et 10.8 kV. Enfin, un groupe de 7 gouttes d'eau est éjecté en dehors de l'isolation sous tension  $U_a = 11$  kV, dont 5 transitent par l'électrode terre et 2 par l'électrode HT. Il est à souligner que le nombre de gouttes expulsées via l'électrode HT et terre est le même que celui des gouttes transitées par l'électrode terre. Sachant que la tension efficace de contournement de l'isolation sans aucune goutte est de l'ordre de 39 kV, donc la tension d'essai entraînant l'évacuation de la dernière goutte la plus élevée est de l'ordre de 28 % de celle de contournement de l'isolation sèche (Tab. III. 1).

La valeur moyenne de la tension de contournement à sec de l'isolation a été déterminé conformément au Tableau III. 1.

Surface superhydrophobe sans gouttes d'eau	Nombre d'essais	Tension moyenne de contournement à sec (valeur efficace)	Conditions atmosphériques
Plaque n° 1	20	39 kV	$P_a = 1009$ hPa, $H_r = 64$ % $T = 22$ °C

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

Il est à signaler que ce mode d'évacuation n'est accompagné d'aucune création de décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation et aucun signe d'altération apparente de la surface de l'isolation n'a été décelé. La non diminution de l'angle de contact de l'isolation, mesuré en fin de chaque série d'essais ( $\theta_c = 160^\circ$ ) dénote la rétention de la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude.

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

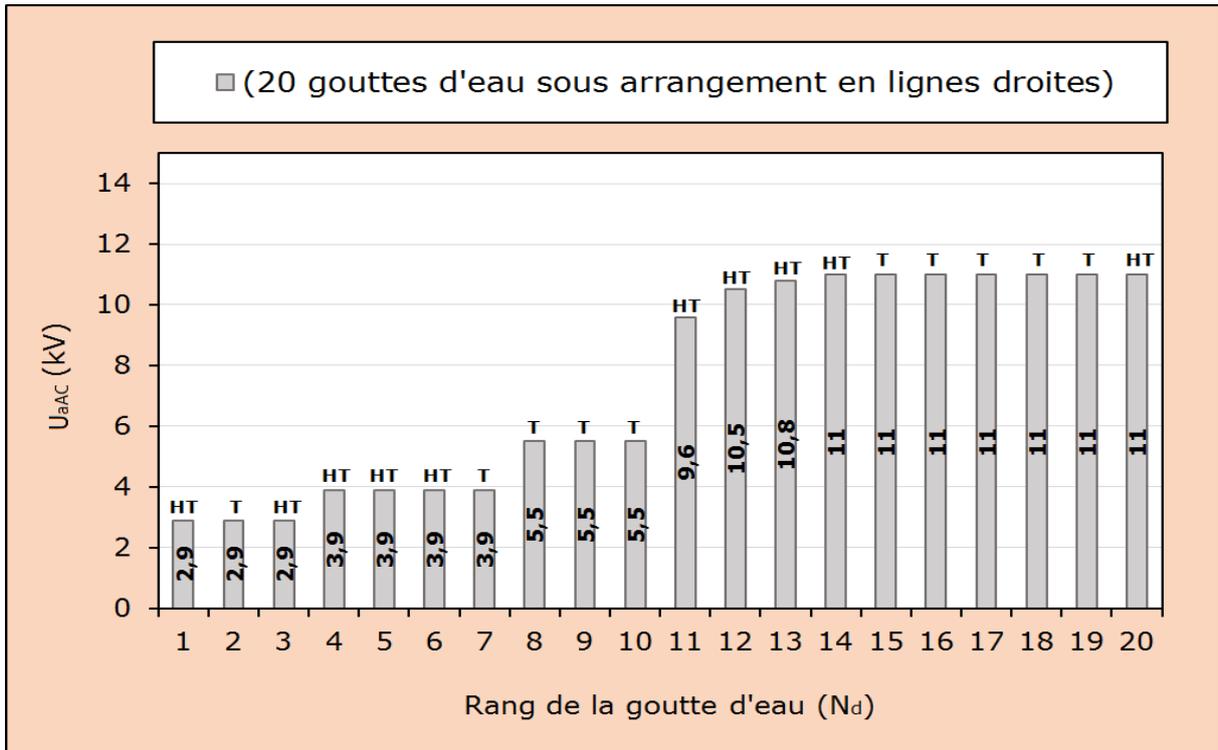


Fig. III. 13:  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour un arrangement en lignes droites de 4 rangées x 5 gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

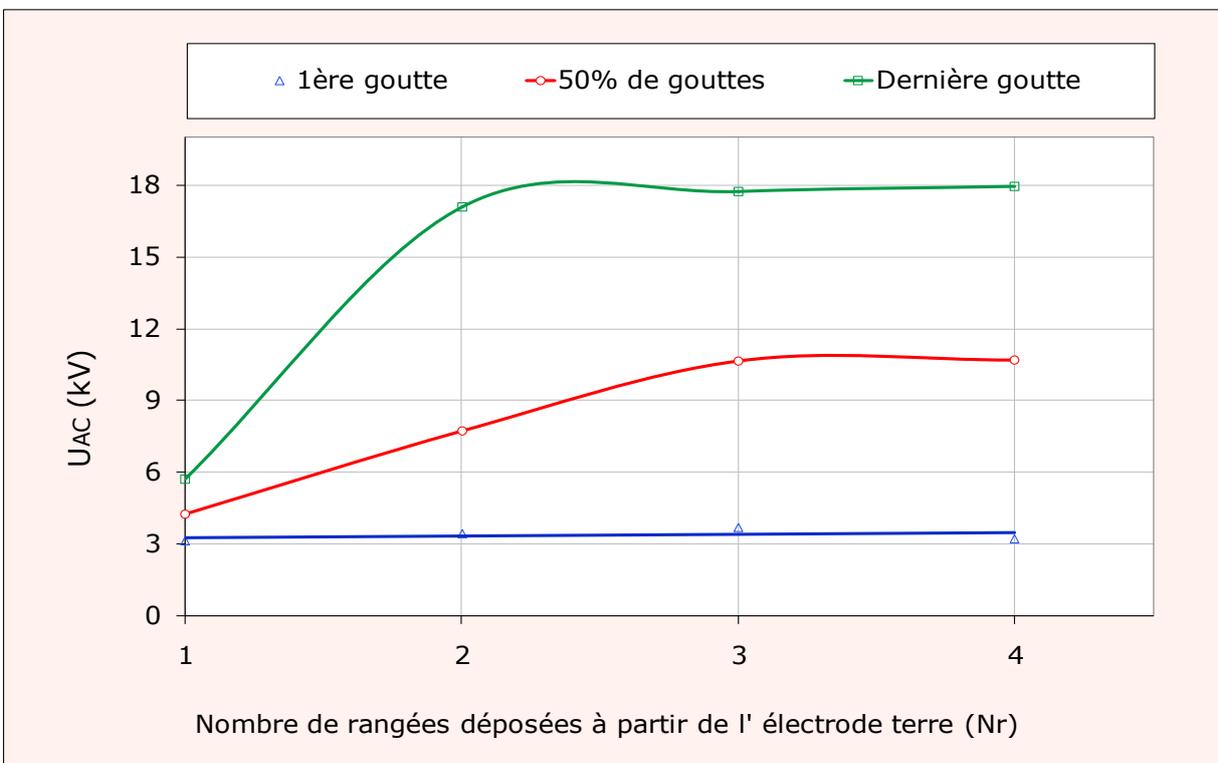
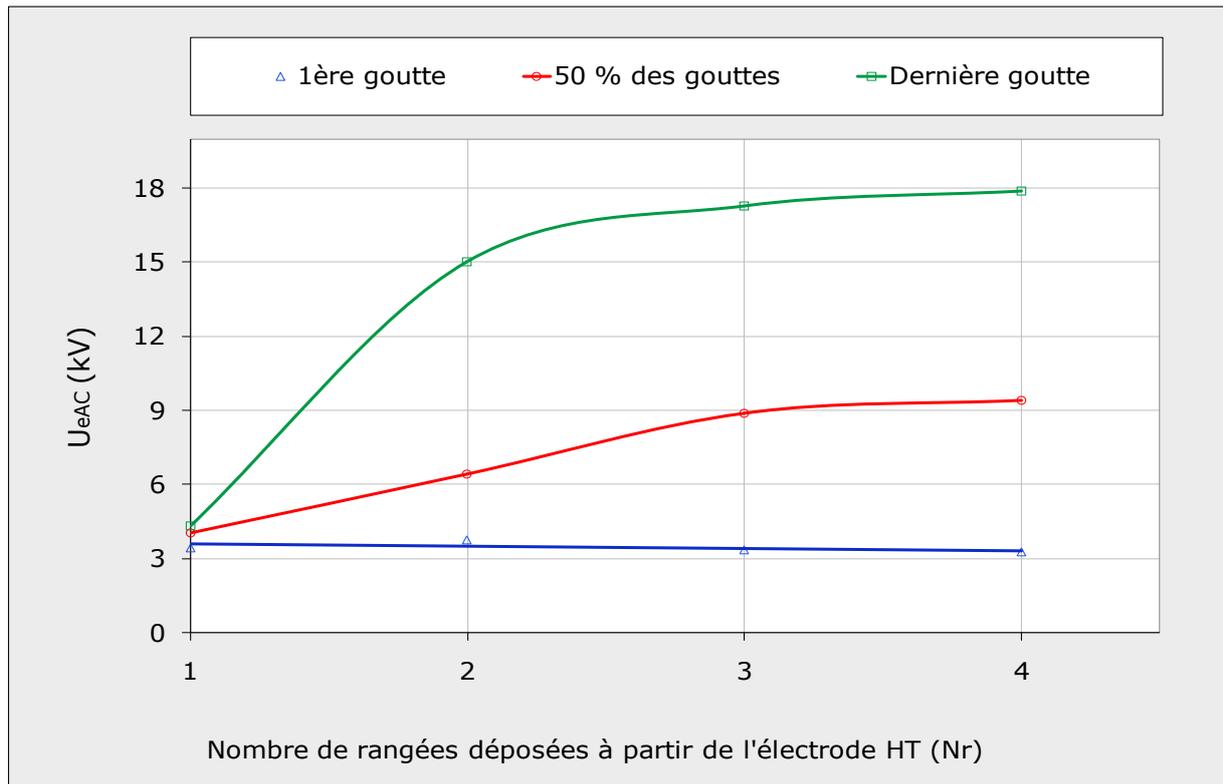


Fig. III. 14:  $U_{eAC} = f(N_r)$  pour une isolation superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau à partir de l'électrode terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

Les figures III. 14 et 15 donnent l'allure des tensions d'essai déclenchant l'expulsion de la première, la médiane et la dernière goutte en fonction du nombre de rangées et leur emplacement entre les deux électrodes. Il en résulte que la tension d'essai engendrant l'éjection en dehors de l'isolation de la première goutte est indépendante de sa localisation et du nombre de rangées apportées sur la surface de l'isolation. Sa valeur est de l'ordre de 3 kV, ce qui correspond à 7.7 % de la tension de contournement de l'isolation à l'état sec.

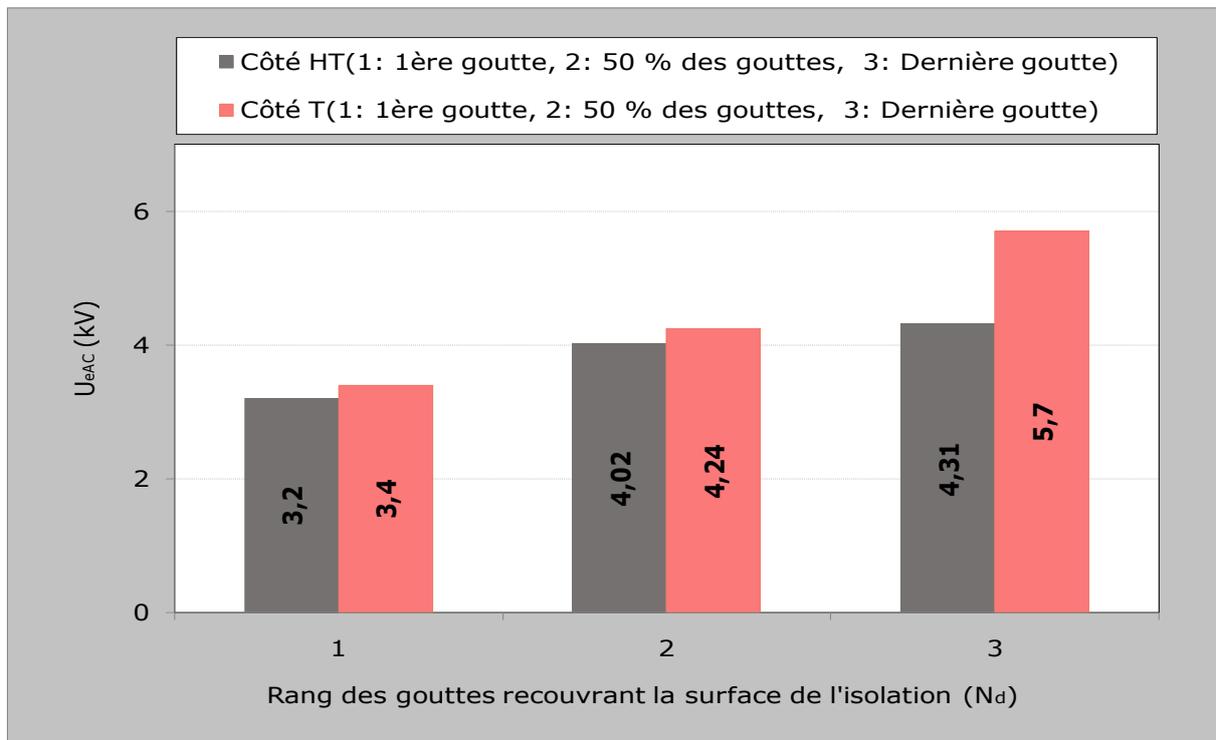


**Fig. III. 15:**  $U_{eAC} = f(N_r)$  pour une isolation superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau à partir de l'électrode sous tension ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

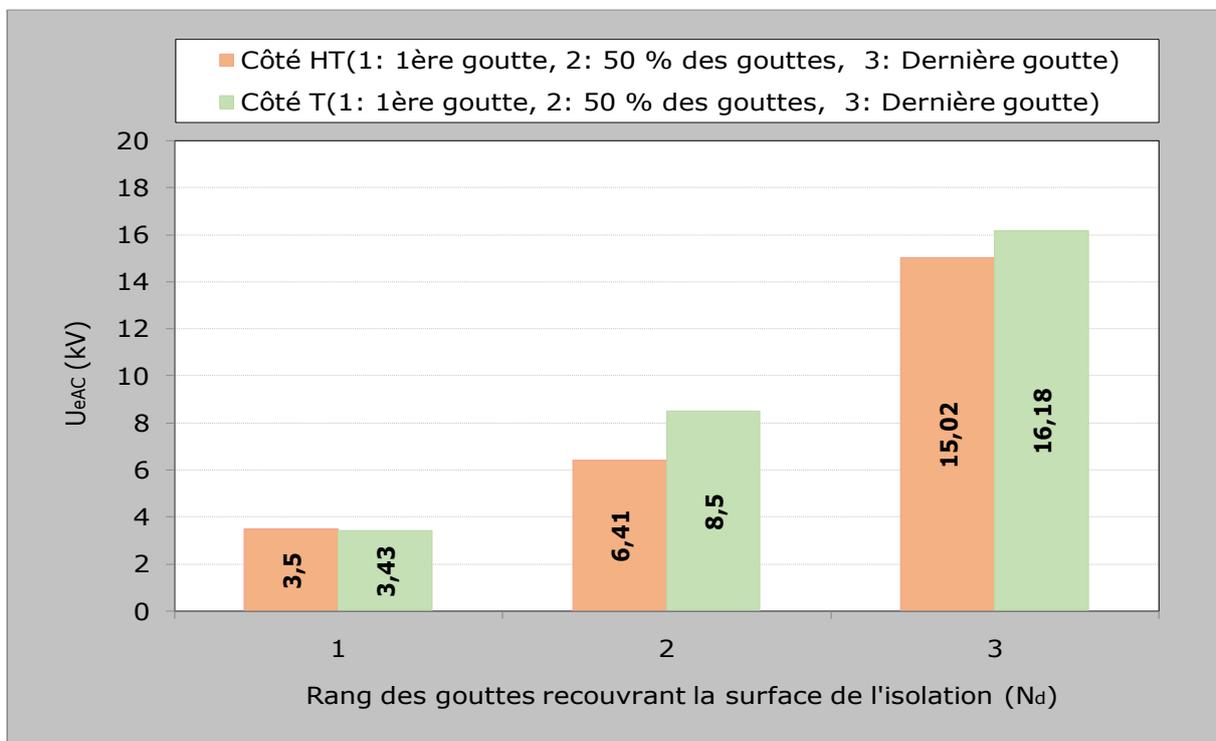
La tension d'essai lors de l'évacuation de la goutte médiane est, dans un premier temps, strictement croissante, puis au-delà d'un nombre de rangées égal à 3, celle-ci demeure constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées. L'évolution de la tension appliquée à l'isolation lors de l'éviction de la dernière goutte d'eau à l'extérieur de l'isolation est similaire à celle médiane. La seule différence réside au niveau du nombre de rangées limite qui est plus faible dans le premier cas de figure. L'expulsion de la dernière goutte a lieu pour une tension d'essai est de l'ordre de 46 % de celle de contournement de l'isolation à l'état sec.

Il ressort des histogrammes des figures III. 16, 17, 18 et 19 que quel que soit le nombre de rangées de gouttes d'eau apportées sur la surface d'isolation et leur emplacement sur celle-ci, les tensions d'essai entraînant l'évacuation des diverses gouttes d'eau de même rang sont

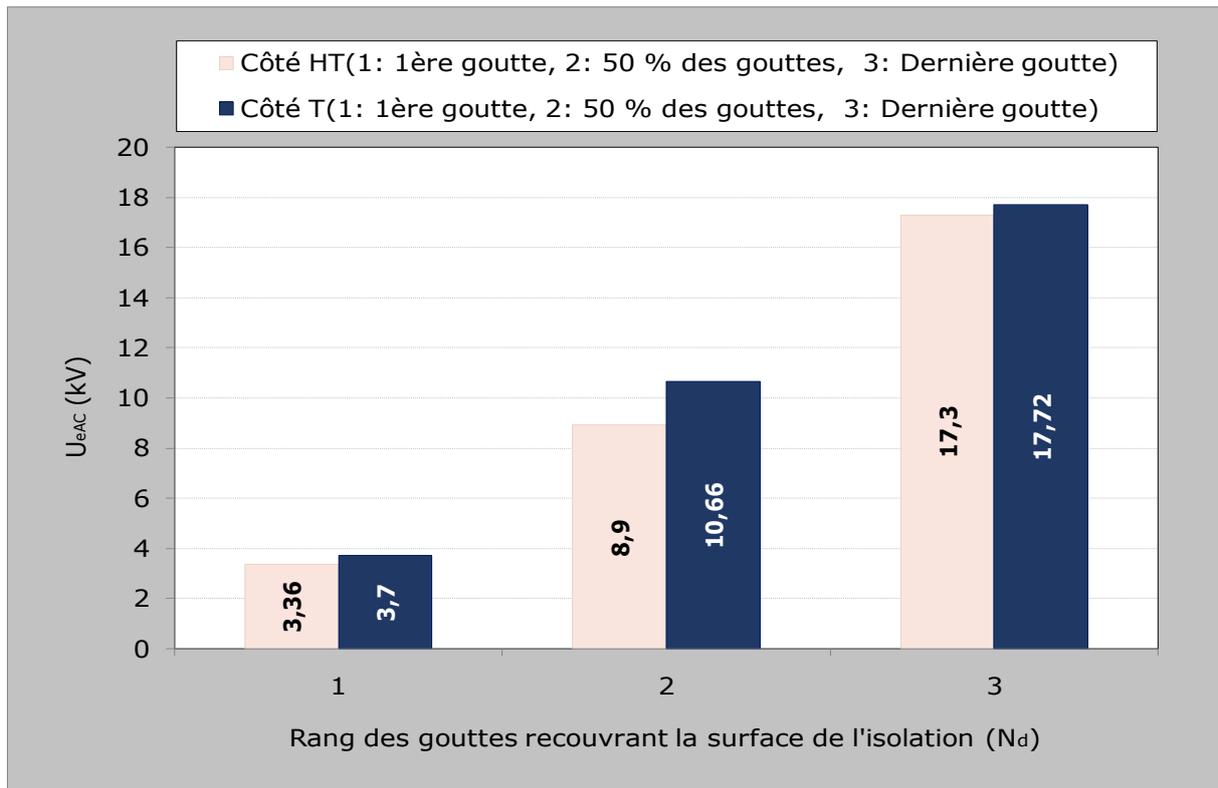
pratiquement les mêmes ou accusent une très légère différence entre elles, à cause de la succession temporelle des alternances positives et négatives sur chacune des deux électrodes.



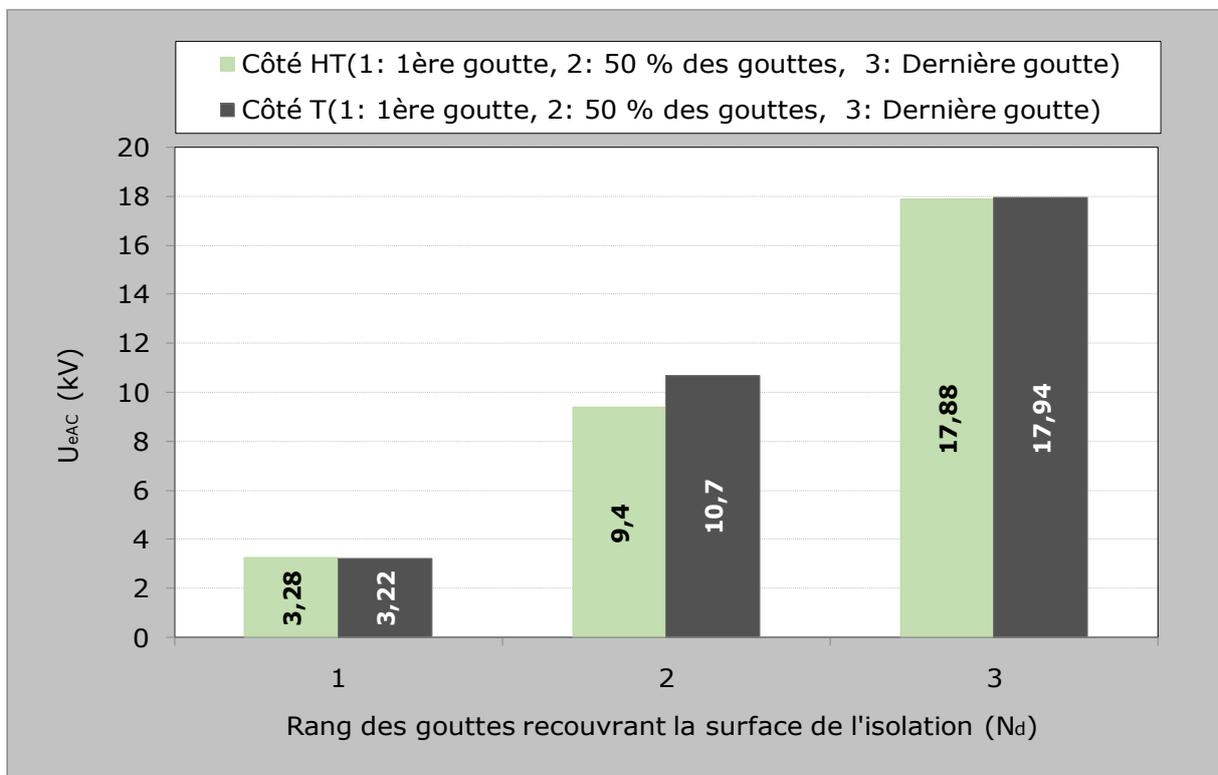
**Fig. III. 16:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour une rangée de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



**Fig. III. 17:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour deux rangées de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

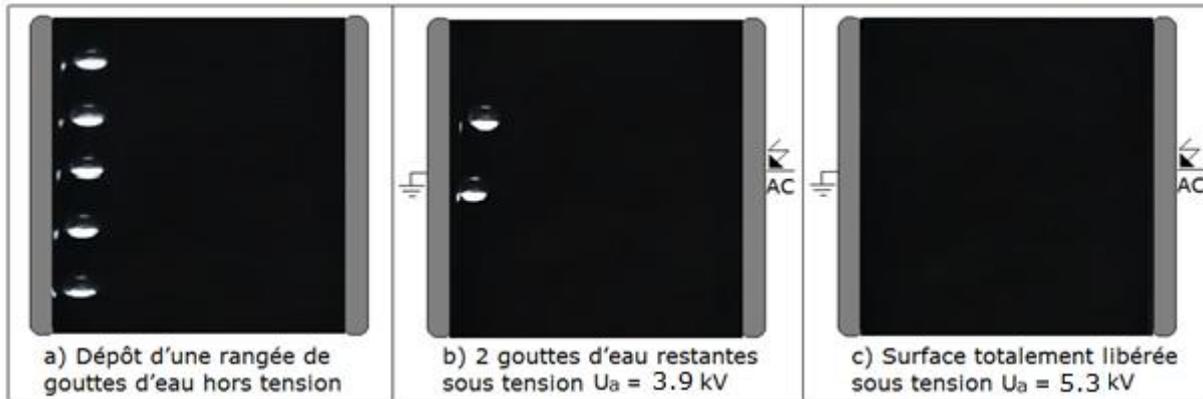


**Fig. III. 18:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour trois rangées de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )



**Fig. III. 19:**  $U_{eAC} = f(N_d)$  pour quatre rangées de gouttes d'eau et sa position au voisinage de l'électrode sous tension ou terre ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

Dans le cas d'une seule rangée de gouttes d'eau, déposée parallèlement au voisinage des électrodes terre et sous tension (Figs. III. 20a et III. 21a), l'évacuation intéresse en premier lieu les gouttes d'eau extrêmes de la rangée ensuite vient le tour de celles se trouvant à l'intérieur de celle-ci (Figs. III. 20b et III. 21b).



**Fig. III. 20:** Etapes essentielles d'évacuation des gouttes d'eau d'une rangée déposée au voisinage de l'électrode terre

L'éjection précoce des gouttes d'eau extrêmes d'une rangée est due à l'élévation de l'intensité du champ électrique aux extrémités des électrodes, à faible rayon de courbure, par rapport à leur centre. Au fur et à mesure de la croissance de la surface de recouvrement en gouttes d'eau et quel que soit le sens de son recouvrement, l'expulsion précoce des gouttes d'eau intéresse d'abord les rangées avoisinant les électrodes sous tension et terre, ensuite viennent les rangées intermédiaires rencontrées en allant vers le centre de l'isolation.

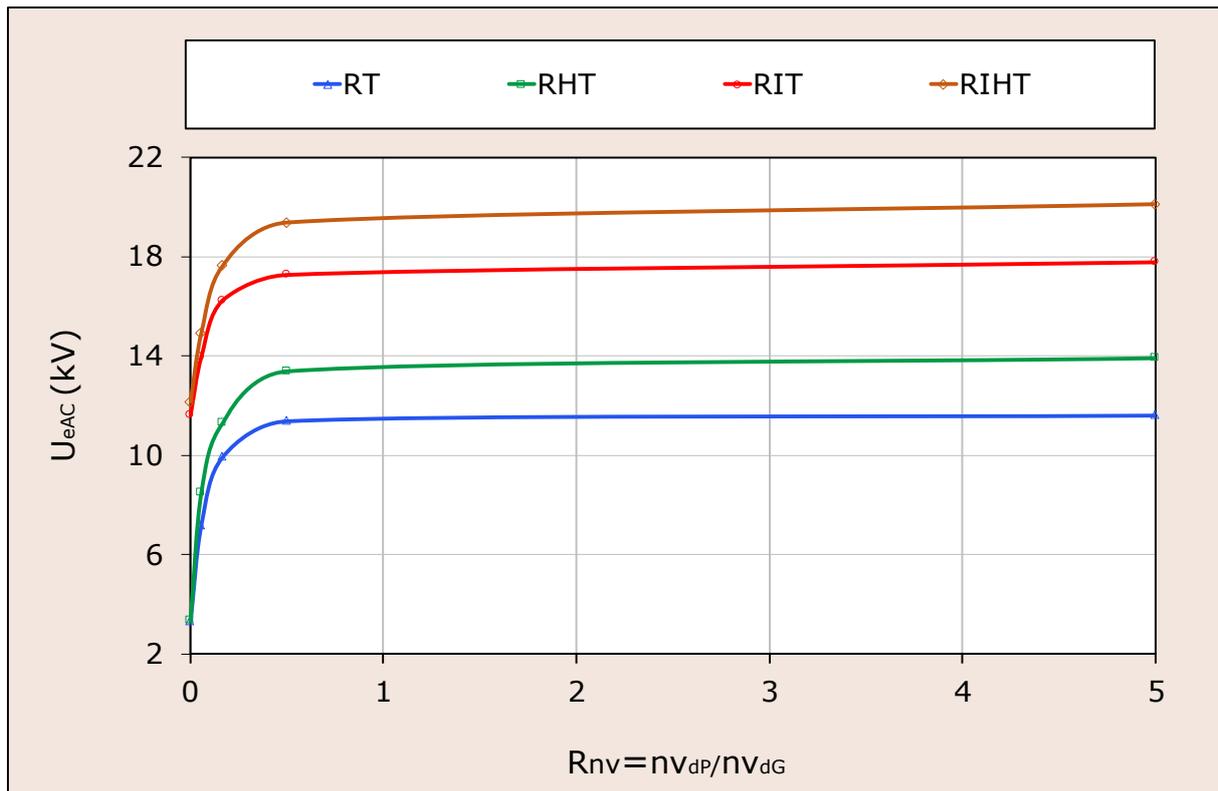
Il en résulte une augmentation de la tension d'essai engendrant l'éviction des gouttes d'eau en dehors du matériau en allant des électrodes HT et terre vers le milieu de l'isolation. Ces résultats sont très conformes à ceux établis lors de la simulation du champ et du potentiel électrique régnant sur une surface interélectrode superhydrophobe, recouverte de gouttes d'eau [88].



**Fig. III. 21:** Principales phases d'éjection des gouttes d'eau d'une rangée située au voisinage de l'électrode sous tension

### III. 3. 3 Non uniformité de répartition de la taille et du nombre de gouttes d'eau recouvrant l'isolation superhydrophobe

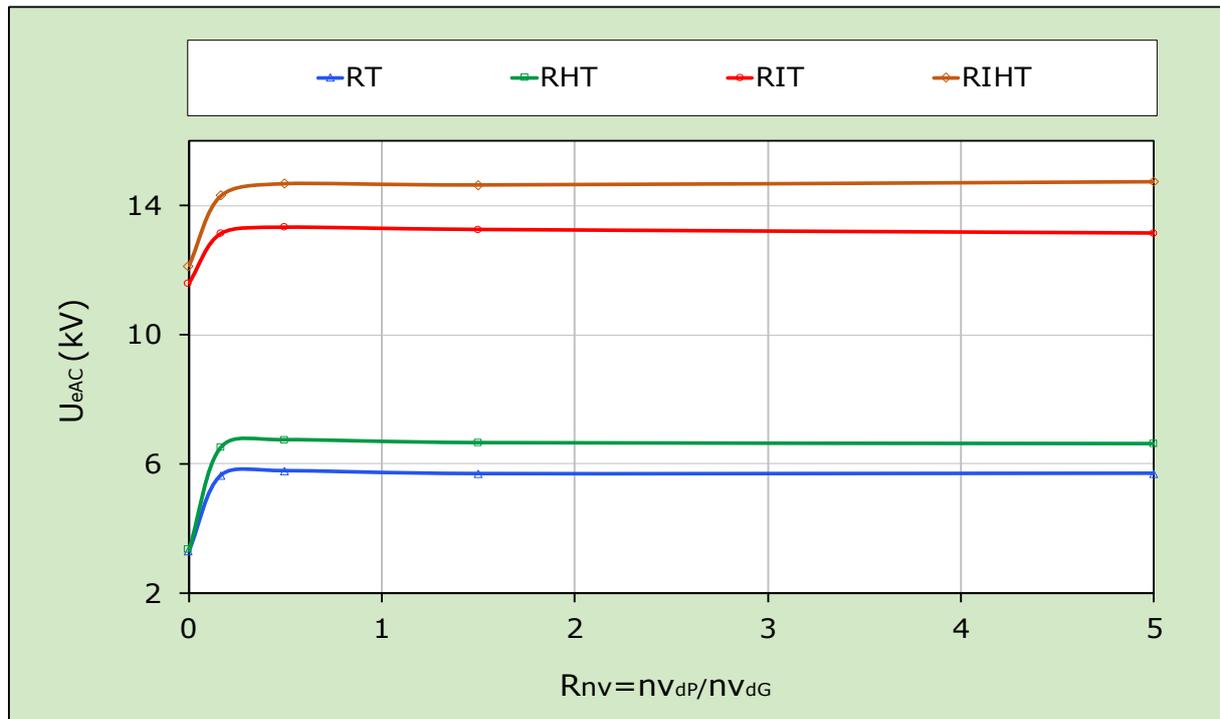
Les figures III. 22 et III. 23 donnent l'évolution de la tension d'essai entraînant l'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation en fonction du rapport des produits du nombre et le volume ( $R_{nv} = nv_{dp}/nv_{dG}$ ) des gouttes fines et volumineuses pour deux volumes différents des gouttes fines recouvrant la surface de l'isolation ( $V_p = 10$  et  $30 \mu\text{l}$ ).



**Fig. III. 22:**  $U_{eAC} = f(nv_{dp}/nv_{dG})$  et de l'emplacement des rangées sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{10}/V_{60}$ ). (RT : Rangée très proche de l'électrode terre, RHT : Rangée très proche de l'électrode HT, RIT : Rangée intermédiaire du côté terre, RIHT : Rangée intermédiaire côté HT)

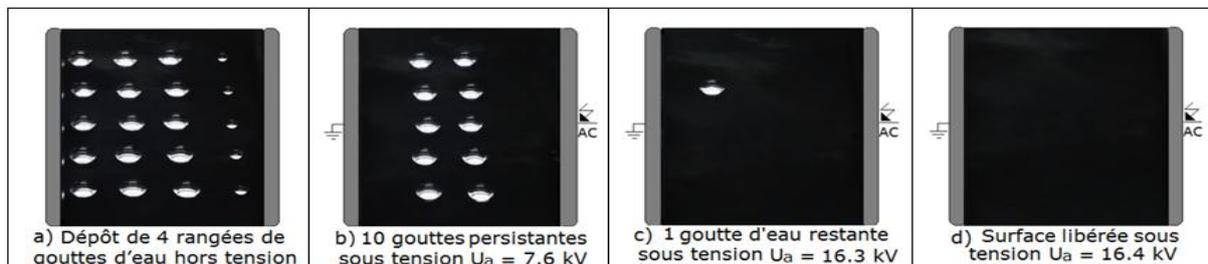
Il en découle que la tension d'essai entraînant l'expulsion des gouttes d'eau croît dans un premier temps jusqu'à une limite ( $R_{nv}$ ) fonction du rapport du volume de la goutte d'eau fine sur celui de la volumineuse ( $R_v$ ). Dans le cas où le rapport  $R_v$  est égal à  $10/60$ , celle-ci est de l'ordre de 0.5, par contre pour  $R_v = 30/60$ , elle est de 0.17. Au-delà de ces deux limites, cette tension demeure pratiquement constante. Il est à constater l'accroissement de sa valeur en fonction de la position de la rangée de gouttes d'eau en allant des électrodes sous tension et terre vers le centre de l'isolation. Comme il a été dit précédemment, le champ et le potentiel électrique décline dans le sens des électrodes sous tension et terre vers le milieu de l'isolation [88]. De plus, d'une part, la distorsion du champ électrique est plus accentuée par les gouttes

volumineuses que fines. D'autre part, l'expulsion des gouttes de petites taille nécessitent une tension d'essai plus élevée à cause de leur facilité d'encastrement entre les aspérités de la surface superhydrophobe. Les figures III. 24 et III. 25 résument en quelques phases essentielles le mode d'éviction de l'isolation d'un certain nombre de gouttes non uniformément réparties selon 2 variantes:  $3R_{V60}R_{V10}$  (Fig. III. 24) et  $R_{V60}3R_{V10}$  (Fig. III. 25).



**Fig. III. 23:**  $U_{eAC} = f(nv_{dp}/nv_{dg})$  et de l'emplacement des rangées sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{30}/V_{60}$ ). (RT: Rangée proche de l'électrode terre, RHT: Rangée proche de l'électrode HT, RIT: Rangée intermédiaire du côté terre, RIHT: Rangée intermédiaire côté HT)

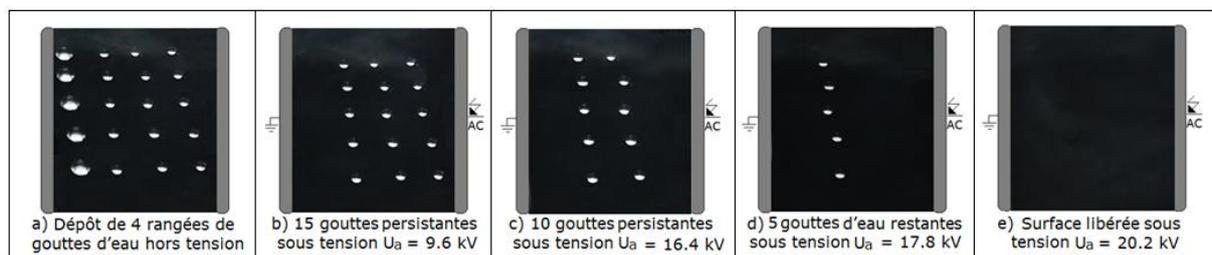
Le volume n'exerce aucune influence sur la formation de décharge électrique partielle et/ou de contournement de l'isolation et aucune dégradation de l'isolation n'a été révélée. La stabilité de l'angle de contact de l'isolation, prouve la conservation de sa superhydrophobie.



**Fig. III. 24:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition des volumes  $3R_{V60}R_{V10}$  sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{10}/V_{60}$ )

Il en résulte un mode d'évacuation similaire à celui obtenu dans le cas d'une distribution uniforme de la taille et le nombre de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation. Dans le cas

d'une surabondance de gouttes fines et leur emplacement dans la zone intermédiaire aux électrodes sous tension et terre, la tension appliquée à l'isolation est plus élevée que dans le cas contraire, mais sa valeur maximale ne dépasse pas 52 % de celle de contournement de la même isolation sans ces gouttes. Il est à signaler que lors de l'éjection de ces gouttes selon une telle configuration, aucune apparition, ni de décharges électriques partielles ou de contournement de l'isolation, ni une forme de trace de sa dégradation n'a été détectée. Les essais ont été répétés plusieurs fois sans aucune diminution de l'angle de contact ou de perte de superhydrophobie du matériau.



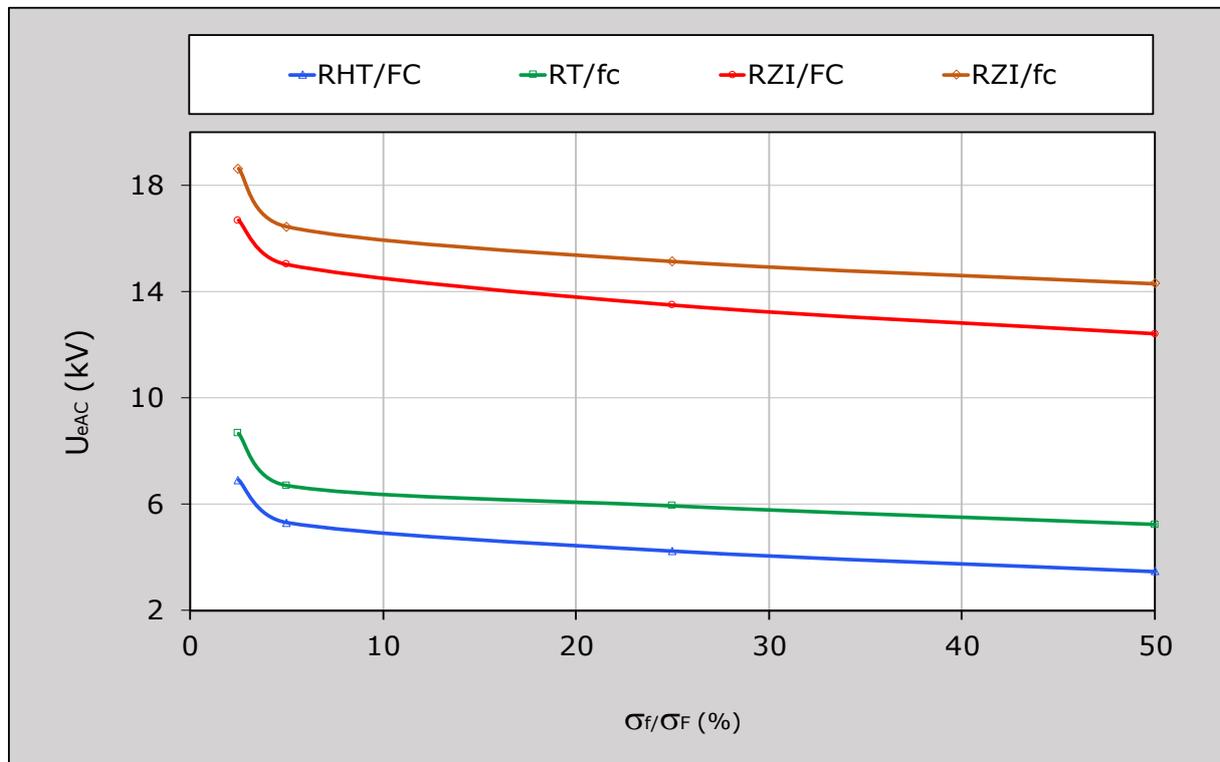
**Fig. III. 25:** Principales phases d'éjection des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition des volumes  $R_{V60}3R_{V10}$  sur la surface de l'isolation ( $R_v = V_{10}/V_{60}$ )

### III. 3. 4 Non uniformité des conductivités électriques des deux zones de l'isolation

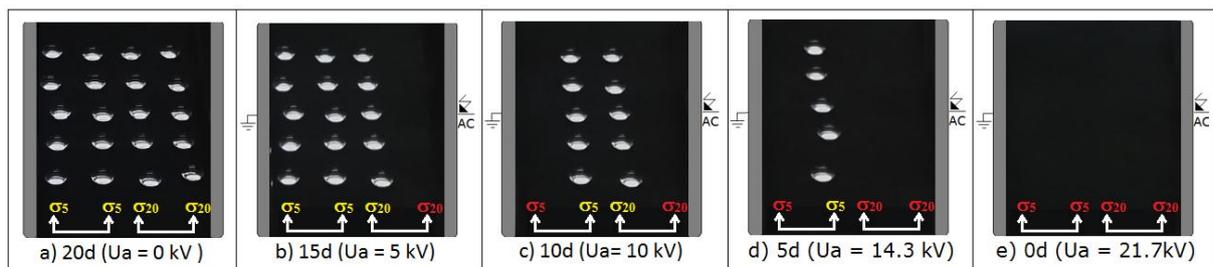
La figure III. 26 donne l'allure de la tension d'essai provoquant l'éjection des gouttes d'eau en dehors des zones de l'isolation en fonction du rapport des conductivités électriques ( $R_\sigma = \sigma_f/\sigma_F$ ) et l'emplacement de la rangée sur la surface de l'isolation. Il en résulte son déclin jusqu'à une valeur limite de la conductivité électrique, de l'ordre de 5 mS/cm et au-delà de laquelle celle-ci demeure pratiquement constante quelle que soit la position de la rangée sur celle-ci. Dans le cas d'une faible conductivité électrique des gouttes d'eau, les lignes du champ ne traversent pas celles-ci, ce qui nécessite une tension d'essai plus importante dans ce cas de figure.

Les figures III. 27 et III. 28 décrivent les séquences essentielles d'évacuation en dehors de l'isolation de rangées de gouttes d'eau à rapports de conductivité électrique égaux respectivement à 25 et 50 %. Il en ressort que quel que soit ceux-ci, l'éjection concerne tout d'abord les gouttes de la rangée à forte conductivité, avoisinant l'électrode HT (Figs. III. 27b et III. 28b). Cette séquence est suivie de l'éviction de la rangée de gouttes d'eau à faible conductivité au voisinage proche de l'électrode terre (Figs. III. 27c et III. 28c). Durant la séquence suivante, l'évacuation intéresse les gouttes d'eau à forte conductivité de la rangée intermédiaire à l'électrode HT (Figs. III. 27d et III. 28d). En dernier lieu vient la rangée de

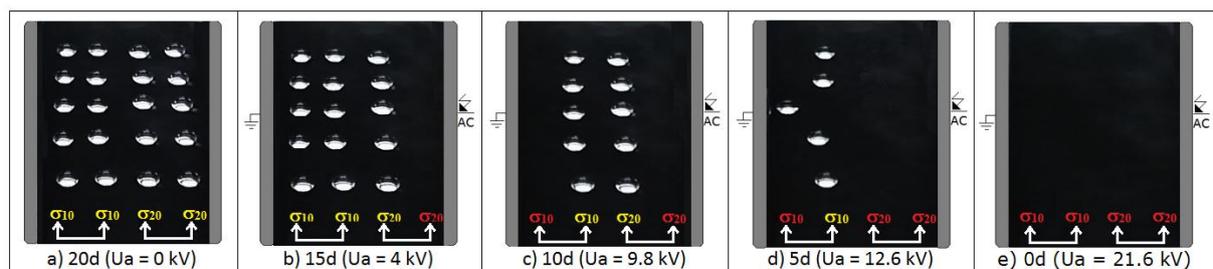
gouttes d'eau conductivité faible se trouvant dans la zone intermédiaire à l'électrode terre (Figs. III. 27e et III. 28e).



**Fig. III. 26:**  $U_{eAC} = f(\sigma_f/\sigma_F)$  et de l'emplacement des rangées sur la surface de l'isolation (RHT/FC: Rangée proche de l'électrode HT à forte conductivité, RT/fc: Rangée proche de l'électrode terre à faible conductivité, RZIHT/FC: Rangée de la zone intermédiaire du côté HT, RZIT/fc: Rangée de la zone intermédiaire du côté T)



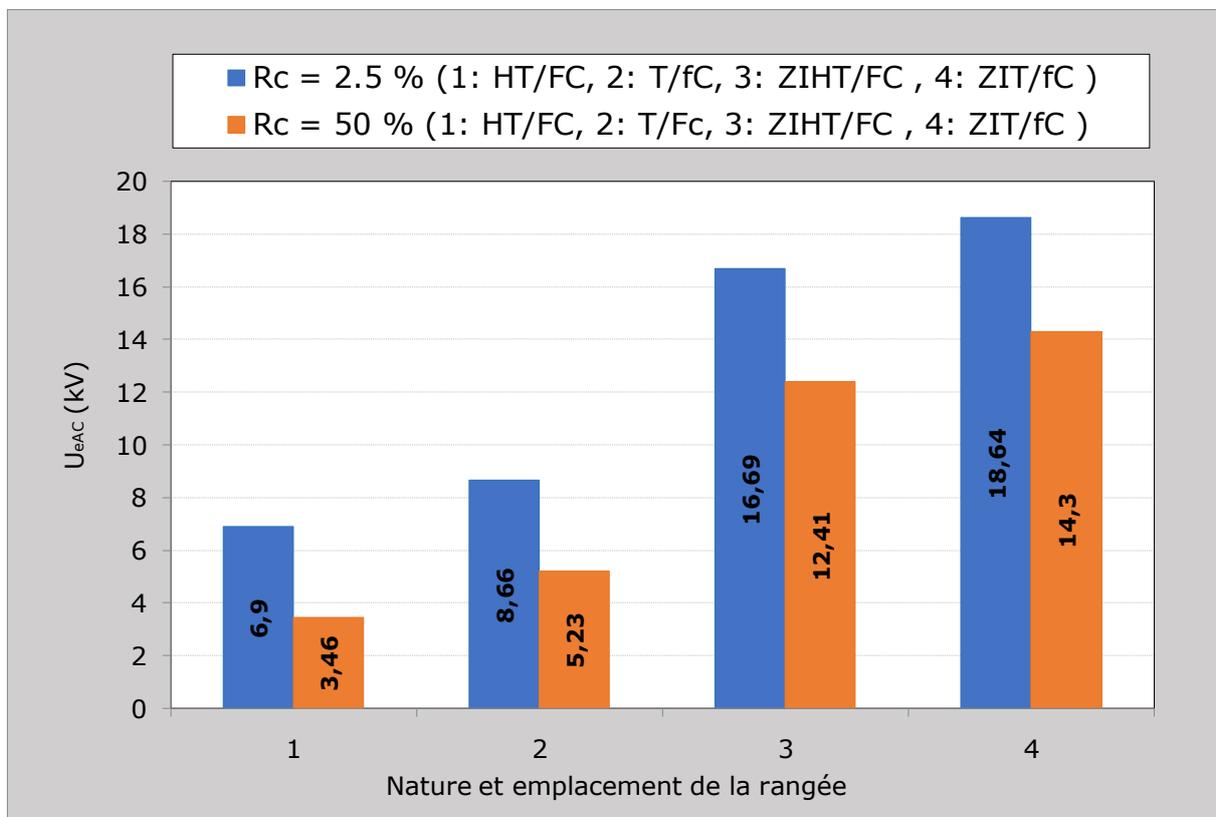
**Fig. III. 27:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité du degré de pollution  $2R_{\sigma_5}2R_{\sigma_{20}}$  ( $R_{\sigma} = \sigma_5/\sigma_{20}$ ,  $\Delta C_k = 0$  g/l,  $V_d = 60$   $\mu$ l)



**Fig. III. 28:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité du degré de pollution  $2R_{\sigma_{10}}2R_{\sigma_{20}}$  ( $R_{\sigma} = \sigma_{10}/\sigma_{20}$ ,  $\Delta C_k = 0$  g/l,  $V_d = 60$   $\mu$ l)

Il est à constater que dans l'intervalle du rapport du degré de non uniformité de conductivités électriques des deux zones de l'isolation, l'expulsion des gouttes d'eau, n'a aucun moment été suivie de toute forme de décharges électriques pouvant engendrer une quelconque altération du matériau exploité malgré la réalisation d'un nombre assez élevé d'essais. Ceci est confirmé par la non variation de son angle de contact.

Il ressort de l'histogramme illustré par la figure III. 29 que quels que soient la nature et l'emplacement de la rangée de gouttes d'eau sur la surface interélectrode, la tension d'évacuation des gouttes d'eau est plus élevée pour un rapport de conductivité de l'ordre de 2,5 % que pour celui de 50 %.



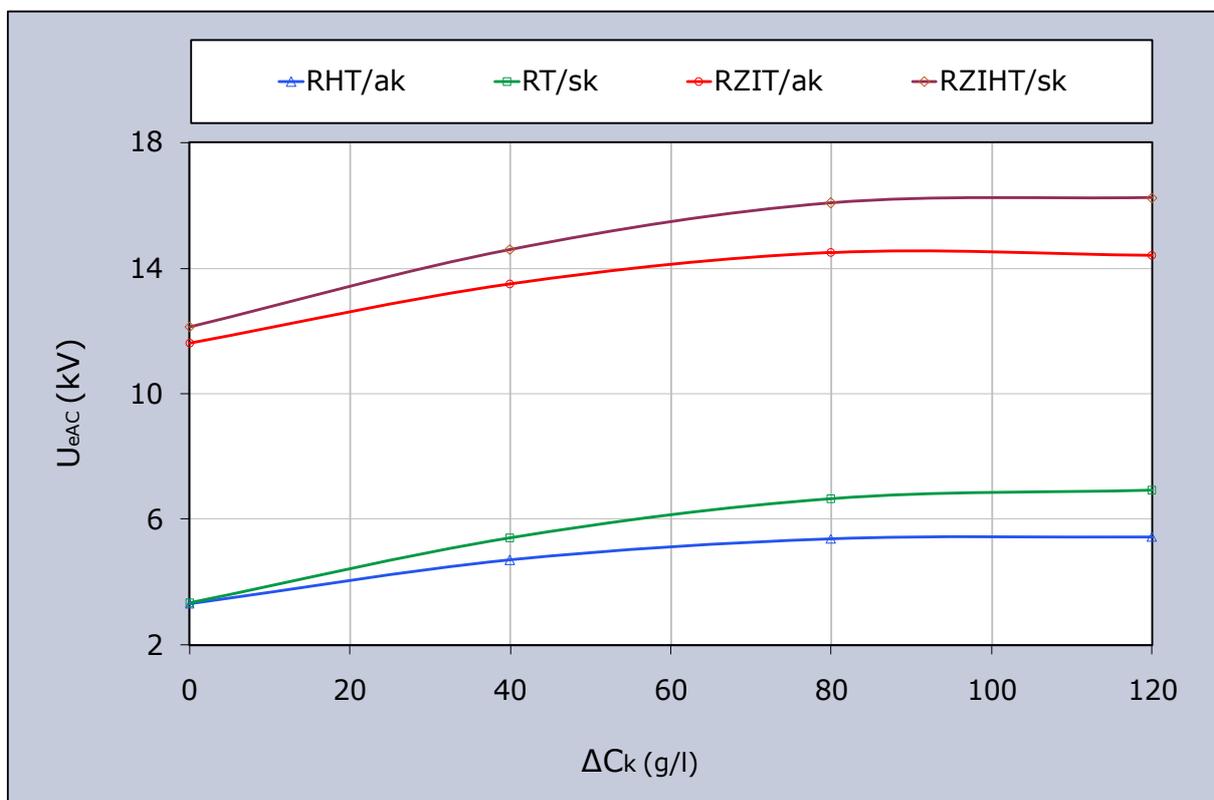
**Fig. III. 29:** Tension d'essai entraînant l'expulsion des rangées de gouttes d'eau en fonction de leur nature et emplacement sur la surface de l'isolation ( $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $C_k = 0 \text{ g/l}$ ,  $\sigma_v = 0.5$  et  $10 \text{ mS/cm}$ )

### III. 3. 5 Non uniformité du degré de concentration en kaolin des gouttes d'eau des deux zones de l'isolation

La figure III. 30 donne l'allure de la tension d'essai engendrant l'éjection des gouttes d'eau en dehors des zones de l'isolation, en fonction du degré de concentration en kaolin de la solution utilisée et la position des rangées sur la surface d'isolation. Il en découle une allure strictement croissante jusqu'à une valeur limite de  $\Delta C_k = 80 \text{ g/l}$ , au-delà de laquelle celle-ci

demeure pratiquement constante quelle que soit la nature de la rangée. Cette tension augmente au fur à mesure du déplacement de la rangée du voisinage des électrodes sous tension et terre vers la zone intermédiaire de l'isolation superhydrophobe.

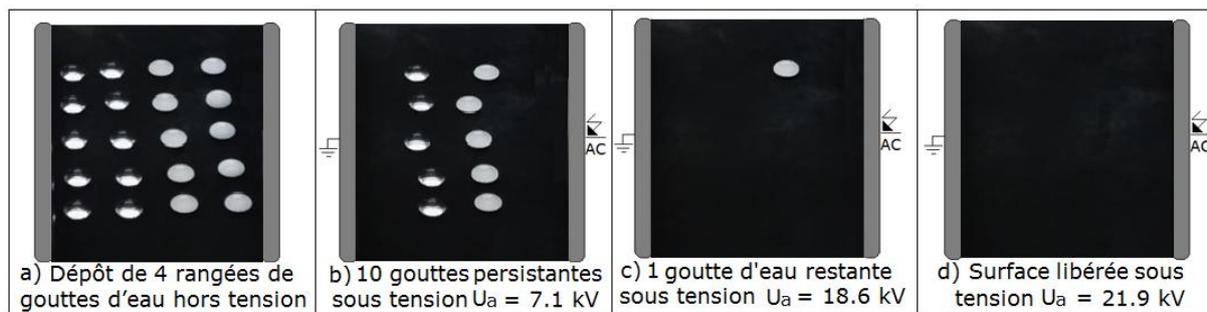
Son élévation avec la croissance de la concentration en kaolin de la solution peut être expliquée par le fait que les gouttes les plus visqueuses par conséquent plus lourdes, cèdent partiellement une certaine quantité du kaolin qui s'enfonce dans les profondeurs entre les aspérités de l'isolation, ce qui entraîne le collage des gouttes à ces points d'impact, par conséquent la tension appliquée à l'isolation se voit augmenter. Enfin, pour une concentration en kaolin quelconque de la solution, cette tension augmente avec l'emplacement de la rangée dans laquelle elles se trouvent (Fig. III. 30). Sa valeur maximale est de l'ordre de 56 % de la tension de contournement de l'isolation.



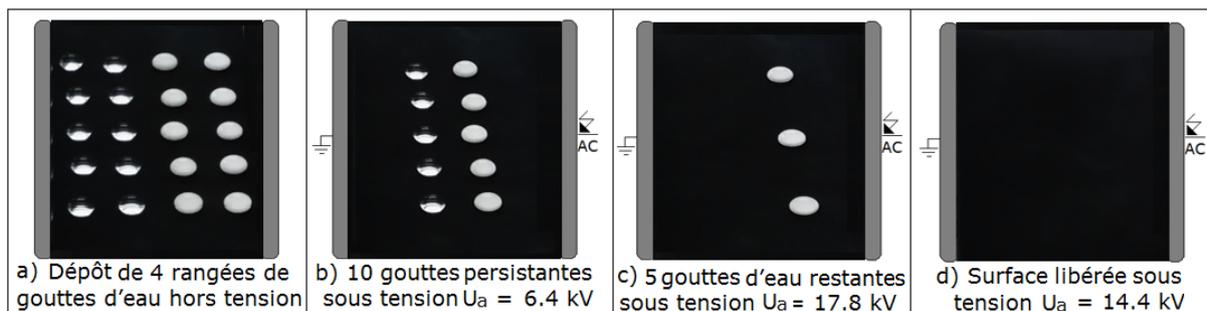
**Fig. III. 30:**  $U_{eAC} = f(\Delta C_k)$  et de la nature de la rangée (RHT/ak : Rangée très proche de l'électrode HT avec kaolin, RT/sk : Rangée très proche de l'électrode terre sans kaolin, RZIHT/ak : Rangée de la zone intermédiaire du côté HT avec kaolin, RZIT/sk : Rangée de la zone intermédiaire du côté T sans kaolin,  $V_d = 60 \mu\text{l}$ ,  $\sigma_v = 50 \mu\text{S/cm}$ )

Les figures III. 31 et III. 32 résument les séquences essentielles d'évacuation en dehors de l'isolation de rangées de gouttes d'eau à différents taux de concentration en kaolin. Il en résulte que quel que soit celui-ci, l'éjection concerne tout d'abord les gouttes de la rangée à 0 g/l de kaolin avoisinant l'électrode mise à la terre (Figs. III.31b et III.32b). Ensuite survient

l'éjection de la rangée de gouttes d'eau contenant du kaolin et se trouvant au voisinage proche de l'électrode sous tension (Figs. III. 31b et III. 32b). Durant la séquence suivante, l'évacuation intéresse les gouttes d'eau sans kaolin de la rangée intermédiaire à l'électrode terre (Figs. III. 31c et III. 32c). Enfin vient la rangée de gouttes d'eau avec kaolin se trouvant dans la zone intermédiaire à l'électrode sous tension (Figs. III. 31d et III. 32d).



**Fig. III. 31:** Etapes essentielles d'expulsion des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition  $2R_s/2R_k$  ( $C_k = C_k - C_0$ ,  $C_k = 40$  g/l)



**Fig. III. 32:** Principales phases d'éjection des gouttes d'eau selon la variante de non uniformité de répartition  $2R_s/2R_k$  ( $C_k = C_k - C_0$ ,  $C_k = 120$ g/l)

Il est à remarquer que le kaolin n'exerce aucune influence sur la naissance de décharges électriques partielles et/ou de contournement de l'isolation et absence de trace d'altération de l'isolation. La constance de l'angle de contact du matériau, prouve la rétention de sa superhydrophobie.

### III. 4 Conclusion

L'objectif recherché à travers ce chapitre consiste en l'étude de l'effet de la distribution de la taille des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension alternative. A cet effet des échantillons du matériau superhydrophobe à angle de contact, de l'ordre de  $160^\circ$ , ont été fabriqués par nous-mêmes. La visualisation du phénomène électrohydrodynamique des gouttes d'eau recouvrant cette isolation en position

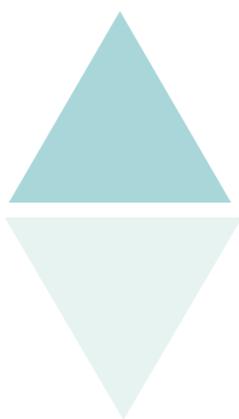
horizontale a mis en évidence l'apparition du mode d'expulsion groupe-individuelle et bidirectionnelle de ces perles d'eau à l'extérieur de celle-ci.

Comparativement aux résultats issus des travaux antérieurs, concernant le profil des électrodes HT et terre, un nouveau jeu d'électrodes a été confectionné. Ces électrodes sont surélevées d'une hauteur de 10 mm par rapport à la surface de l'isolation de telle sorte à créer une ouverture facilitant l'évacuation des gouttes d'eau en dehors de l'isolation sous l'action d'un champ électrique alternatif et leur récupération au niveau du bac de rétention d'eau. Les électrodes fabriquées sont parallélépipédiques pleines et arrondies à leurs extrémités.

La quantification de l'influence de certains paramètres électrogéométriques des gouttes d'eau non uniformément distribuées sur la surface de l'isolation suscitée en position horizontale a conduit aux résultats essentiels suivants :

- Pour un rang quelconque d'une goutte d'eau (première, médiane, dernière), sa tension augmente en fonction de celui-ci. Sa valeur est maximale lorsque celle-ci se trouve dans la zone médiane de l'isolation superhydrophobe sont toutefois excéder 46 % de la tension du contournement de l'isolation.
- La tension d'essai déclenchant l'expulsion d'une goutte d'eau croit avec son éloignement des deux électrodes vers la zone intermédiaire.
- La tension d'essai engendrant l'expulsion des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur volume quelle que soit leur répartition sur les deux zones composant l'isolation mais ne dépasse pas 52 % de sa tension de contournement sous atmosphère sèche.
- La tension d'essai déclenchant l'éjection des gouttes d'eau décroît avec l'élévation du rapport de leurs conductivités électriques.
- La tension d'essai entraînant l'éviction des gouttes d'eau recouvrant l'isolation en deux zones non uniformes augmente avec l'accroissement de leur viscosité jusqu'à a une valeur limite au-delà de laquelle celle demeure constante est inférieur 56 % de sa tension de contournement sans ces gouttes.

Enfin la variation de toutes ces grandeurs n'influe pas sur la performance électrique de l'isolation car la tension appliquée à l'isolation dans le cas le plus défavorable représente au maximum 56 % de la tension de son contournement à l'état sec et à aucun moment de ces multiples essais n'a été observé une forme de décharge partielle et/ou de contournement du matériau et aucun signe de dégradation du matériau n'a été signalé. Ceci milite évidemment pour l'emploi d'une telle isolation pour l'isolement des équipements électriques et industriels.



# **Conclusion Générale**



Notre projet de fin d'étude nous a permis de comprendre que le meilleur moyen de mettre fin à la pollution des isolateurs de haute tension, est l'utilisation des isolations à surface superhydrophobe. L'injection de cette idée dans le domaine de l'énergie électrique pourrait éventuellement assurer une meilleure performance au réseau électrique. La SSH est le profil le plus adéquat, permettant l'évacuation en dehors de sa surface de toute sorte d'humidité entrant en contact avec celle-ci.

L'objectif de notre travail était justement de fabriquer une isolation ayant une surface superhydrophobe ainsi qu'un profil d'électrodes convenable afin de pouvoir réaliser des expériences de simulation du phénomène de condensation avec celle-ci. Ce dernier se traduit par une constellation non uniforme de la taille, de la conductivité et de la viscosité des gouttes d'eau sur une isolation à surface superhydrophobe, se formant sur celle-ci lors de ce phénomène naturel.

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

- La tension d'essai engendrant l'expulsion des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur volume quelle que soit la distribution non uniforme de leur taille sur la surface de l'isolation, mais sans toutefois dépasser 52 % de sa tension de contournement sous atmosphère sèche.
- La tension appliquée à l'isolation entraînant l'éviction à l'extérieur de la surface de l'isolation des gouttes d'eau, décline avec l'accroissement du degré de contamination des différentes zones composant l'isolation considérée.
- La tension d'essai pour la quelle il y ait l'évacuation des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation en deux zones non uniformes croît avec le degré de viscosité des gouttes d'eau jusqu'à une valeur limite au-delà de laquelle celle-ci demeure constante et reste inférieur à 56 % de sa tension de contournement sans ces gouttes.

Enfin la variation de tous ces paramètres n'exerce aucune influence sur la performance électrique de l'isolation car la tension appliquée à l'isolation dans le cas le plus défavorable représente au maximum 56 % de la tension de son contournement à l'état sec et à aucun moment de ces multiples essais n'a été observé une forme de décharge partielle et/ou de contournement du matériau et aucun signe de dégradation du matériau n'a été décelé. Ceci milite évidemment pour l'emploi d'une telle isolation pour l'isolement des équipements électriques et industriels.



# **Références bibliographiques**

- [1] <https://tpesuperhydrophobiemgs.wordpress.com/>, consulter le 25/02/2018.
- [2] P. Dellise, L. Fache, “Olympiade de physique 2015”, Lycée des Flandres Hezbrouck, 2015.
- [3] P.A. Tipler, G. Mosca, Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, (La physique à l'intention des scientifiques et ingénieurs) 2e édition allemande, éditions Spektrum Akademischer Verlag, 2004.
- [4] Thomas Young, “An essay on the cohesion of fluids”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 95: 65–87, 1805.
- [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] Johann Gottlob Leidenfrost. “De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus”, Ovenius, 1756.
- [7] E. Guerret, E. Moncada, “superhydrophobie”, Olympiades de physique lycée Clément Marot Cahors, 2014-2015
- [8] Informations complémentaires de l'élève relatives à l'expérience D, “matériaux superhydrophobes”, communauté européenne (FP7/ 2007-2013), selon l'accord de subvention n° 233433.
- [9] M. A. Samaha and M. Gad-el-Hak 2, “Polymeric Slippery Coatings: Nature and Applications *Polymers* 2014”, 6, 1266-1311; doi:10.3390/polym605126
- [10] X. j. Feng, *Adv Mater*, 2006, 18, 3063-78.
- [11] Xuefeng Gao, Xin Yan, Xi Yao, Liang Xu, Kai Zhang, Junhu Zhang, Bai Yang, and Lei Jiang. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. *Advanced Materials*, 19(17): 2213–2217, 2007.
- [12] Tengfei Xiang, Manxin Zhang, Cheng Lia facile method for fabrication of superhydrophobic “surface with controllable water adhesion and its applications”, *Journal of b Alloys and Compounds* 704 (2017)170e179.
- [13] Nan Wang,a,b,c, Dangsheng Xiong,a,b,c,\*, Mengtong Lia, Yaling Deng,a, Yan Shib,Kun Wang, “Superhydrophobic surface on steel substrate and its anti-icing property in condensing conditions”, *Applied Surface Science* 355 (2015)226–232.
- [14] Saleema, N. Sarkar, D.K. Gallant, D. Paynter, R.W. ; Chen, X.G, “Chemical nature of superhydrophobic aluminum alloy surfaces produced via a one-step process using fluoroalkyl- silane in a base medium”, *ACS Appl. Mater. Interfaces* (2011), 3, 4775-

4781.

- [15] Sarkar, D.K.; Saleema, N., “One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings”, *Surf.Coat. Technol.* (2010), 204,2483-2486.
- [16] Lau, K.K.S.; Bico, J.; Teo, K.B.K.; Chhowalla, M.; Amaratunga, G.A.J.; Milne, W.I.; “Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests”, *Nano Lett.* (2003), 3,1701-1705.
- [17] Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Mater. Lett.*, “A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces”, (2010), 64,2722-2724.
- [18] Sarkar, D.K.; Farzaneh, M.; Paynter, R.W., *Mater.*, “Superhydrophobic properties of ultrathin rf-sputtered Teflon films coated etched aluminum surfaces”, *Lett* (2008),62,1226-1229.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] A. Kuechler, “Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen”, 3<sup>ème</sup> édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [22] La forte, 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.
- [23] R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water”, *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no. 8, pp. 988-994, 1936.
- [24] A. Cassie and S. Baxter, “Wettability of porous surfaces”, *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, pp. 546-551,1944.
- [25] F. Z. Madidi, “Élaboration de revêtements nanocomposites avec des propriétés superhydrophobes, semi-conductrices et photo catalytiques”, Université du Québec Chicoutimi, Novembre2016.
- [26] H. Liu et all, “Recent Progress in Fabrication and Applications of Superhydrophobic Coating on Cellulose-Based Substrates” *Materials*, vol. 9, no. 3, p. 124,2016.
- [27] A. Tuteja et all, “Robust omniphobic surfaces”, *Proceedings of the National Academy*

- of Sciences, vol. 105, no. 47, pp. 18200-18205,2008.
- [28] B. He; J. Lee; N. A. Patankar, “Contact angle hysteresis on rough hydrophobic surfaces”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 248, no. 1, pp. 101- 104, 2004.
- [29] M. Zhou, X. Pang, and K. Gao, “Fabrication of a Superhydrophobic Film with Self-Cleaning Property on Magnesium Alloy and Its Corrosion Resistance Properties,” *Magnesium Technology 2016*, pp. 279-283,2016.
- [30] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, and Z. Wang, “Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application”, *Journal of Materials Chemistry*, vol. 18, no. 6, pp. 621-633,2008.
- [31] S. Shin, J. Seo, H. Han, S. Kang, H. Kim, and T. Lee, “Bio-Inspired Extreme Wetting Surfaces for Biomedical Applications”, *Materials*, vol. 9, no. 2, p. 116,2016.K.
- [32] Chang, T. Chuang, W. Ji, C. Chang, Y. Peng, and H. Shih, “UV-curable nanocasting technique to prepare bioinspired superhydrophobic organic-inorganic composite anticorrosion coatings”, *Express Polymer Letters*, vol. 9, no. 2, 2015.
- [33] P. Grimmer, S. Ganesan, M. Haupt, J. Barz, C. Oehr, and T. Hirth, “Energy Efficient De- Icing by Superhydrophobic and Icephobic Polyurethane Films Created by Microstructuring and Plasma-Coating”, *SAE Technical Paper 0148-7191*,2015.
- [34] Philippe Bourriane, “Non-mouillant et température application aux revêtements culinaires”, *Université Pierre et Marie Curie*, 7 juin2016.
- [35] <https://tpehydrophobe.wordpress.com/>, consulter le 02/06/2019.
- [36] Y. Li and all., “Effect of superhydrophobicity on flashover characteristics of silicone rubber underwet conditions”, *AIP ADVANCES* 8, 015313 (2018), pp.1-12.
- [37] Y. Li and all., “Effect of superhydrophobicity on surface damage of silicone rubber under AC Voltage”, *AIP ADVANCES* 8, 035117 (2018), pp.1-13.
- [38] Sravanthi and all., Superhydrophobic coatings for improved performance of electrical insulators, *Macromol. Mater. Eng.* 2018, 1800313 (1 of 6)
- [39] R. Torchiati 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.
- [40] T. Tahri, “Élaboration D’un Modèle Dynamique De Contournement D’un Isolateur Pollué Sous Tension Alternative”, *Mémoire de fin d’études*, N° d’ordre : REs 225 *Université de Mohamed Boudiaf-Msila*, 2016.

- [41] S. Jafar, A.S. Ahmad, P.S. Ghosh, S.A.K. Aljunid, "A new approach in modeling AC flashover voltage for polluted insulator", 202 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Université Tenaga Nasional, Kajang, Selangor, Malaysia, p. 58-561.
- [42] SA. Bessedik, "Contournement des isolateurs pollués", S EI-HT, Thèse de doctorat, Soutenue le 28 juin 2015, Année 2015.
- [43] B. M'hamdi et All, "Modèle de l'isolateur 1512L partiellement pollué sous tension de choc de foudre", Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), 12 Université Ziane Achour, Djelfa. Centre Universitaire d'El-Oued, May 2011, p1 of 5.
- [44] Les résultats de la recherche en science du développement durable, "La pollution dans tous ses états", 2013 Planète viable. <http://www.planeteviable.org>.
- [45] A. Mekhaldi, « Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tensions alternative Hz », Thèse de doctorat d'état, Génie Electrique, ENP, juin 1999.
- [46] S. Loana, "Effet de la fonte et de la pollution sur la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace", Thèse de doctorat, Université de Québec à Chicoutimi, Octobre 1996.
- [47] A. Vincent, "Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope", Thèse de doctorat, Université Paris VI, Décembre 2002.
- [48] S. Satta, "Contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinuité sur le comportement des isolateurs: expérimentation et simulation Diplôme magister en électrotechnique, Université Sétif.
- [49] A. Benchallal and All, "Identification et détection, par imagerie satellitaire, de la dégradation des sols par la salinité dans la cuvette" de Ouargla, sud de l'Algérie. Journée d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF Alger Novembre 2009.
- [50] L.A. Richards, "Diagnosis and improvements of saline and alkali soils". 1954, U.S. Salinity Laboratory DA, US Dept. Agr. Hbk 60, 160 p.
- [51] [www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-degre-de-pollution](http://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-degre-de-pollution). Consulter le 07/06/2019
- [52] CEI 815, Commission Électrotechnique Internationale, rapport de la CEI, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", publication 815, première édition, Genève, Suisse, 1986.
- [53] C. Gary et all, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très haute tension", collection de la direction des études et recherches d'électricité de France. Edition Eyrolles, Paris,

- 1984.
- [54] A. El- Sulaiman and M. I. Qureshi, "Effect of contamination on the leakage current of inland desert insulators", IEEE. Trans. On E.I, Vol. E.I-19, no 4, August, 1984.
- [55] D'M.E.A, SLAMA, « Haute tension isolation externe », Université des sciences et de technologies d'Oran, [www.slideshare.net/AmineSLAMA/Hautetension-extreme-pollution65397457](http://www.slideshare.net/AmineSLAMA/Hautetension-extreme-pollution65397457), mai 2019.
- [56] W. C. Thompson, " The mechanism of the contamination of porcelain insulators", IEE, 91, Pt. 11, pp. 317-327, 1944.
- [57] D. Namane, « Effet de la Discontinuité de la Couche Polluante sur le Comportement d'Isolateurs Haute Tension, sous la Fréquence de 50 Hz », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février, 1998.
- [58] A. Tlidjane, R. Mekhalfia et H. Kebaili, "Etude Du Phénomène De Contournement Des Isolateurs Pollues Sous Tension Continue ", PFE Ingénieur, Université de M'sila 2009/2010.
- [59] R. Ydjedd, Mémoire de fin de cycle « Performance d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sous tension alternative », 06/2013.
- [60] F. Bouchelga, "Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante large et polluée sous tension continue", Thèse de doctorat, Université A. Mira de Bejaia, juin 2016.
- [61] CEI 815, Commission Électrotechnique Internationale, rapport de la CEI, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", publication 815, première édition, Genève, Suisse, 1986.
- [62] K. Hamour, A.H Chekri « Caractérisation des décharges électrique évoluant dans un intervalle d'air pointe – barrière polluée – pointe sous tension continue » diplôme de Master en Electrotechnique, 06/2015.
- [63] M. Tegar, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Juillet 1993.
- [64] F. Amir, KH. Namaoui, mémoire d'ingénieur, « Etude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative ». juin 2004.
- [65] P. J. Lambeth, H. Auxel et M. P. Verma, « Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension », Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972

- [66] M. Tegar, A. Boubakeur, "Pollution des Isolateurs de Haute Tension", Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.).
- [67] A. Meziane, Y. Thaminy, « Modélisation dynamique du phénomène de contournement des isolateurs pollués sous tension continue ». Projet de fin d'étude, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2002.
- [68] D. Dumora; R. Parrau, « Solution apportée aux problèmes de pollution par différents isolateurs en verre trempé et isolateurs en composite ». 428 RP 99/BC/MRG, SEDIVER-79, Avenue François Arago -9, 2017, Nanterre Cedex France.
- [69] E. Guerret, E. Moncada, "superhydrophobie", Olympiades de physique lycée clément Marot cahrs, 2014-2015.
- [70] M. A. Samaha and M. Gad-el-Hak 2, "Polymeric Slippery Coatings: Nature and Applications Polymers 2014", 6, 1266-1311; doi:10.3390/polym6051266.
- [71] S. Tounsi, F. Chikh « Influence du sol sur comportement d'un modèle d'isolateur sous tension », thèse d'ingénieur d'électrotechnique. ENP département de génie électrique Laboratoire de haute tension 2008.
- [72] A. Tilmatine, ETL437 « Isolateurs des lignes aériennes haute tension », Chapitre\_6, Cours de Isolateurs des lignes C.
- [73] Z. Sahli, « Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continue », Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia 2003.
- [74] E. Diday, J. Lemaire, J. Pouget, F. Testu, "Eléments d'analyse de données", Edition Dunod. 03/1993
- [75] A. Cimador et S. Vitet, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure, No 27, Juillet 1990.
- [76] C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms et D. A. Swift, "Contournement des polymères humides et pollués l'ailette Booster", Cigre, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [77] G. Talal, "Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle", Thèse de magister en génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger 2007.
- [78] A. Cimador, M. Cojan, P. Hautefeuille et M. MOREAU, « Méthodes de dimensionnement des isolateurs de Lignes Aériennes en régions polluées », Cigre, Rapport 33-04, Paris, France, 1978.

- [79] T. Guia « Comportement d'un isolateur sous tension impulsionnelle » mémoire de magister, ENP laboratoire haute tension 2005.
- [80] P. Grimmer, S. Ganesan, M. Haupt, J. Barz, C. Oehr, and T. Hirth, "Energy Efficient De- Icing by Superhydrophobic and Icephobic Polyurethane Films Created by Microstructuring and Plasma-Coating", SAE Technical Paper 0148-7191, 2015.
- [81] P. Bourrienne, "Non-mouillant et température application aux revêtements culinaires", Université Pierre et Marie Curie, 7 juin 2016.
- [82] M.E.A. Slama, « Contribution a l'étude de l'influence de la non-uniformité de la pollution basée sur la méthode de la DDSE pour le dimensionnement des isolateurs des lignes THT a courant alternatif», en vue de l'obtention du diplôme de Magister. Juin 2002.
- [83] A. Danlos, " Polluants et dispersion atmosphérique ", CNAM, DefiEnergie, pp. 2-5.
- [84] R. Boudissa, F. Bouchelga, T. Belhoul, S. Kornhuber and K.D Haim, " DC electrical performance of insulation silicone angled and covered with water drops rows arranged in zigzag", Conference Silicone Insulation (CSI), Wacker Academy, Germany.
- [85] T. Belhoul, R. Boudissa, K.D. Haim, "Comparaison of the Performance of Silicone and Class Barriers under Direct Current ans Very Severe Conditions of Pollution", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, Issue 1, pp. 471 - 482, February 2017.
- [86] T. Braunsbeger, M. Kurrat, "Cyclic Water Dop Corona on Silicone Rubber Samples" 15th International Symposium on High Voltage Engineering, University of Ljublijana, Elktroinstitut Milan Widmar, Ljublijana, Slovenia, August 27 - 31, T4 - 280, pp. 1- 5, 2007
- [87] R. Boudissa, T. Belhoul, K.D. Haim, S. Kornhuber,"Effet of Inclination Angle Of Hydrophobic Silicone Insulation Covered By Water Drops on its Dc Performance", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, Issue 5, pp. 2890-2900, October 2017.
- [88] F. Aouabed and all, "Finite Element Modelling of Electric Field and voltage Distribution on a Silicone Insulating surface", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. , April 2018
- [89] R. Boudissa, A. Bayadi, R. Baersch, "Effect of Pollution Distribution Class on Insulators Flashover under AC Voltage", Electric Power Systems Research 104, pp.176 – 182, 2013.
- [90] IEC 62271-304, "Technical Specification of design classes of indoor enclosed switch gear and control gear from 1 kV and up to and including 52 kV to be used in severe

climatic condition”, High Voltage Switchgear and Control gear-PART 304.

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