

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A.MIRA-BEJAIA

Faculté de technologie

Département génie électrique



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa



## *MEMOIRE DE FIN D'ETUDE*

Présenté par :

**Bechar Idir**

**Belkhiri Abdeslam**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique  
Option

Réseaux électriques et machines électriques

### **Thème**

Etude et élaboration des surfaces superhydrophobes :  
application aux isolateurs électriques HT

Soutenue publiquement le 22 juin 2023 devant le jury composé de :

<b>M S. ATROUNE</b>	<b>U.A.M.Bejaïa</b>	<b>président</b>
<b>Mme A. BENDAHMANE</b>	<b>U.A.M.Bejaïa</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>M A. MEDJDOUB</b>	<b>U.A.M.Bejaïa</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Melle S. ALOUACHE</b>	<b>U.A.M.Bejaïa</b>	<b>Co-Rapporteur</b>

2022 / 2023

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma très chère mère*

*A mon frère MASSINISSA*

*A ma grande famille que je chéris de plus en plus*

*A tous mes amis surtout mon binôme  
Abdeslam*

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

*A vous.*

*IDIR*

# *Dédicaces*

*Je dédié ce modeste travail  
particulièrement :*

*A mes chers parents, qui ont consacré leur  
existence à bâtir la mienne, pour leur  
soutien, patience et soucis de tendresse et  
d'affection pour tout ce qu'ils ont fait  
pour que je puisse aussi aller loin.*

*A ma très chère sœur et mon cher frère.*

*A tout ma famille.*

*A mes chers amis.*

*A mon binôme IDIR ainsi que sa famille.*

*Abdeslam*

# *Remerciement*

*Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé. Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à Melle S. Alouache et M Medjdoub pour leur suivi quotidien, leur disponibilité, leurs critiques, conseils précieux et encouragements qui ont contribué à mener à bien notre travail. Nous remercions également tous les membres du jury pour avoir bien voulu évaluer et examiner notre travail.*

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

**Table des matières**

Chapitre I : caractérisation des surfaces superhydrophobes et état de l'art sur leurs performances

Introduction générale.....	1
Introduction.....	3
I.1 Les isolateurs HT .....	3
I.1.1 Définition .....	3
I-2 Types des isolateurs HT .....	4
I.2.1 Isolateurs en verre .....	4
I.2.1.1 Le verre trempé .....	4
I.2.1.2 Le verre recuit .....	4
I.2.2 Isolateurs en céramique.....	5
I.2.3 Isolateurs synthétiques (composite).....	5
I.3 Choix des isolateurs HT.....	6
I.4 Propriétés des isolateurs.....	7
I.4.1 Rigidité diélectrique .....	7
I.4.2 Résistance transversale.....	7
I.4.3 Résistance superficielle .....	7
I.4.5 Résistance d'isolement (Ri) .....	7
I.4.6 Permittivité relative .....	7
I.4.7 Facteur de pertes.....	8
I.5 Isolation superhydrophobe.....	8
I.5.1 Définition de la superhydrophobicité.....	8
I.5.2 Mouillage .....	8
I.5.3 Définition de la mouillabilité .....	9
I.5.4 Angle de contact.....	9
I.5.5 Angle de contact statique .....	9
I.5.6 Angle de contact dynamique .....	10
I.5.7 L'angle de glissement.....	10
I.6 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact : .....	10
I.6.1 Le modèle de Young duprés.....	10
I.6.2 Le modèle de Wenzel .....	11

I.6.3 Modèle de Cassie Baxter .....	11
I.6.4 Rugosité.....	12
I.6.5 Auto-nettoyage .....	12
I.7 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact .....	12
I.7.1 Surface hydrophile .....	12
I.7.2 Surface superhydrophile.....	13
I.7.3 Surface hydrophobe .....	13
I.7.4 Surface superhydrophobe .....	13
I.8 Techniques de fabrication des surfaces superhydrophobes .....	13
I.8.1 Dépôt par vapeur chimique .....	13
I.8.2 Dépôt électrochimique .....	14
I.8.3 Photolithographie .....	14
I.8.4 Techniques utilisant le plasma .....	14
I.8.5 Dépôt par bain chimique .....	14
I.8.6 Traitement par pulvérisation .....	14
I.9 Types des matériaux superhydrophobes .....	15
I.9.1 Surfaces superhydrophobe naturelles .....	15
I.9.2 Matériaux superhydrophobes artificiels .....	17
I.10 Domaines d'application des surfaces superhydrophobes .....	18
I.10.1 Béton intelligent .....	18
I.11 Travaux antérieurs sur l'isolation superhydrophobes.....	19
I.11.1 Logiciel de simulation du champ et potentiel électrique.....	25
I.11.2 Conductivité électrique des gouttes d'eau et épaisseur du couvert.....	28
Conclusion .....	29
Chapitre II : Pollution des isolateurs électriques	
Introduction.....	30
II.1 pollution des isolateurs HT.....	30
II.1.1 Pollution.....	30
II.1.2 Couche de pollution .....	30
II.1.3 Degré de pollution.....	30
II.1.4 Salinité .....	31
II.2 Sources de pollution .....	31
II.2.1 Pollution naturelle .....	31

II.2.2 Pollution artificielle .....	31
II.2.3 Pollution mixte .....	31
II.3 Classement de degrés de pollution .....	32
II.4 Sévérité de degré de pollution .....	32
II.5 Méthodes de mesure de la sévérité d'un site sont .....	33
II.5.1 Densité du dépôt de sel équivalent.....	33
II.6 Conductivité électrique des couches de pollution .....	33
II.6.1 Conductance superficiel .....	33
II.6.2 Densité du dépôt non soluble (DDNS) .....	34
II.7 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués .....	34
II.7.1 Vent.....	34
II.7.2 L'Humidité.....	35
II.7.3 Température .....	35
II.7.4 Pluie .....	35
II.8 Conséquences de la pollution .....	35
II.8.1 Arc non localisé .....	35
II.8.2 Arc fixe .....	35
II.8.3 Court-circuit.....	35
II.9 Phénomène de contournement.....	36
II.9.1 Définition .....	36
II.9.2 Tension de contournement.....	36
II.9.3 Contournement des isolateurs pollués .....	36
II.10 Contournement des surfaces isolantes .....	37
II.11 Techniques de lutte contre la pollution.....	38
II.11.1 Allongement de la ligne de fuite .....	38
II.11.2 Graissage périodique.....	39
II.11.3 Revêtement silicone .....	39
II.11.4 Les isolateurs composites .....	39
II.11.5 Nettoyage de l'isolation .....	40
Conclusion .....	40
Chapitre III : Partie expérimentale	
Introduction.....	41
III.1 Préparation de la surface isolante multicouches superhydrophobe.....	41

III.2 Modèle expérimental.....	42
III.2.1 profils d'électrodes suspendus.....	42
III.2 Nombres et mode d'arrangement des gouttes d'eau sur la surface superhydrophobe .	43
III.3 Position et volume des gouttes d'eau .....	44
III.3.1 Mesure de tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante .....	45
III.3.2 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques ...	46
III.4 Résultats et interprétation.....	47
III.4.1 paramètres d'influence sur la tension d'évacuation des gouttes d'eau.....	47
III.4.2 nombres de couches de l'isolation superhydrophobe et le volume des gouttes d'eau .....	48
III.5 mesure de l'angle de contact .....	56
Conclusion .....	57
Conclusion générale.....	58

**Liste de figures****Chapitre I : caractérisation des surfaces superhydrophobes et état de l'art sur leurs performances**

Figure I- 1 : les isolateurs HT .....	3
Figure I- 2 : isolateur en verre trempé	
Figure I- 3 : isolateur en verre recuit .....	4
Figure I- 4 : isolateurs en céramique.....	5
Figure I- 5 : l'isolateur composite.....	6
Figure I- 6 : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension .....	8
Figure I- 7 : Circuit électrique équivalent série et parallèle.....	8
Figure I- 8: Représentation de l'angle de contact à l'équilibre.....	9
Figure I- 9: angle de glissement.....	10
Figure I- 10 : Modèle de surfaces superhydrophobes .....	12
Figure I- 11: types de surfaces avec angle de contact.....	13
Figure I- 12: Illustration schématique du processus de fabrication de la surface superhydrophobe .....	15
Figure I- 13: Cellule polymère fluorée sous microscope.....	17
Figure I- 14: Céramique microscopique .....	17
Figure I- 15: plot de taille micrométrique sur le téflon.....	18
Figure I- 16: béton intelligent .....	18
Figure I- 17: Traitement Ultra-Ever dry sur des gants et des chaussures .....	19
Figure I- 18: Principales étapes de préparation d'une surface en verre superhydrophobe .....	19
Figure I- 19: Systèmes d'électrodes utilisées.....	20
Figure I- 20: Mesure du volume d'une goutte d'eau avec Micropipette (5 à 100 $\mu$ l) et son angle de contact.....	20
Figure I- 21: Types d'arrangements de gouttes d'eau en zigzag et en lignes droites .....	21
Figure I- 22 : Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes .....	21
Figure I- 23 : Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe selon un arrangement en lignes droites .....	22
Figure I- 24 : Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur volume.....	23

Figure I- 25: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité.....	23
Figure I- 26: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de la masse du kaolin ajoutée à la solution .....	24
Figure I- 27: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur arrangement.....	24
Figure I- 28: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de géométrie des électrodes (Epl : Electrode pleine, Ed : Electrode à dent, Epo: Electrode à pont) .....	25
Figure I- 29: Ensemble des forces électriques exercées sur un dépôt de 10 ou 5 gouttes d'eau sous polarité positive de la tension continue et sous arrangement en lignes droites (Ad) (Fci: Force de Coulomb, Fai: Force d'attraction mutuelle, Fri: Force de répulsion m).....	26
Figure I- 30: Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre de gouttes variable reposant sur une isolation à une couche ( $\epsilon_r = 1$ ; $\sigma_v = 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; $V_d = 100 \mu\text{l}$ ; $U_a = 25 \text{ kV}$ ).	26
Figure I- 31 : Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes reposant sur une isolation à 4 couches sans couvert ( $\sigma_v = 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; $V_d = 100\mu\text{l}$ ; $U_a = 25 \text{ kV}$ ). .....	27
Figure I-32 : distribution du potentiel et champ électrique de 5 gouttes reposant sur une isolation a une couche sans et avec couvert à deux épaisseurs différentes ( $\epsilon_r = 1$ , $U_a=25 \text{ KV}$ , $d=10 \text{ cm}$ ).....	28

## Chapitre II : Pollution des isolateurs électriques

Figure II- 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS .....	34
Figure II- 2: contournement d'un isolateur pollué .....	36
Figure II- 3: Processus de contournement lorsqu'une surface en caoutchouc de silicone commune a été placée horizontalement. (a)–(c) Coalescence de l'eau gouttelettes avec la tension croissante, (d) –(e) Phénomène juste avant l'amorçage (d) et l'amorçage s'est produit .....	37
Figure II- 4: Processus de contournement lorsqu'une surface commune en caoutchouc de silicone a été placée à $20^\circ$ . (a)–(b) Coalescence des gouttelettes d'eau, (c)–(d) Glissement de gouttelettes d'eau, (e)–(f) Phénomène juste avant l'embrassement (e) et l'embrassement (f).....	38
Figure II- 5: Allongement de la ligne de fuite. ....	39
Figure II- 6: processus de revêtement à la silicone.....	39

**Chapitre III : partie expérimentale**

Figure III- 1 : Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe. ...	41
Figure III- 2: modèle expérimentale utilisé pour la réalisation des essais électriques.....	43
Figure III- 3: Emplacement des gouttes d'eau en lignes droites sur la surface de l'isolation ..	44
Figure III- 4: Micropipette de mesure de volume de gouttes d'eau graduée de 0 à 50 $\mu\text{l}$ .....	44
Figure III- 5: Schéma de mesure de la tension continue positive d'expulsion des gouttes d'eau de la surface .....	45
Figure III- 6: station de mesure de la tension .....	45
Figure III- 7: Abaques de corrections en fonction de l'humidité et de la température.....	46
Figure III- 8: tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau a volume variable déposé sur une surface superhydrophobe à 1 couche. ....	48
Figure III- 9: tension d'expulsion des 5 gouttes d'eau à volume variable en dehors de la surface isolante à 1 couche .....	49
Figure III- 10: tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau a volume variable déposé sur une surface superhydrophobe a 2 couches.....	49
Figure III- 11: tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau à volume variable en dehors de la surface isolante à 2 couches .....	50
Figure III- 12: tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau déposé sur une surface superhydrophobe de 1 et 2 couches. ....	51
Figure III- 13: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante à une couche et l'effet de couverture .....	51
Figure III- 14: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposé sur une surface isolante a une couche, avec couverture a épaisseur variable .....	52
Figure III- 15: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposées sur une surface isolante à 1 couche et l'effet de couverture à épaisseur variable .....	52
Figure III- 16: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante à 2 couches et l'effet de couverture.....	53
Figure III- 17: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposé sur une surface isolante a deux couches, avec couverture a épaisseur variable.....	53
Figure III- 18: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposées sur une surface isolante à 2 couches et l'effet de couverture à épaisseur variable .....	54
Figure III- 19: tension d'évacuation en KV des 5 gouttes d'eau déposé sur une surface superhydrophobe a 1 et 2 couches avec couvert ( $e=3\text{mm}$ ).....	54

Figure III- 20: tension d'évacuation en KV des 5 gouttes d'eau déposé sur une surface superhydrophobe a 1 et 2 couches avec couvert (e=5mm) .....	55
Figure III- 21: tension d'évacuation en KV de la première et dernière goutte d'eau déposée sure un surface isolante superhydrophobe à 1 et 2 couches sans et avec couvert à épaisseur variable.....	55
Figure III- 22: système de mesure d'angle de contact. ....	56
Figure III- 23: angle de contact des deux plaques superhydrophobe.....	56

### Liste des tableaux

Tableau 1: groupe d'espèces naturel superhydrophobes .....	16
Tableau 2: Constitution chimique de la poussière émise par une centrale électrique en Pologne .....	31

$\theta$  : Angle de contact

$E_p$  : Champ électrique propre

$E_e$  : Champ électrique extérieur

$\epsilon_r$  : Permittivité relative

$R_v$  : Résistance transversale

$R_s$  : Résistance superficielle

$R_i$  : Résistance d'isolement

$\theta_e$  : Angle de Young

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

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

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

$r$  : Rugosité

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

$\theta_e$  : Angle de Young

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

$G$  : La conductance superficielle

$I$  : Courant électrique

$V$  : Tension d'alimentation de l'isolateur

$f$  : Le facteur de forme

$DDNS$  : Densité du dépôt non soluble  $mg / cm^2$

$DDSE$  : Densité du dépôt de sel équivalent

$V$  : Volume de la suspension en  $cm^3$

$S$  : Surface nettoyée en  $cm^2$

$S_a$  : La salinité exprimé en  $kg / m^3$

$\alpha$  : Angle d'inclinaison

$L_e$  : Longueur de l'électrode

le : Largeur de l'électrode

ee : épaisseur de l'électrode

Ldv : Distance entre l'électrode haute tension et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche

Ldg : Distance entre l'électrode terre et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche

Ldd : Distance entre les centres de deux rangées successives de gouttes d'eau

Irr: Distance entre les centres de deux rangées adjacentes de gouttes d'eau sur la longueur de l'isolation

Lc : Longueur de la ligne de fuite

Vd : Volume variable

$\sigma_v$ : Conductivité variable

R1/R2 : Diviseur de tension résistif

VDC : Voltmètre de crête

SSh : Surface superhydrophobe isolante

Cam : Caméra

PC : personal computer

Ra : Résistance d'affaiblissement de courant

Tri : transformateur

D : Diode

CL : Capacité de lissage de la tension

Uc : Unité de commande de transformateur

HV, Tr : Transformateur élévateur

HT : Haute tension

IHT : Intermédiaire haute tension

T : Terre

IT : Intermédiaire terre

M : Milieu

$P_a$  : La pression atmosphérique

$H_r$ : L'humidité

$T$  : La température

$U_a$  : La tension appliquée

$N_d$  : Nombre de goutte

$U_C$ : Tension de contournement à la température  $\theta$ , à la pression  $P$  et à l'humidité  $H$

$U_{c0}$  : Tension de contournement dans les conditions normales de température  $\theta$ , de pression  $P$  et d'humidité  $H$

$K_d$ : Facteur de correction relatif à la température et à la pression

$K_H$ : Facteur de correction relatif à l'humidité

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'électricité est l'une des principales sources d'énergie utilisées dans le monde entier, elle joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. Mais la transmission de cette énergie à travers les réseaux électriques peut être affectée par divers facteurs tels que les conditions climatiques, les décharges électriques et les dépôts de pollution. La maîtrise des conditions optimales du fonctionnement de ces réseaux, vis-à-vis de ce type de défaut d'isolement, commence par le choix d'isolateurs qui présentent les meilleures performances sous pollution. Dans le cas des isolateurs électriques haute tension, leur fonctionnement est très sensible aux dépôts de pollution et à l'humidité. Ces dépôts peuvent provoquer des arcs électriques et des courants de fuite, ce qui peut entraîner des coupures de courant et des pannes

Ces dernières années, les surfaces superhydrophobes ont suscité un grand intérêt dans le domaine de la recherche en raison de leur capacité à repousser l'eau et à résister à l'usure. Les propriétés exceptionnelles de ces surfaces peuvent être exploitées dans divers applications industrielles, notamment dans la création des surfaces autonettoyantes et de revêtements anti-salissure, ainsi les domaines de l'aéronautique et de l'automobile.

En utilisant les surfaces superhydrophobes, il est possible d'améliorer la résistance des isolateurs électriques aux dépôts de pollution et à l'humidité. Ces surfaces réduisent la quantité d'eau et de pollution qui se déposent sur les isolateurs, ce qui permet de maintenir leur performance à un niveau élevé. Donc les surfaces superhydrophobes offrent une solution prometteuse pour améliorer la fiabilité des systèmes électriques, en particulier dans les environnements difficiles tels que les zones industrielles ou les régions côtières.

Ce présent travail vise à évaluer les performances des surfaces superhydrophobes dans des conditions d'utilisation simulées pour les isolateurs électriques haute tension. Les résultats de ce mémoire pourraient aider à développer des isolateurs électriques plus fiables et à améliorer la qualité de la transmission de l'électricité.

C'est pour cette raison que nous proposons de subdiviser ce présent travail en trois chapitres. Le premier sera dédié à la caractérisation des isolateurs HT et les surfaces superhydrophobes, la présentation des divers types d'isolateurs, le choix et propriétés de ces derniers, la présentation des surfaces superhydrophobe, technique de fabrication et les

matériaux superhydrophobes naturels et artificiels leurs types et leurs applications, Enfin quelques travaux antérieurs sur l'isolation superhydrophobes seront décrits.

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

Le dernier chapitre sera consacré principalement à l'étude expérimentale de l'évaluation de la tension d'expulsion de gouttes d'eau sur une surface superhydrophobe conçue et réalisée par nous même en fonction des paramètres suivants : le nombre de couches de l'isolation , le positionnement des gouttes , leur volume, et leur degré de couverture . Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale qui représente la synthèse globale de notre travail.

**CHAPITRE I : caractérisation des  
surfaces superhydrophobes et état de  
l'art sur leurs performances**

## Introduction

Les isolateurs HT jouent un rôle essentiel dans la transmission d'énergie électrique à haute tension, en assurant une isolation efficace entre les conducteurs et les supports. Cependant, leur performance peut être affectée par les conditions environnementales sévères auxquelles ils sont exposés. Les surfaces superhydrophobes sont apparues comme une solution prometteuse pour repousser l'eau et la pollution.

Dans ce chapitre, nous abordons les caractéristique et propriétés des isolateurs HT et des surfaces superhydrophobes. Enfin, une synthèse des résultats obtenus lors des expériences se rapportant sur l'impact du dépôt de gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative sera faite.

### I.1 Les isolateurs HT

#### I.1.1 Définition [1]

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent.

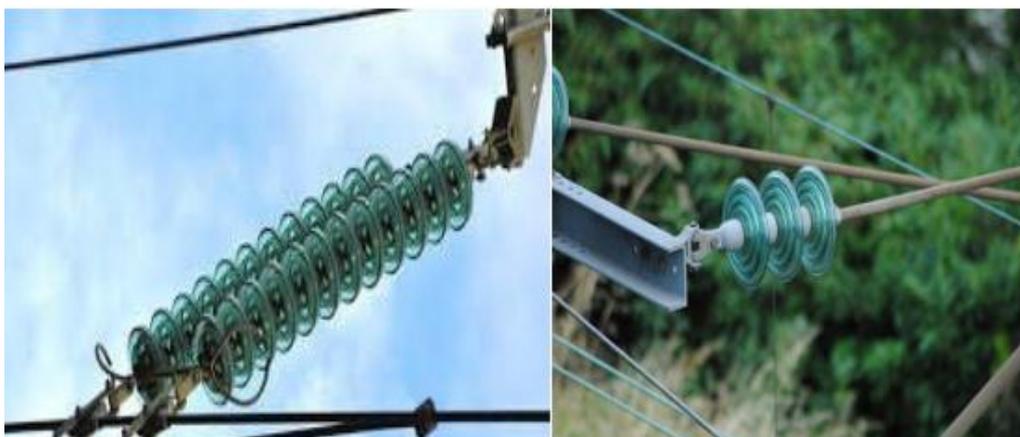


Figure I- 1 : les isolateurs HT

## I-2 Types des isolateurs HT

### I.2.1 Isolateurs en verre [2]

L'isolateur en verre est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 800°C, un mélange de sable, de chaux et de carbonate de sodium. Le liquide peu fluide est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de silicate alcalin et de calcium ou de Plomb.

Les isolateurs en verre, un peu moins chers, mais plus fragiles que ceux en porcelaine, sont employés jusqu'à environ 30 kV.

- Sa rigidité est excellente à froid, de l'ordre de 50 à 100 kV/mm, tandis qu'elle se trouve divisée par 100 à 400 °C ; Sa permittivité relative environ 5 à 8 ;
- Sa résistivité à 20 °C ;  $10^{10}$  à  $10^{16}$  Q. cm ; Facteur de pertes ( $\tan \phi$ ) =  $5 \times 10^{-2}$  ;

Nous trouvons deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

#### I.2.1.1 Le verre trempé [3]

Cela se fait en réchauffant l'isolant retiré du moule pour Température autour de 70°C, puis refroidissement par jets d'air sous pression Réparties judicieusement sur toute sa surface, les couches externes des pièces isolantes acquièrent rapidement de la rigidité, ne leur permettant plus de subir la moindre déformation.

#### I.2.1.2 Le verre recuit [3]

Il est principalement utilisé pour fabriquer des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs légèrement plus épais ne résistaient pas aux variations brusques de températures. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension.



Figure I- 2 : isolateur en verre trempé

Figure I- 3 : isolateur en verre recuit [4]

### I.2.2 Isolateurs en céramique

Les isolateurs en céramique ou en porcelaine se composent d'un cylindre plein doté d'ailettes, avec une pièce métallique de liaison à chaque extrémité. Cette pièce métallique peut prendre la forme d'un capot enveloppant scellé autour des extrémités tronconiques du cylindre, ou d'une tige scellée dans une cavité spécialement prévue à cet effet. Ces types d'isolateurs peuvent être utilisés individuellement ou en série, en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis, ils sont fréquemment utilisés dans une variété d'équipements électriques, tels que les postes électriques.

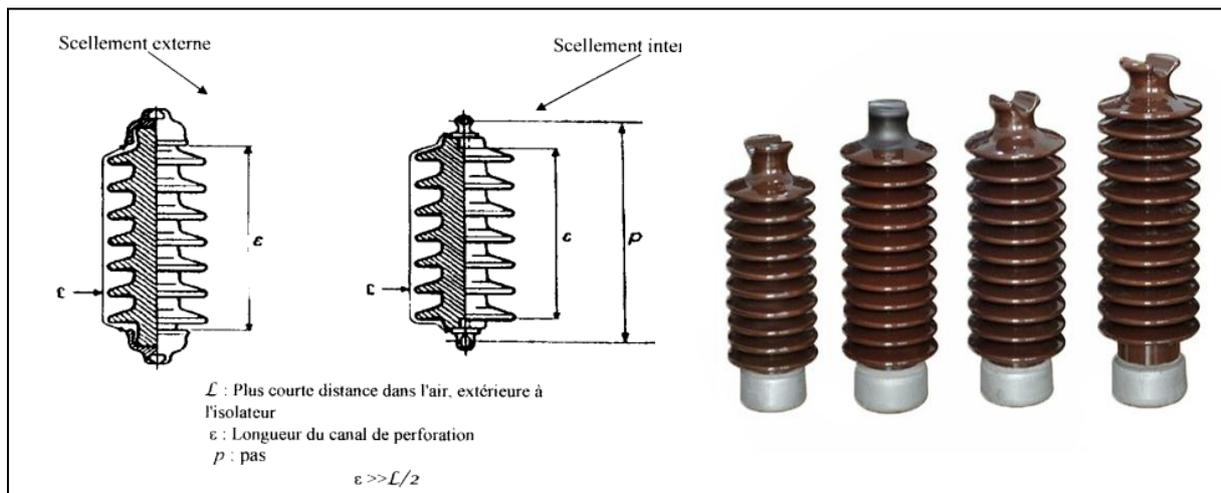


Figure I- 4 : isolateurs en céramique

### I.2.3 Isolateurs synthétiques (composite)

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées de résine, recouvert d'un revêtement à ailettes en élastomère. Leur principal avantage est leur légèreté associée à une grande résistance mécanique [5].

Le type d'isolateurs appelé composite est constitué de trois parties qui jouent chacune un rôle spécifique :

- Un noyau en fibre de verre imprégné de résine, conçu pour assurer l'isolation et supporter les contraintes mécaniques générées par les conducteurs.
- Un revêtement en élastomère, généralement en EPDM (éthylène propylène diène monomère), qui est vulcanisé à chaud. Ce revêtement donne la forme et détermine la ligne de fuite de l'isolateur, tout en protégeant le noyau contre les agressions extérieures et assurant l'étanchéité lors de la connexion avec les pièces métalliques d'extrémité. Les profils à ailettes alternées du revêtement contribuent à améliorer la résistance de l'isolateur face aux pollutions environnementales.

➤ Des pièces métalliques, fabriquées en fonte malléable ou en acier forgé galvanisé à chaud, sont nécessaires pour le montage de l'isolateur et la transmission des contraintes mécaniques.

En combinant ces trois éléments, les isolateurs composites offrent une solution efficace avec des propriétés d'isolation élevées, une protection contre les agents extérieurs et une capacité à résister aux charges mécaniques [6].

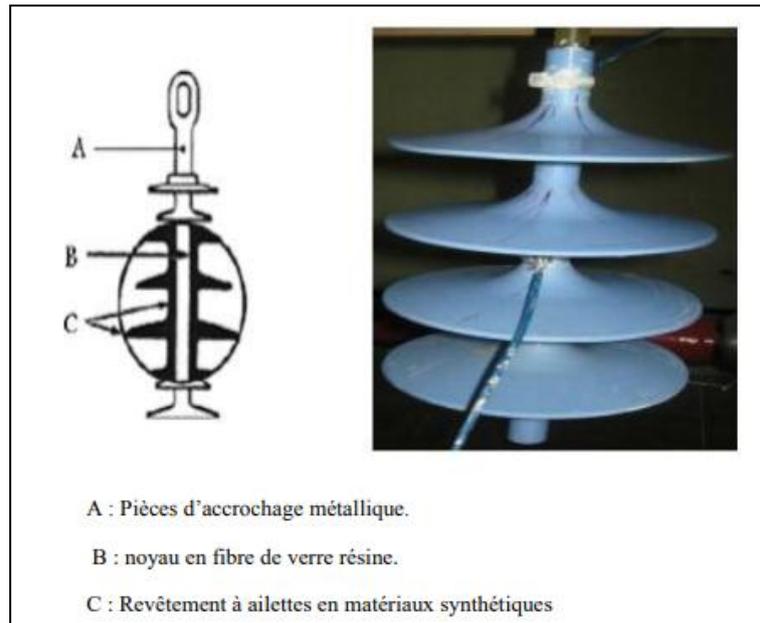


Figure I- 5 : l'isolateur composite

### I.3 Choix des isolateurs HT

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage [7].

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident :

- La sévérité de la pollution d'un site peut changer.
- L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste.
- La construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique. Exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation.

Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles [8].

## **I.4 Propriétés des isolateurs [9]**

### **I.4.1 Rigidité diélectrique**

La rigidité diélectrique d'un isolateur est la valeur du champ auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rend inapte à remplir ultérieurement sa fonction. En pratique, on la définit comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produisent une perforation et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension, dans des conditions d'essai spécifiées.

Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux, on distingue :

- La rigidité diélectrique longitudinale obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant.
- La rigidité diélectrique transversale pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces de l'isolant.

### **I.4.2 Résistance transversale ( $R_v$ )**

Elle est déterminée en appliquant un champ électrique perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et on mesure le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

### **I.4.3 Résistance superficielle ( $R_s$ )**

Elle intervient entre deux conducteurs placés sur une même surface isolant, elle est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité, poussière...) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

### **I.4.5 Résistance d'isolement ( $R_i$ )**

Elle fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

### **I.4.6 Permittivité relative ( $\epsilon_r$ )**

Lorsqu'un diélectrique est exposé à un champ électrique, il subit diverses modifications à l'échelle moléculaire, ce qui entraîne la création d'un champ électrique interne propre ( $E_p$ ) qui s'oppose au champ électrique extérieur appliqué ( $E_e$ ). Cette propriété des isolants solides et liquides est connue sous le nom de permittivité relative ( $\epsilon_r$ ).

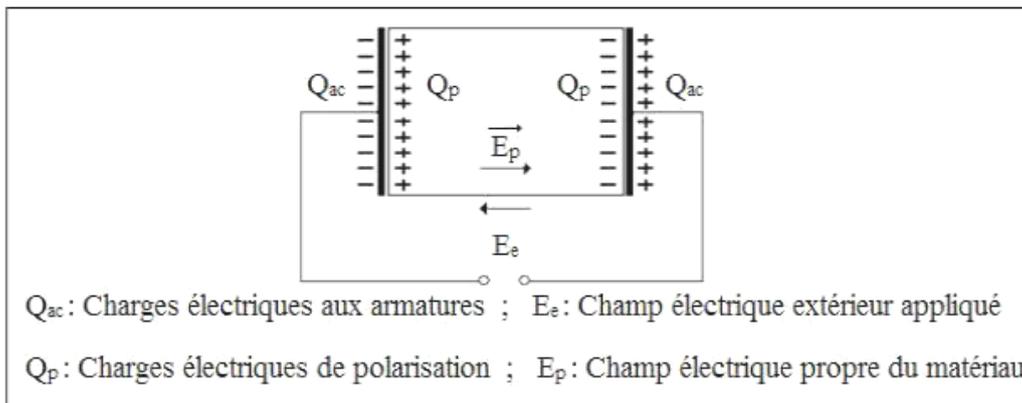


Figure I- 6 : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

### I.4.7 Facteur de pertes

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Fig. I-7)

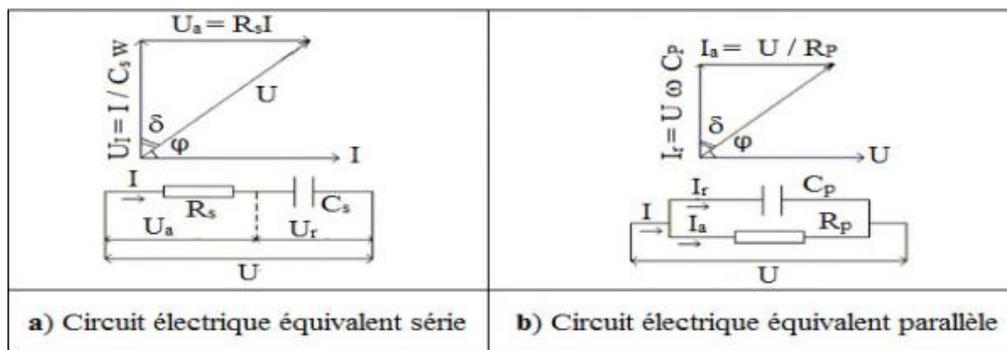


Figure I- 7 : Circuit électrique équivalent série et parallèle

## I.5 Isolation superhydrophobe

### I.5.1 Définition de la superhydrophobicité

La superhydrophobicité est un état dans lequel une surface présente une très forte résistance à la mouillabilité par l'eau. Cela signifie que lorsque de l'eau est déposée sur une surface superhydrophobe, elle forme des gouttelettes sphériques qui roulent facilement sur la surface sans la mouiller [10].

### I.5.2 Mouillage

Opération qui vise à mettre en contact un solide avec un liquide et à rendre le solide mouillant, dans le but ensuite de permettre à la particule de s'enfoncer dans le liquide, puis de se désagréger, et enfin de se dissoudre dans le liquide. La tendance à mouiller est déterminée par l'équilibre entre les forces de cohésion au sein du liquide et les forces d'adhésion qui opèrent entre le solide et les autres phases. Ce phénomène est souvent caractérisé par l'angle de contact liquide-solide. Dans le cas

d'un mouillage total, (coefficient d'étalement  $S > 0$ ), l'angle de contact est nul et le liquide s'étale pour former un film. Dans le cas inverse, le mouillage partiel, (coefficient d'étalement  $S < 0$ ), le liquide se rétracte et forme une goutte. Dans le cas d'un mouillage nul, l'angle de contact est alors supérieur à 150 degrés, à l'instar d'une goutte d'eau qui ne s'étale pas du tout sur une feuille de lotus, ou encore d'une goutte d'eau déposée sur une plaque métallique à haute température (caléfaction), qui se déplace à grande vitesse sans contact avec la plaque, peu à peu l'eau de la goutte se transformant en vapeur [11].

### I.5.3 Définition de la mouillabilité

La mouillabilité est fonction du mouillage qui correspond à la capacité d'un produit à mouiller une surface. Le mouillage est un des phénomènes important intervenant dans les collages [12].

### I.5.4 Angle de contact

On appelle angle de contact  $\theta$ , l'angle que forme la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée, ses valeurs varient entre 0 et 180°, en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact [13]. Lorsque l'on dépose une goutte de liquide sur une surface solide parfaitement lisse et horizontale du point de vue chimique, cette goutte adopte à l'équilibre une forme particulière définie par un angle de contact  $\theta$  qui caractérise les interactions entre le liquide et le solide.

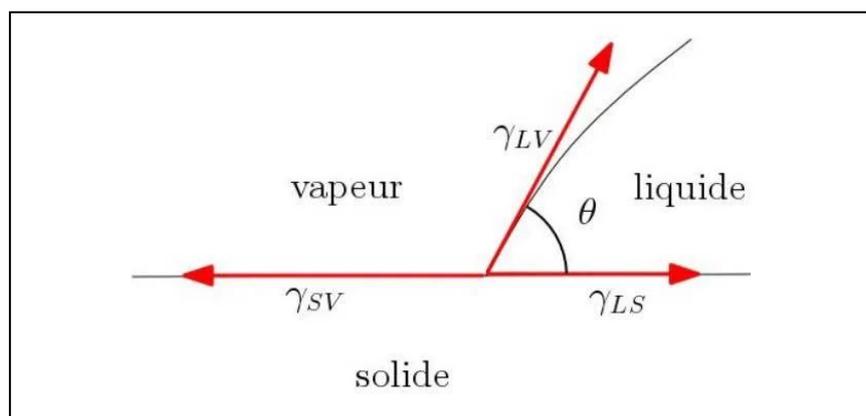


Figure I- 8: Représentation de l'angle de contact à l'équilibre

### I.5.5 Angle de contact statique

La mesure de l'angle de contact statique de l'eau est souvent utilisée pour caractériser la superhydrophobicité d'une surface et la mesure de cet angle s'effectue à l'aide d'un goniomètre qui est constitué généralement d'une source optique grossissante avec une caméra

intégrée qui permet d'enregistrer l'angle de contact ,qui est généralement mesuré via un logiciel .le calcul de l'angle de contact peut être effectuée par quatre mode d'évaluation différents.

### I.5.6 Angle de contact dynamique

La mesure d'angle de contact dynamique est une technique qui mesure l'angle de contact d'une goutte d'eau durant un mouvement .ceci généralement effectué en ajoutant du liquide à une goutte statique sur une surface et en poussant ainsi l'avant du liquide à travers la surface non mouillée.

### I.5.7 L'angle de glissement

L'angle de glissement fait référence à l'angle d'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontale, au moment où une goutte d'eau commence à se déplacer sur elle. Cette méthode reflète aussi, la différence entre les angles de contact avançant et reculant ; généralement l'angle de glissement est inférieur à 10° chez les surfaces superhydrophobes. Ce qui donne à ces surfaces la propriété autonettoyante.

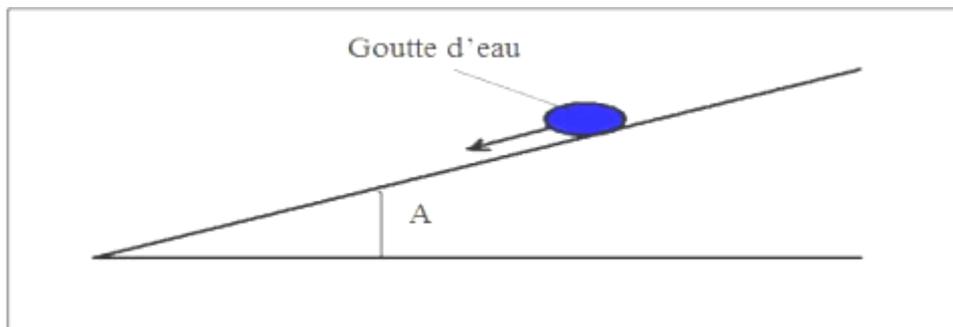


Figure I- 9: angle de glissement

## I.6 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact :

### I.6.1 Le modèle de Young duprés

La valeur de l'équilibre de l'angle de contact s'exprime par l'équation de Young-Dupré reliant les énergies de surface (Équation I.1)

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

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

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

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

L'équation de Young ne peut s'appliquer que dans le cas des surfaces parfaitement lisses, Sans porosité ni rugosité et totalement homogènes. Ce modèle ne tient pas compte de la rugosité d'une surface solide réelle et de son effet sur la mouillabilité. Ces problèmes ont été résolus dans le modèle de Wenzel.

### I.6.2 Le modèle de Wenzel [14]

Selon Wenzel (1936)  $r$  est le rapport de rugosité entre la surface de contact solide-liquide réelle et projetée,  $\theta^*$  et  $\theta$  sont les angles de contact pour les surfaces rugueuses et lisses, respectivement.

La relation de Wenzel est la suivante :

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

Où

$r$  : La rugosité ( $r > 1$ ) ;

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

$\theta^*$  : L'angle de contact avec la rugosité ;

### I.6.3 Modèle de Cassie Baxter [15]

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 0-10).

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 piégées.

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

L'équation III 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  $\varphi_s$  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 Avec :

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

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

$\varphi_s$  : La fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose ;  
 $(1-\varphi_s)$  : la proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée.

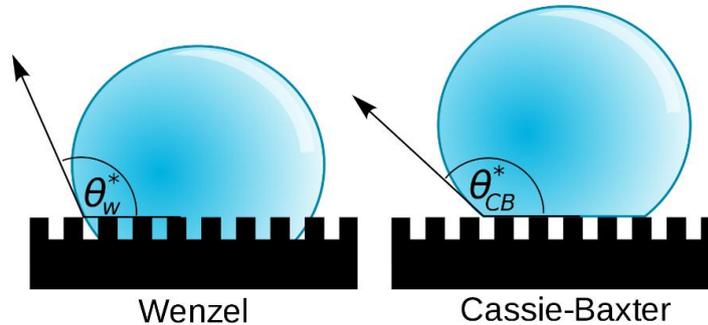


Figure I- 10 : Modèle de surfaces superhydrophobes

#### I.6.4 Rugosité

Selon la théorie de Wenzel, le facteur de rugosité joue un rôle important dans la détermination de la mouillabilité de la surface ou les effets de rugosité améliorent à la fois l'hydrophobicité et l'hystérésis de l'angle de contact, une forte rugosité limite le contact d'une faible échelle, permet très souvent d'amplifier l'aspect superhydrophobe en accentuant le contact avec l'air sur le sommet des aspérités.

#### I.6.5 Auto-nettoyage

L'auto-nettoyage est l'une des caractéristiques les plus étonnante et les mieux documentées des surfaces superhydrophobes. En effet, la structure morphologique d'une surface superhydrophobe tiennent les particules de poussière en suspension sur les aspérités des surfaces, ce qui se traduit par une très faible surface de contact et une faible force d'adhérence physique entre la particule et la surface.

### I.7 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact [16]

La valeur de l'angle de contact est déterminée par la tangente de la gouttelette de liquide au point constant entre les phases solide-liquide-air avec la surface de la phase solide aux limites des trois phases. En raison de la différence de comportement mouillant/non mouillant et des valeurs d'angle de contact (AC) les surfaces solides peuvent être classées en quatre catégories.

#### I.7.1 Surface hydrophile

Une surface hydrophile ( $10^\circ < \theta < 90^\circ$ ) [16] est caractérisée par son aptitude à créer des liaisons d'hydrogène avec des gouttes d'eau qui, en les déposant sur celle-ci, s'étalent, dans ce cas, le contact entre la surface et les gouttes d'eau est maximal (Fig. I. 11a) [9].

### I.7.2 Surface superhydrophile

Une surface superhydrophile est une surface ayant un angle de contact presque égal  $0^\circ$  avec une goutte d'eau [17].

### I.7.3 Surface hydrophobe [17]

Contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes ont du mal à créer des liaisons d'hydrogène avec les gouttes d'eau, qui, en les déposant sur celle-ci, se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau (Fig. I. 11b)

### I.7.4 Surface superhydrophobe [18]

L'eau préfère perler et rouler sur la surface superhydrophobe plutôt que demouiller. Parce que la tension superficielle est élevée à l'interface solide-liquide des surfaces SH, l'eau perles dans une sphère pour conserver l'énergie. Les surfaces SH ont un angle de contact supérieur à  $150^\circ$  et un angle de glissement inférieur à  $10^\circ$  avec de l'eau.

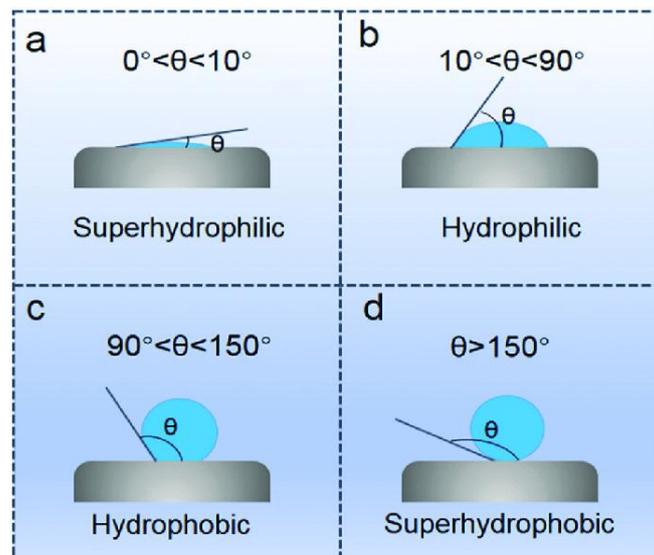


Figure I- 11: types de surfaces avec angle de contact

## I.8 Techniques de fabrication des surfaces superhydrophobes

### I.8.1 Dépôt par vapeur chimique [19]

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

### **I.8.2 Dépôt électrochimique [20]**

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

### **I.8.3 Photolithographie [21]**

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

### **I.8.4 Techniques utilisant le plasma [22]**

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

### **I.8.5 Dépôt par bain chimique [23]**

Le dépôt par bain chimique est une des méthodes les plus simples pour l'application de couches minces et de nanomatériaux, des matériaux ayant des caractéristiques particulières à cause de leur taille nanométrique. Cette technique permet de faire de grande quantité de substrat 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 format des dépôts de topographie distincte.

### **I.8.6 Traitement par pulvérisation**

Elle consiste à réaliser des revêtements par pulvérisation d'un précurseur à l'aide d'un gaz comprimé inerte sur un substrat (aluminium, silicium, verre, etc.) à l'aide d'un pistolet à jet. Cette technique présente de nombreux avantages.

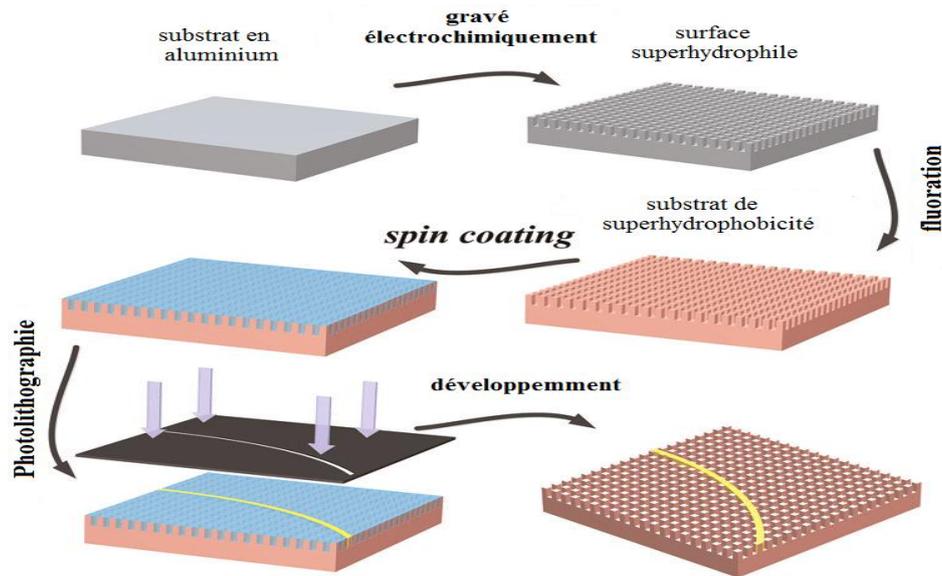
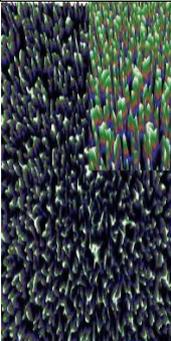


Figure I- 12: Illustration schématique du processus de fabrication de la surface superhydrophobe [24]

## I.9 Types des matériaux superhydrophobes

### I.9.1 Surfaces superhydrophobe naturelles [25-27]

Le tableau I.1 représente un groupe d'espèces superhydrophobes : insectes, animaux et végétaux

Type de matériau	Valeur de l'angle	Type de surface	Exemple	Photo	Caractéristiques	Photo Microscope
Insectes	167°	Super hydrophobe	Gerris		Les poils sont inclinés dans une direction commune et sont espacés de manière égale. Cette disposition forme une structure isotrope.	
	<150°	Super hydrophobe	Libellule		Ces ailes sont revêtues de plots micro et nanostructures	

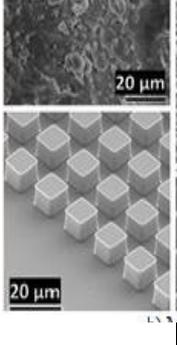
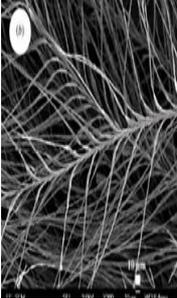
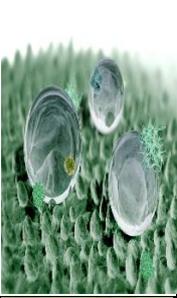
	<150°	Super hydrophobe	Dolomède des marais		Ces poils produisent des sommets hérissés séparés par des espaces en forme de vallées	
Animaux	<150°	Super hydrophobe	Plume canard		Une grisse Super Hydrophobe secrétée par son bec	
	58°	hydrophobe	Ecaille de poisson		Structure écailleuse Et superoléophobie	
Végétaux	<150°	Super hydrophobe	Lotus		L'effet lotus est dû à la présence de micro et nano structure rugueuses	
	<90°	Hydrophobe	Salvinia Molesta		recouverte de petits capillaires hydrophobes en forme de fouets de cuisine	

Tableau 1: groupe d'espèces naturel superhydrophobes

### I.9.2 Matériaux superhydrophobes artificiels [28]

#### a) Polymères fluorés

L'angle de contact est clairement mis en valeur lorsque le polymère est composé de fluor, c'est l'état de la surface superhydrophobe avec un angle maximal de  $160^\circ$ . Cela a été observé dans les travaux de Mr Thierry Darmanin (Fig. I. 13).

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

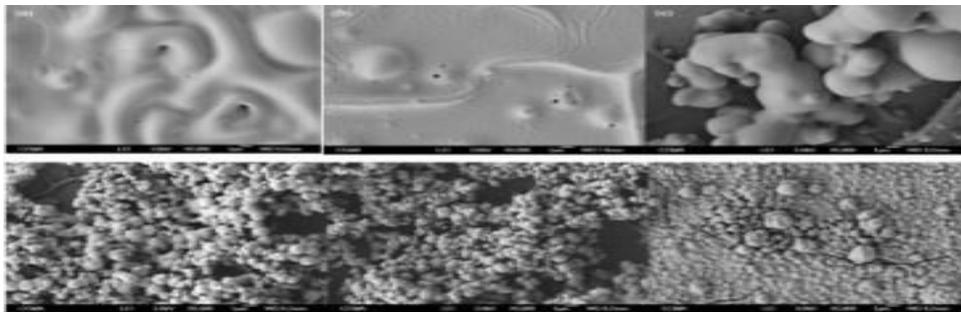


Figure I- 13: Cellule polymère fluorée sous microscope

#### b) Céramique et le NeverWet

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

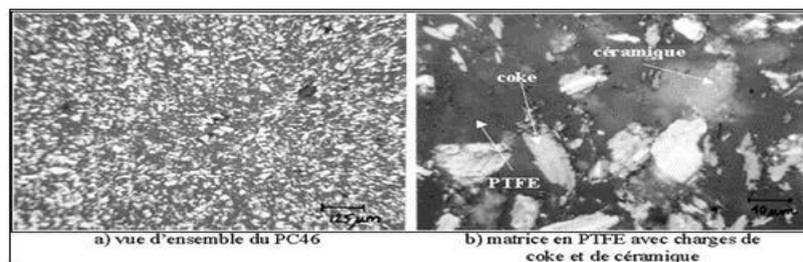


Figure I- 14: Céramique microscopique

#### c) Téflon [28]

Lorsqu'une goutte d'eau est posée sur une surface hydrophobe lisse comme le téflon, l'angle de contact entre la goutte et la surface est à peine supérieur à  $90^\circ$ . Cet angle atteint  $160^\circ$  sur la deuxième et la troisième surface, hérissée d'un réseau ordonné de plot de taille micrométrique, ce qui rendent la surface superhydrophobe (Fig. I. 15).

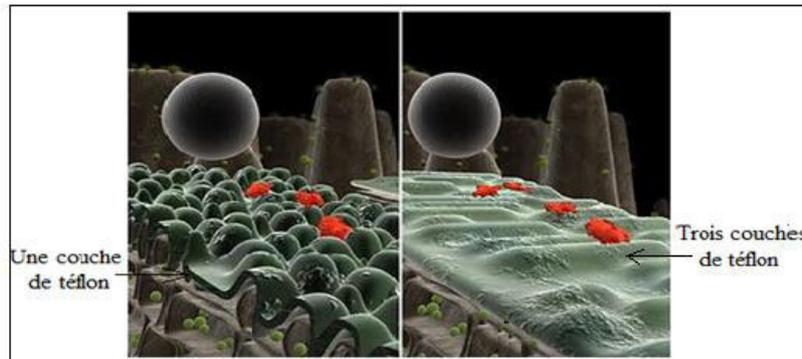


Figure I- 15: plot de taille micrométrique sur le téflon

### I.10 Domaines d'application des surfaces superhydrophobes

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

#### I.10.1 Béton intelligent [29]

Des chercheurs américains ont mis au point un type de béton qui résiste à l'eau et aux fissures. Ce béton est intelligent grâce à sa composition moléculaire (une surface "pointue") le rendant presque complètement étanche. En versant de l'eau sur ce type de béton, elle forme des gouttelettes qui roulent hors de sa surface (Fig. I. 16).



Figure I- 16: béton intelligent

#### I.10.2 Ultra - Ever Dry

Ultra-Ever Dry est un revêtement superhydrophobe qui repousse la majorité des liquides. Ce produit crée une barrière d'air sur la surface d'un objet. Cette barrière repousse l'eau, l'huile, le béton humide et autres liquides (Fig. I. 17).



Figure I- 17: Traitement Ultra-Ever dry sur des gants et des chaussures [30]

### I.11 Travaux antérieurs sur l'isolation superhydrophobes

B.Smati et S.Soudani [31] ont effectué des travaux expérimentaux se rapportant à l'impact du dépôt de gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative. Afin de réaliser une telle étude, ils ont fabriqué et élaboré plusieurs échantillons d'une isolation en verre à base de silicone superhydrophobe, illustrée par la figure I.18

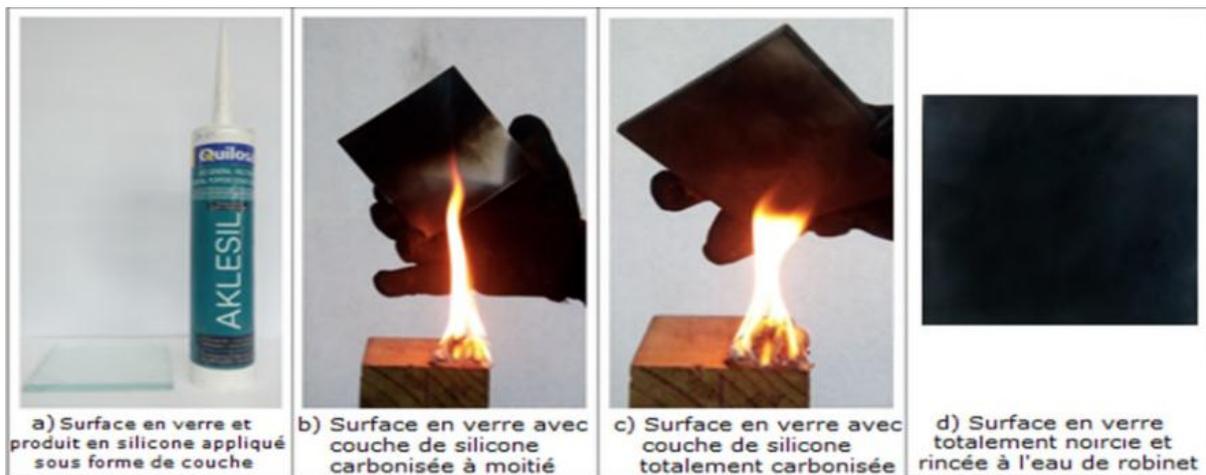


Figure I- 18: Principales étapes de préparation d'une surface en verre superhydrophobe

Ces auteurs ont étudié les paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau déposées manuellement sur la surface isolante superhydrophobe sous tension continue négative et leur expulsion de celle-ci avec différentes géométries d'électrodes pour éliminer les décharges électriques qui sont la cause principale de la perte de superhydrophobicité de l'isolation (Fig. I. 19).

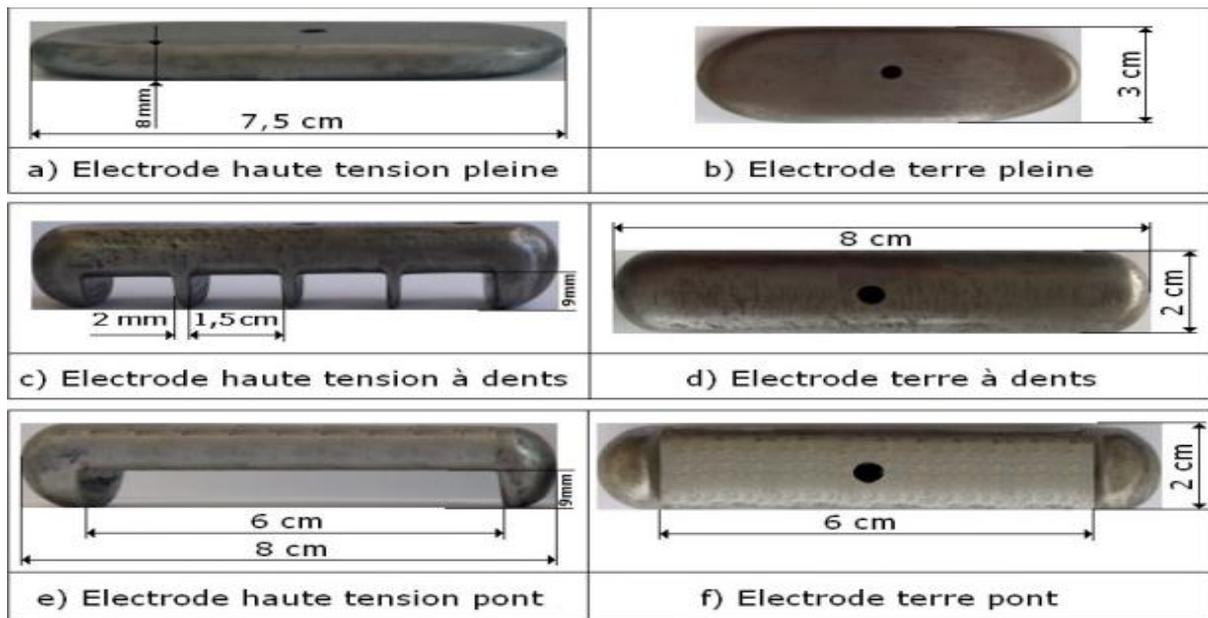


Figure I- 19: Systèmes d'électrodes utilisées.

Afin de varier le volume des gouttes d'eau, ils ont utilisé une micropipette graduée de 5 à 100 $\mu$ l. Le volume choisi de la goutte d'eau est fixé à l'aide du compteur de la micropipette. Une quantité est aspirée de la solution se trouvant dans un bécher (Fig. I .20a). Celle –ci est déposée sous forme de goutte d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation (Fig. I.20b). Un logiciel disponible sur internet a été utilisé pour la mesure de l'angle de contact de la goutte d'eau sur la surface superhydrophobe. Sa valeur est de l'ordre de 158° (Fig. I. 20c et 20d).

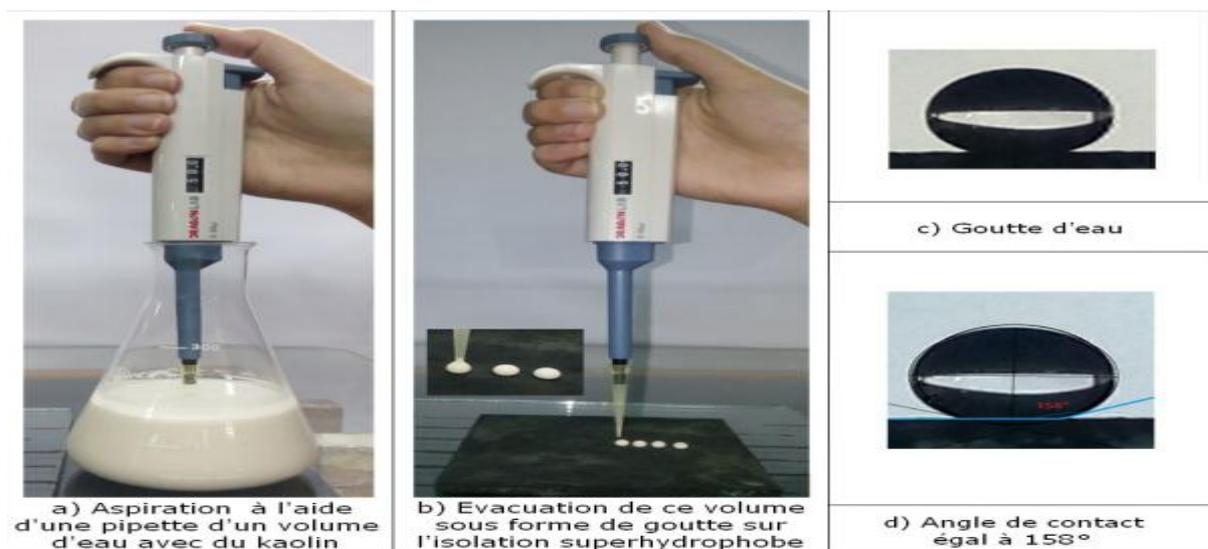


Figure I- 20: Mesure du volume d'une goutte d'eau avec Micropipette (5 à 100 $\mu$ l) et son angle de contact.

Ces auteurs, ont posé les gouttes sur la surface superhydrophobe selon deux types d'arrangement en lignes droites et en zigzag, illustrée par la figure I. 21. Le premier type d'arrangement consiste en un dépôt de plusieurs gouttes sur une ligne droite. Les lignes droites des gouttes d'eau sont parallèles entre elles. Par contre le deuxième type d'arrangement consiste en un dépôt de plusieurs gouttes d'eau de telle sorte que la goutte suivante est décalée soit à gauche soit à droite par rapport à la précédente. Les lignes zigzagüées sont aussi parallèles entre elles, illustrée par la figure I. 21.

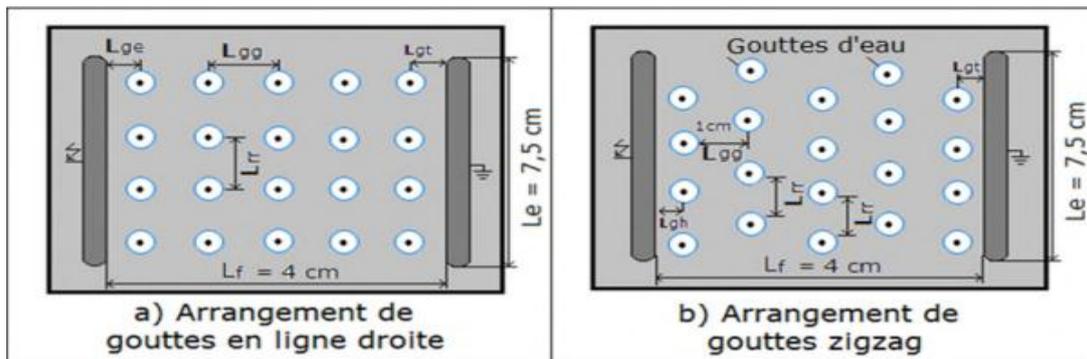


Figure I- 21: Types d'arrangements de gouttes d'eau en zigzag et en lignes droites

( $L_f$ : Longueur de la ligne de fuite,  $L_{gg}$ : distance entre les centres de deux rangées successives de gouttes d'eau le long de la ligne de fuite  $L_f$  .  $L_{rr}$ : distance entre les centres de deux rangées adjacentes de gouttes d'eau sur la largeur de l'isolation,  $L_{gh}$ : distance entre l'électrode haute tension et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche de celles-ci le long de cette ligne de fuite.  $L_{gt}$ : distance entre l'électrode terre et le centre de la rangée de gouttes d'eau la plus proche de celles-ci le long de cette ligne de fuite).

La tension continue d'essai de l'isolation est fournie par la station de mesure illustrée par la figure I.22.

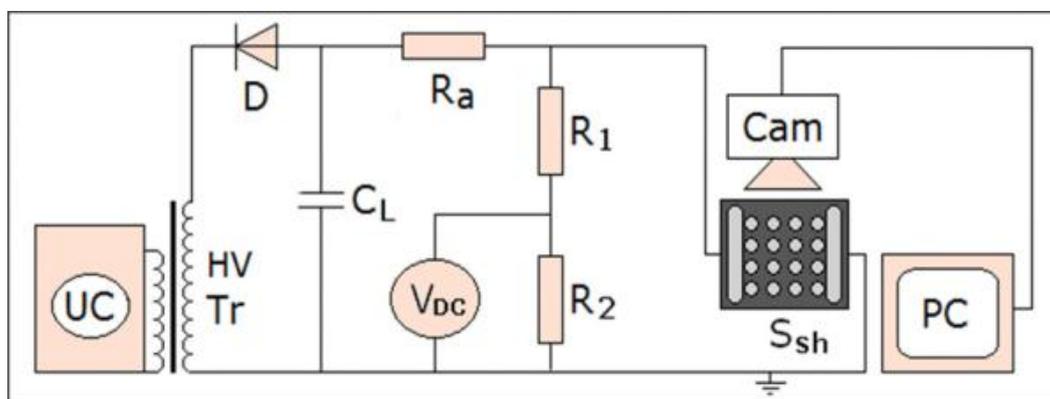


Figure I- 22 : Schémas de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes

Les auteurs ont mis quelques échantillons de l'isolation superhydrophobe sous tension de contournement à sec dont les valeurs moyennes obtenus en fonction de la géométrie des électrodes HT et terre montrent que la tension de contournement sous électrodes à pont est plus élevée que sous électrodes à dents et sous électrodes pleines.

Pour le mode d'arrangement ils ont remarqué une légère augmentation de la tension d'évacuation de la dernière goutte jusqu'à la troisième rangée et au-delà de laquelle elle devient constante quel que soit le nombre de rangées ajoutées (Fig. I. 23).

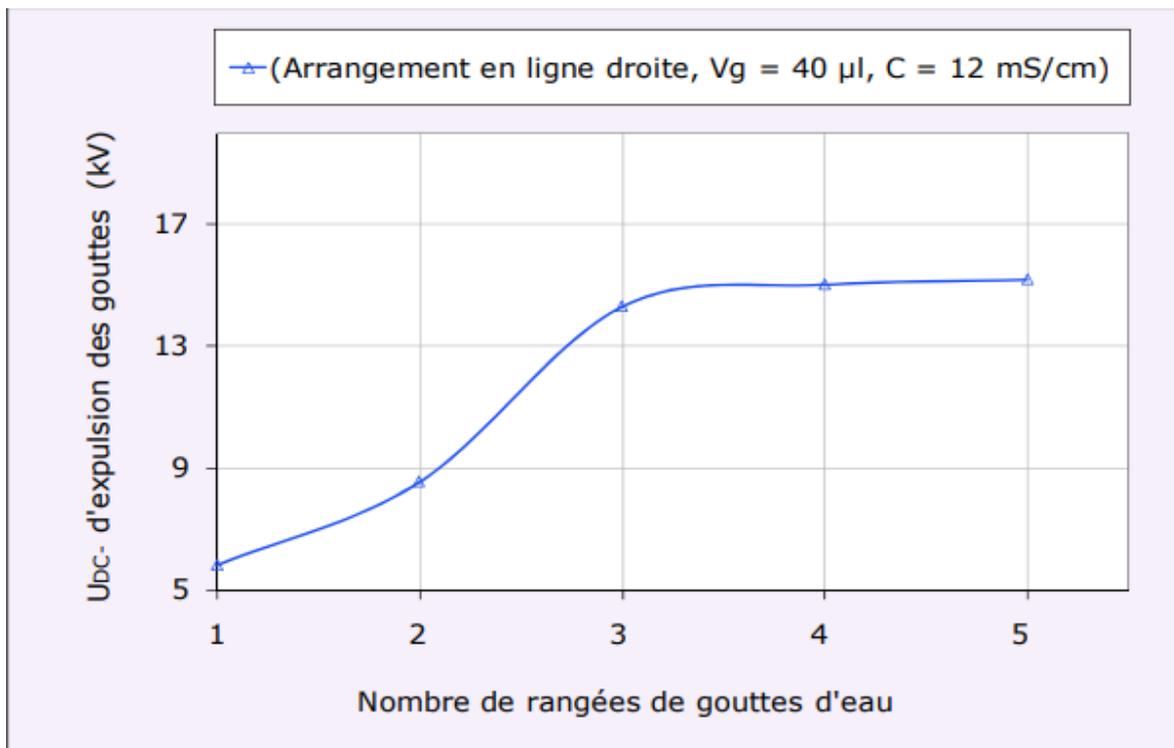


Figure I- 23 : Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe selon un arrangement en lignes droites

Concernant le volume des gouttes d'eau (Fig. I. 24). Les auteurs ont démontré que la tension d'éjection des gouttes d'eau diminue avec l'élévation de leur taille à cause de l'effet de cassie qui stipule que plus le volume des gouttes est élevé plus celles-ci reposent plus sur les sommets des aspérités de la surface de l'isolation, ce qui facilite leur évacuation sous une

tension

plus

faible.

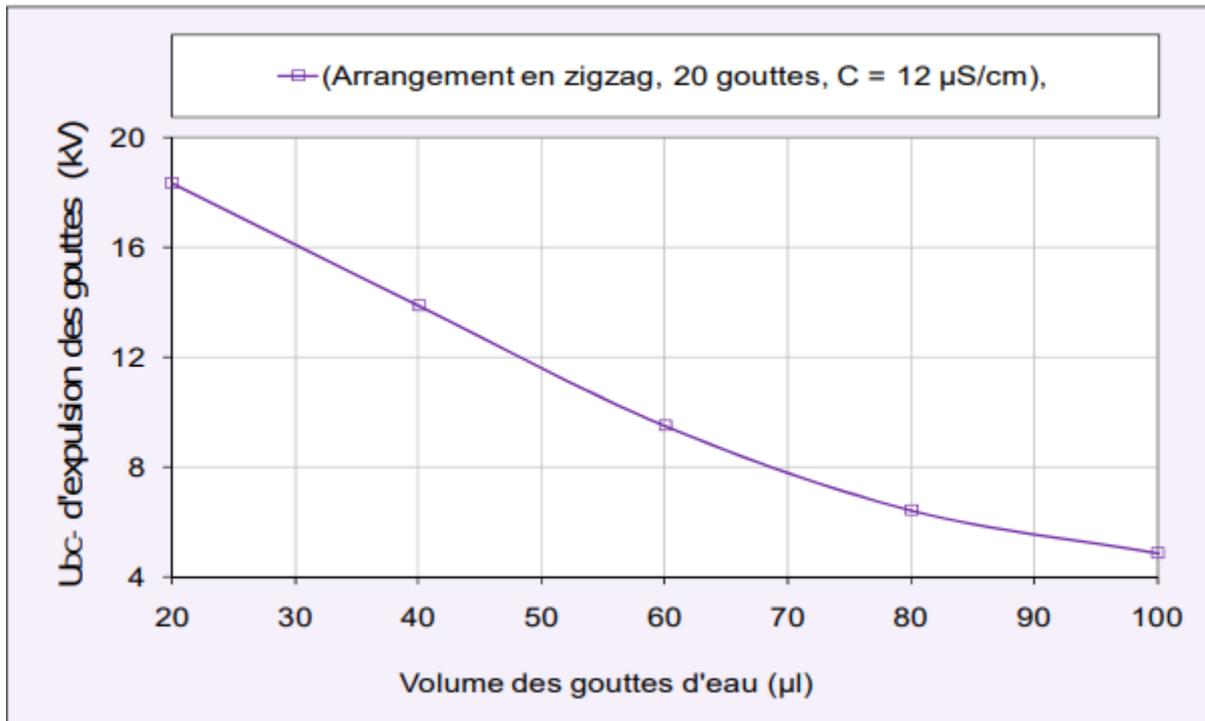


Figure I- 24 : Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur volume

Quant à la conductivité électrique des gouttes d'eau, les auteurs ont montré que celle-ci exerce un effet négligeable sur la tension de leur expulsion (Fig. I.25).

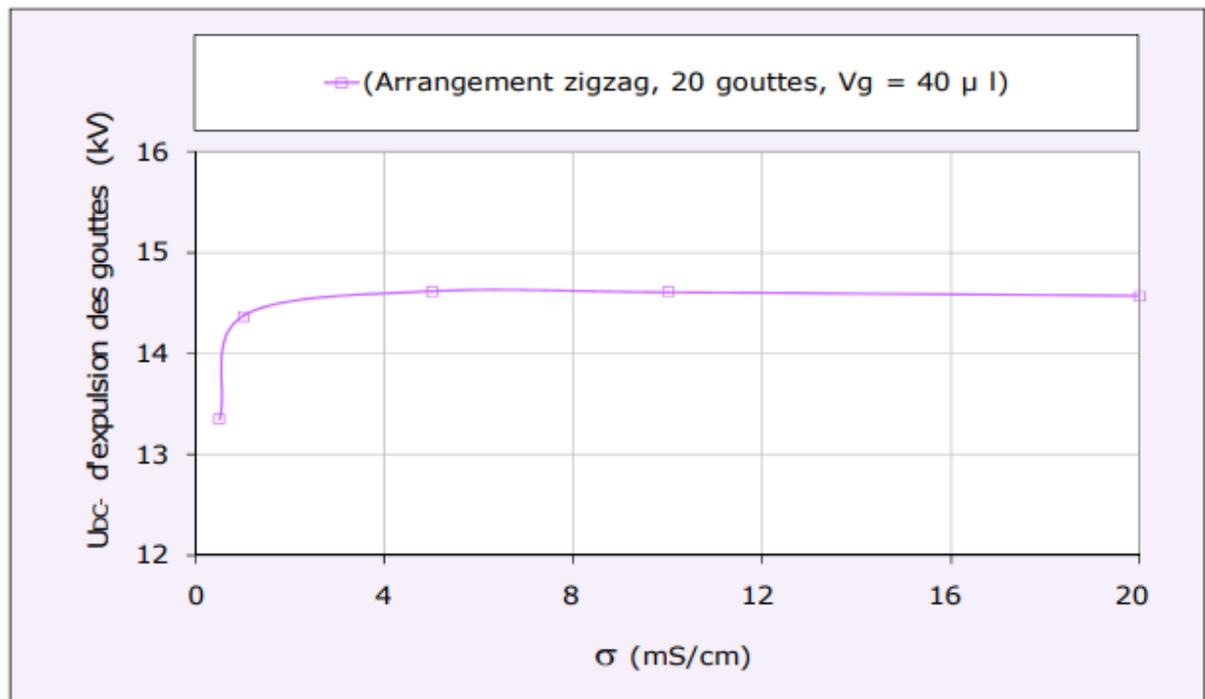


Figure I- 25: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité.

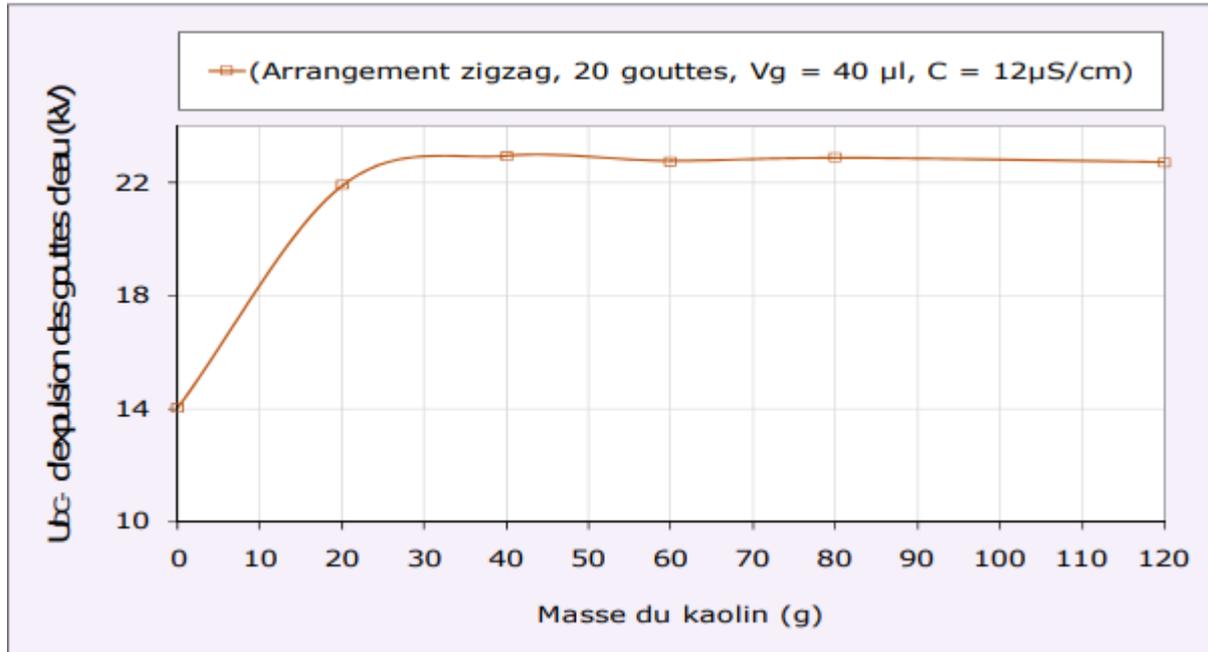


Figure I- 26: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau déposées sur la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de la masse du kaolin ajoutée à la solution

Les auteurs ont comparé les résultats du mode d'arrangement des gouttes d'eau, ils ont trouvé que la tension d'évacuation des gouttes est plus grande sous un arrangement en lignes droites qu'en zigzag (Fig. I. 27).

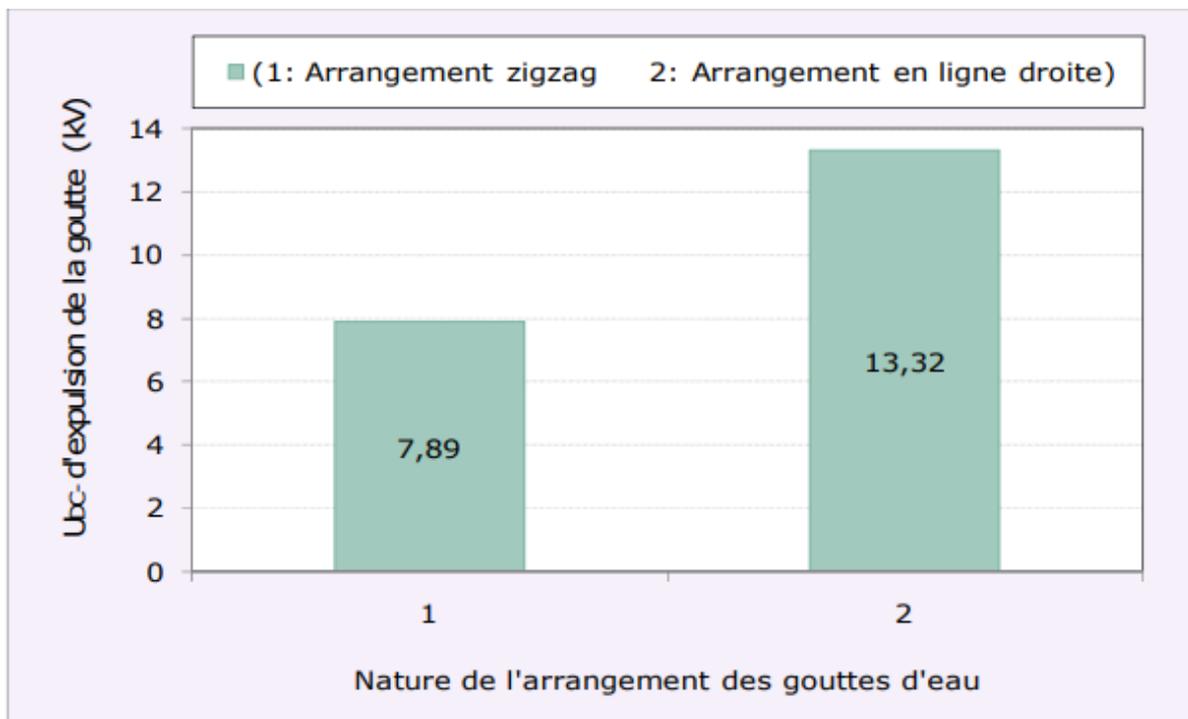


Figure I- 27: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de leur arrangement.

Les auteurs ont montré que sous tension continue négative, les électrodes à pont présentent un meilleur profil que celle pleines et à dents vu que les décharges électriques apparaissent très rarement (Fig. I. 28).

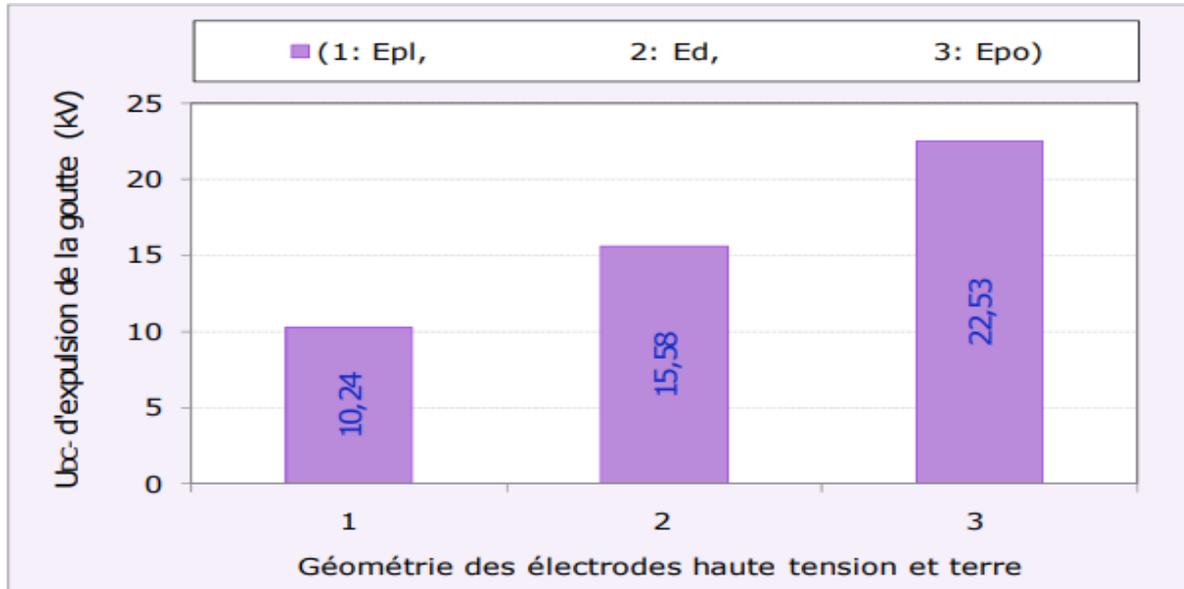


Figure I- 28: Tension continue négative d'expulsion des gouttes d'eau recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe en fonction de géométrie des électrodes (Epl : Electrode pleine, Ed : Electrode à dent, Epo : Electrode à pont)

Cependant le travail de Melle S .ALOUACHE S, KADRI .R et BOUYAHMED.R [32] consiste en la prédiction de l'ordre et du sens du mouvement des gouttes d'eau au moyen de la distribution de l'intensité du champ et potentiel électrique continue résultant au niveau de celles-ci à l'aide du logiciel COMSOL multiphysique version 5.0. Lors de cette étude de simulation, les paramètres d'influence du champ et potentiel électrique, comme le volume des gouttes d'eau, le nombre de couches superhydrophobes de revêtement en suite de l'isolation, la permittivité du couvert diélectrique du matériau essayé ainsi que le niveau de tension continue appliquée à l'isolation ont été pris en considération.

### I.11.1 Logiciel de simulation du champ et potentiel électrique

La technique de modélisation et de simulation utilisée dans le cadre de cette étude repose sur la méthode des éléments finis au moyen du logiciel COMSOL Multiphysique. Le modèle géométrique utilisé est basé sur le modèle expérimental. Dans le cadre de leur étude, le nombre maximal de gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe horizontale est égal 5. Ces gouttes d'eau sont arrangées en ligne droite perpendiculaire aux électrodes HT et terre. Cette rangée est placée au milieu de la surface de l'isolation. (Fig. I.29)

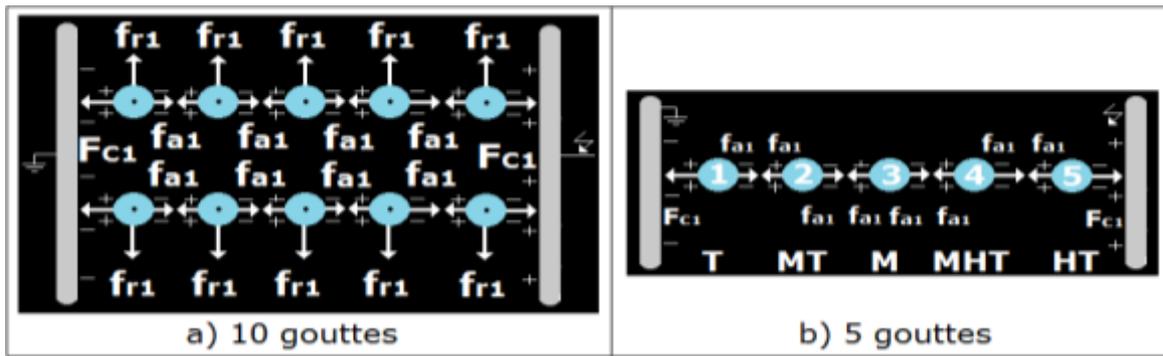


Figure I- 29: Ensemble des forces électriques exercées sur un dépôt de 10 ou 5 gouttes d'eau sous polarité positive de la tension continue et sous arrangement en lignes droites (Ad) (Fci: Force de Coulomb, Fai: Force d'attraction mutuelle, Fri: Force de répulsion m)

Dans leur étude, ils ont prédit le sens du mouvement des gouttes d'eau au moyen de la distribution du champ électrique le long d'une rangée de 5 gouttes d'eau reposant sur une isolation superhydrophobe. Les résultats de simulation de la répartition du potentiel et du champ électrique sur un nombre de gouttes d'eau variable recouvrant une isolation à 1 ou 4 couches de revêtement en suie superhydrophobe sans ou avec couvert à permittivité variable sont résumés dans les figures (I.30 , I. 31). La tension appliquée à l'isolation est de 25 kV.

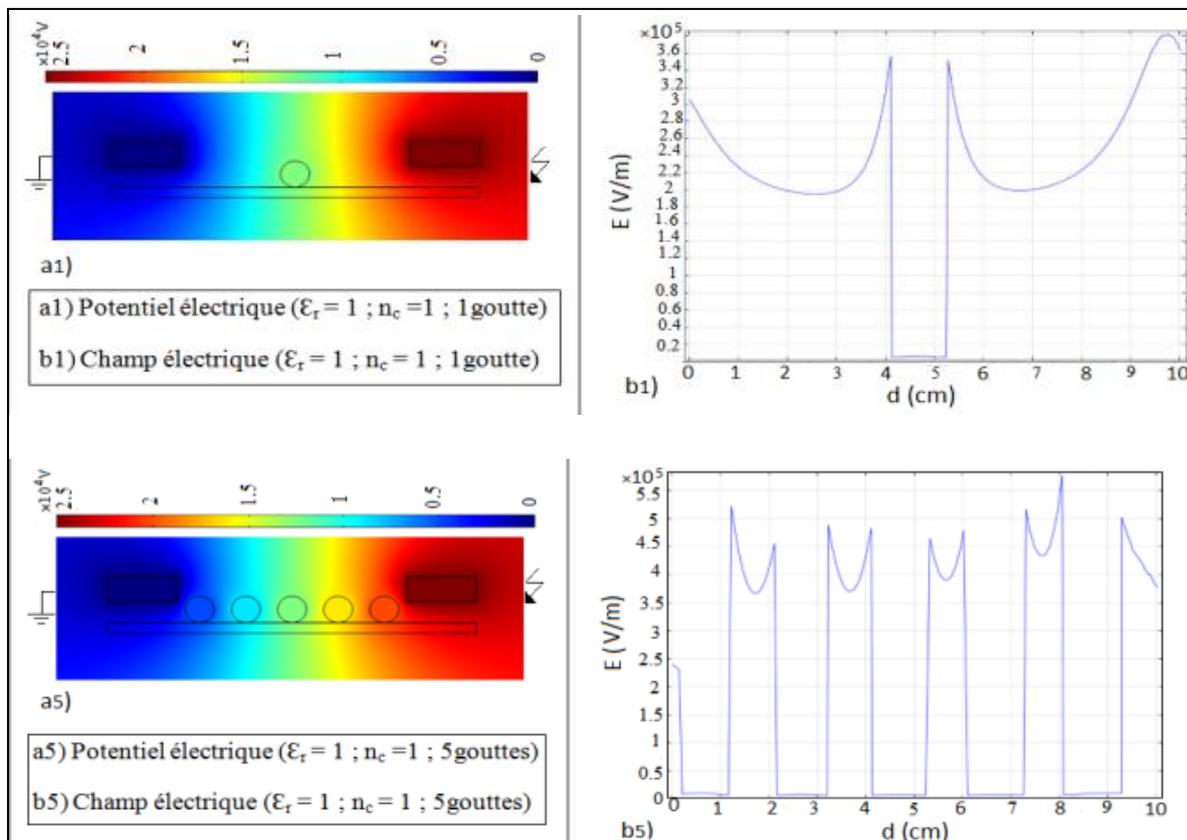


Figure I- 30: Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre de gouttes variable reposant sur une isolation à une couche ( $\epsilon_r = 1 ; \sigma_v = 20 \mu\text{S/cm} ; V_d = 100 \mu\text{l} ; U_a = 25 \text{ kV}$ )

Il résulte de la figure I.30 une amplification de l'intensité du champ électrique avec l'augmentation du nombre de gouttes d'eau de 1 à 5, indépendamment du degré de couverture diélectrique de l'isolation. Pour un nombre de gouttes bien déterminé, par exemple 5 gouttes, ils ont prédit qualitativement le sens et l'ordre d'évacuation des 5 gouttes d'eau selon l'intensité du champ électrique résultant et illustré respectivement par la figure I.30b5, ils ont constaté que leurs résultats de simulation avec le logiciel COMSOL Version 5.0 du mouvement des gouttes d'eau. Sont conformes à ceux établis expérimentalement dans les cas de 25 gouttes ou 5 gouttes disposées perpendiculairement ou parallèlement aux électrodes indépendamment de la présence ou de l'absence de couvert de l'isolation. Il ressort de la caractéristique  $E_r = f(nc)$ , que l'intensité du champ électrique résultant ( $E_r$ ) d'une isolation à 4 couches de suie superhydrophobe (Fig. I. 31) est légèrement supérieure à celle du champ résultant d'une isolation à une seule couche (Fig. I. 30) quels que soient le nombre de gouttes déposées et le degré de couverture de l'isolation.

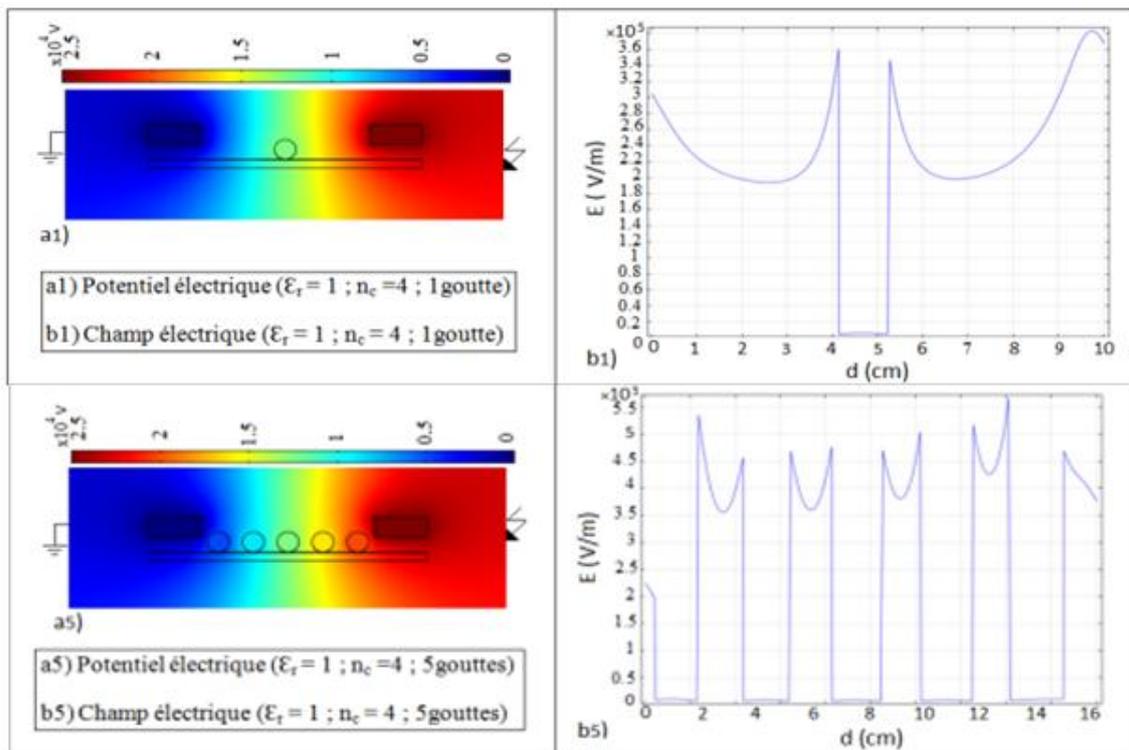


Figure I- 31 : Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes reposant sur une isolation à 4 couches sans couvert ( $\sigma_v = 20 \mu\text{S}/\text{cm}$  ;  $V_d = 100\mu\text{l}$  ;  $U_a = 25 \text{ kV}$ ).

Les auteurs ont observé l'évolution de l'intensité du champ et potentiel électrique résultant en fonction de la permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) du couvert diélectrique pour un nombre de gouttes d'eau et de couches de suie superhydrophobe variable. Ils ont déduit qu'il en résulte un déclin

très léger de l'intensité du champ électrique résultant avec l'élévation de la permittivité relative indépendamment du nombre de gouttes et de couches de l'isolation superhydrophobe.

Ainsi l'effet du nombre sur la qualité de la rugosité de la surface de l'isolation s'avère en conformité avec les résultats de leur simulation.

### I.11.2 Effet du couvercle à épaisseur variable

La figure I. 32 illustre l'évolution de l'intensité du champ et du potentiel électrique régnant sur un nombre de gouttes d'eau variable, déposées sur la surface d'une isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité électrique.

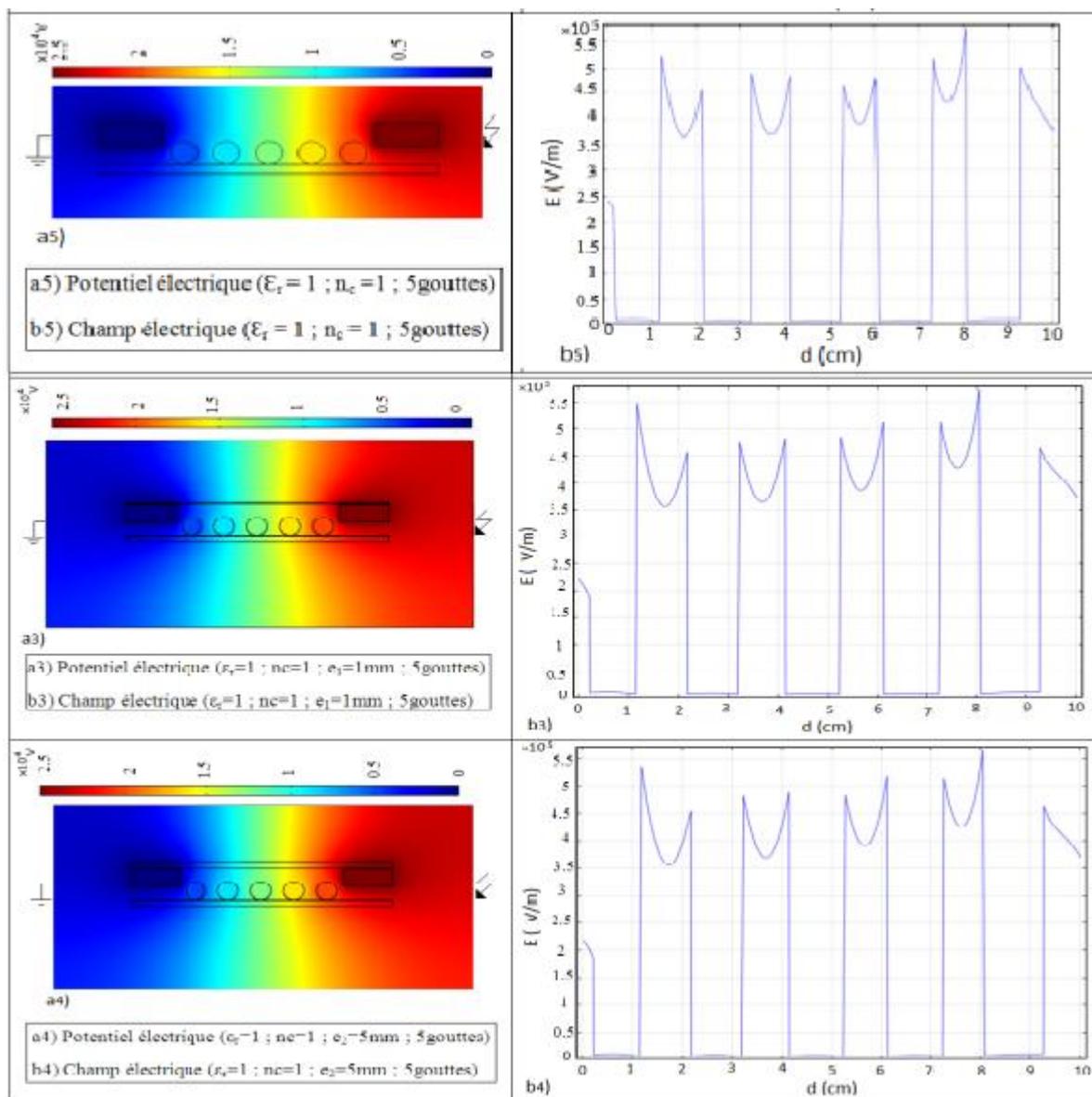


Figure I-32 : distribution du potentiel et champ électrique de 5 gouttes reposant sur une isolation a une couche sans et avec couvert à deux épaisseurs différentes ( $\epsilon_r = 1$ ,  $U_a = 25\text{KV}$ ,  $d = 10\text{cm}$ )

### **Conclusion**

Ce chapitre donne une idée générale sur les isolateurs HT et la superhydrophobicité des surfaces et les divers types d'objets, plants, d'animaux et d'insectes qui ont la même propriété que la superhydrophobicité et les Propriétés électriques d'un matériau. Ainsi on a cité quelques résultats essentiels obtenus par des auteurs sur les performances des surfaces superhydrophobes sous tension continue négative et la distribution du champ et potentiel électrique sur une isolation superhydrophobe avec gouttes d'eau sous tension continue.

## Chapitre II : Pollution des isolations électriques

## **Introduction**

Les isolateurs dans les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont sujet à différents incidents dus dans la majorité des cas, au dépôt de la pollution suite à une interaction entre le vent et les poussières diverses ; une couche de pollution se dépose sur la surface de l'isolateur. Cette couche de pollution, plus ou moins conductrice, donne naissance à un courant de fuite circulant à travers la surface de l'isolateur. Le passage de ce courant provoque des assèchements locaux sur cette surface ; des arcs électriques prennent naissance et peuvent se développer le long de la surface isolante jusqu'au contournement de l'isolateur et la mise hors service de l'ouvrage. Par conséquent différentes méthodes sont disponibles pour mesurer la sévérité de pollution.

## **II.1 pollution des isolateurs HT**

### **II.1.1 Pollution**

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui lie en général à sous-production de l'activité humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et en produits biologiques. Elles peuvent aussi affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités réactives du milieu [33] [34].

### **II.1.2 Couche de pollution**

C'est une couche conductrice électrolytique mise sur la surface de l'isolateur. Elle est composée du sel et des matériaux inertes. Cette couche de pollution, quand elle est humidifiée, réduit considérablement la résistivité surfacique des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tenue diélectrique [35].

### **II.1.3 Degré de pollution**

C'est la valeur qui caractérise la pollution artificielle appliquée sur l'isolateur, tel que la quantité (salinité, conductivité de la couche et densité du dépôt de sel)

Selon la CEI 81-5, les degrés de pollution classés en quatre niveaux qui sont : faible, moyenne, fortes et très forte [36].

### II.1.4 Salinité

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

## II.2 Sources de pollution

Du fait de la variété des origines de la pollution, la nature de celle-ci peut être classée en trois catégories, à savoir la pollution naturelle, artificielle et la pollution mixte.

### II.2.1 Pollution naturelle [37]

La pollution naturelle provient :

- Des sels marins dans les régions côtières.
- Des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants ou des régions agricoles).
- Des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

### II.2.2 Pollution artificielle [38]

Cette pollution est observée au voisinage des usines métallurgiques, chimiques ou même au bord des centrales thermiques où les isolateurs se recouvrent de poussière faiblement conductrice, mais très hygroscopique. Le dépôt de pollution peut se constituer par la fixation de particules solides telles que les dépôts ferromagnétiques issus des usines métallurgiques et de l'absorption de gaz présent dans les fumées. Dans des conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la poussière provoque la formation d'une couche conductrice

Le tableau 2 résume quelques composants d'une couche de pollution déposée sur isolateurs installés près d'une centrale électrique.

**Tableau 2 : Constitution chimique de la poussière émise par une centrale électrique en Pologne**

Constituants	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	CaO	MgO	$SO_3$	$Na_2O$	$K_2O$
Poids %	48.5	26	12.5	4.7	4.7	1.3	0.7	1.7

### II.2.3 Pollution mixte [37].

Ce type de pollution est le plus dangereux ; c'est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone, comme dans le cas des zones industrielles se trouvant en régions côtières.

### II.3 Classement de degrés de pollution

Afin d'évaluer l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la méthode de brouillard salin et les conditions de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées dans le tableau suivant :

Classe	Correspondance
<b>Classe 1</b>	Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2,5 g/l de concentration.
<b>Classe 2</b>	La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.
<b>Classe 3</b>	Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. Il s'agit donc de zones à densité industrielle importante, de grandes villes ou de zones proches de la mer soumises à l'action directe des embruns. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80 g/l.
<b>Classe 4</b>	La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle ou mixte. La salinité équivalente maximale pour la classe 4 est de 160g/l.

### II.4 Sévérité de degré de pollution

La Sévérité de la pollution constitue le facteur le plus influent sur les tensions de tenue diélectrique des isolateurs, donc, il faut bien tenir compte du degré de pollution lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de transport et de l'appareillage de haute tension. La difficulté majeure est que la sévérité de la pollution se présente comme un ensemble de facteurs, tout aussi complexes les uns que les autres. Les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de tenue des isolateurs. La connaissance du degré de pollution est par conséquent une condition préalable

et indispensable pour apprécier le niveau d'isolement des ouvrages installés sur site, en vue d'un dimensionnement convenable de l'isolation [39].

## II.5 Méthodes de mesure de la sévérité d'un site sont

### II.5.1 Densité du dépôt de sel équivalent

Des échantillons de sel sont prélevés à la surface d'un isolateur témoin par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier) et de l'eau distillée. Le dépôt est ensuite dissout dans une quantité de solution connus [40].

L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle est souple et peut être utilisée à n'importe quel endroit du réseau. Elle permet aussi de quantifier et de qualifier la non-uniformité de la pollution.

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.

## II.6 Conductivité électrique des couches de pollution

### II.6.1 Conductance superficiel [41]

A l'aide de mesure de courant de fuite d'un isolateur pollué dans un site donné, nous mesurons le rapport :

$$G = I/V \quad \text{Avec :}$$

I : le courant en(A)

V : la tension en (V)

G : la conductance en (S)

La conductivité superficielle  $\sigma$  est obtenue en multipliant la conductance G 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.

$$\sigma = f \cdot G$$

Avec :

f : Le facteur de forme

**II.6.2 Densité du dépôt non soluble (DDNS)**

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (fig. II.1) s’effectue comme suit,

La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l’aide d’un papier filtre, le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé. La DDNS peut être calculée par la formule (II-1) :

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \tag{II-1}$$

Où

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

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

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

A : est la surface lavée de la barrière en  $cm^2$  ;

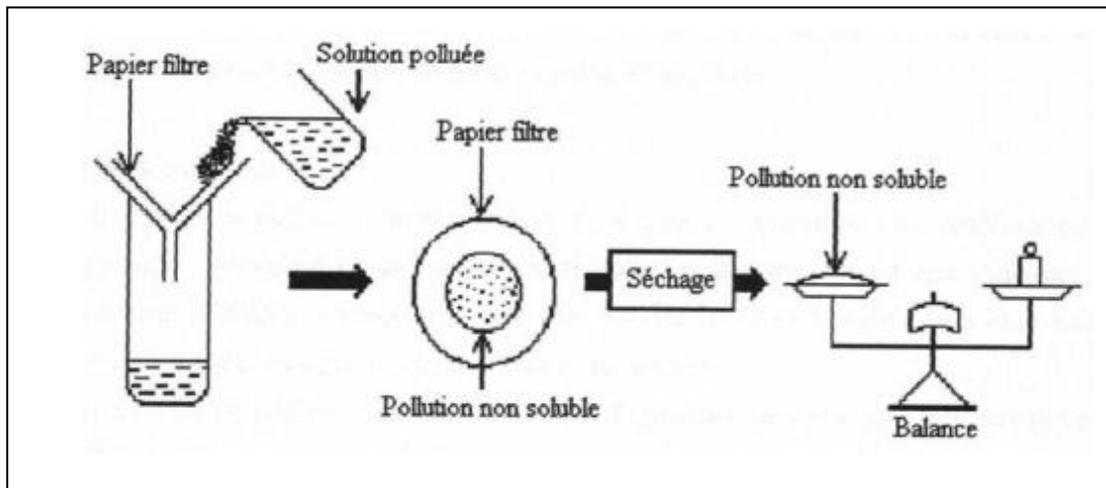


Figure II- 1: Schéma et procédé de mesure de la DDNS

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

Parmi les facteurs climatiques et météorologiques essentiels on distingue [42] :

**II.7.1 Vent**

C'est l'entité qui facilite le transfert de la poussière et du sel de l'océan ainsi que des algues.

La manière dont les dépôts polluants se déposent sur les surfaces des isolateurs. A l'inverse, il peut être considéré comme un agent autonettoyant si sa vitesse est élevée.

**II.7.2 L'Humidité**

Elle affecte négativement la surface contaminée des isolateurs, c'est parce qu'elle provoque une augmentation de la conductivité de la couche de pollution, c'est particulièrement vrai pendant les premières heures du matin, notamment pendant les périodes sèches.

**II.7.3 Température**

Contrairement à l'humidité, l'augmentation de température favorise l'assèchement des dépôts polluants, ce qui augmente leur résistivité et ainsi la rétention d'isolants contaminés devient plus important. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et d'humidité dans la couche de pollution.

**II.7.4 Pluie**

Les fines pluies humidifient les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de pollution, ce qui augmente le risque de contournement. Cependant, les fortes pluies permettent le nettoyage des surfaces polluées.

**II.8 Conséquences de la pollution**

Quel que soit la nature du dépôt de pollution accumulé progressivement sur les surfaces des isolateurs, son humidification provoque la formation d'une couche électrolytique, caractéristique du phénomène de pollution.

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

**II.8.1 Arc non localisé**

Un arc est dit non localisé, lorsque la surface d'un isolateur est amorcée par un arc et qui s'éteint rapidement pour se réamorcer à un autre endroit. Ce phénomène ne cause pas de dommages pour l'installation, malgré l'apparition de courant de fuite à la surface de l'isolateur.

**II.8.2 Arc fixe**

L'arc se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Il peut provoquer une dégradation de l'isolation par son effet thermique.

**II.8.3 Court-circuit**

Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Entraînant la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorisant le passage d'un fort courant, ce cas provoque la rupture totale de l'isolation [43]

## II.9 Phénomène de contournement

### II.9.1 Définition

Désigne une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier (cas d'isolateur). Le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur.

### II.9.2 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. La tension de contournement dépend [44] :

- La nature de la tension et sa polarité ;
- La forme des électrodes (pointe-plan, plan-plan, etc.) ;
- De la résistivité volumique moyenne de la pollution ;
- De la répartition de la couche de pollution ;
- De la longueur de l'isolateur ;
- Du profil de l'isolateur.

### II.9.3 Contournement des isolateurs pollués

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

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

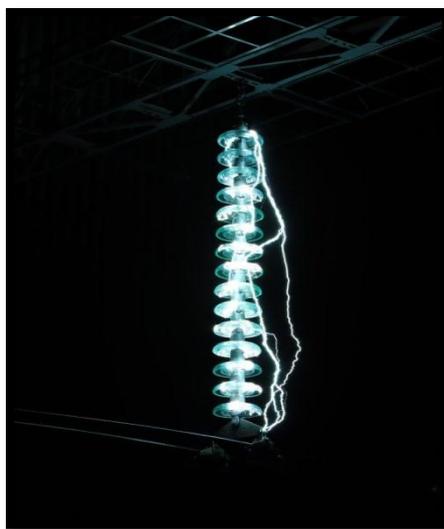
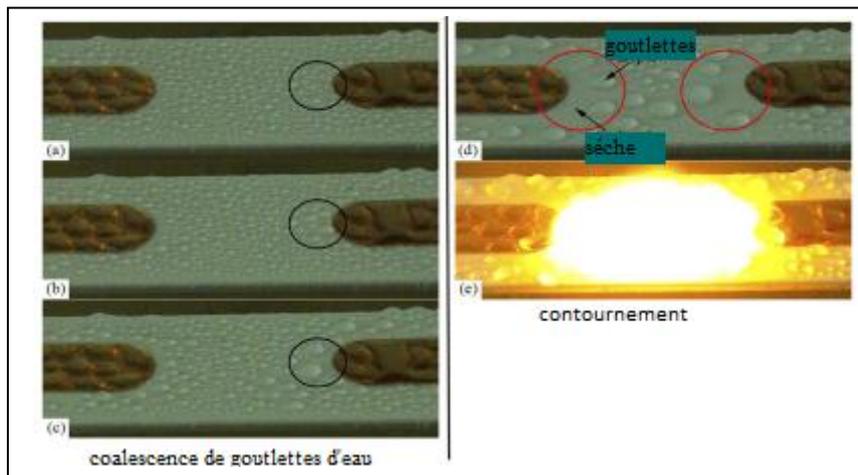


Figure II- 2: contournement d'un isolateur pollué [45]

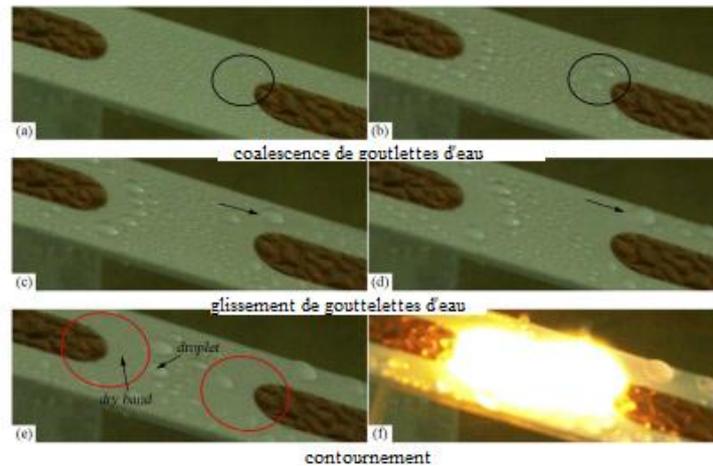
**II.10 Contournement des surfaces isolantes [46]**

Comme le montre la Fig. II.3, le processus de contournement sur une surface commune en caoutchouc de silicone placée horizontalement contenait 2 parties : la coalescence des gouttelettes d'eau [Fig. II.3 (a)–(c)] et le Contournement s'est finalement produit [Figure. II.3 (d) –(e)]. Après que les surfaces courantes en caoutchouc de silicone ont été mouillées par le brouillard salin, un grand nombre de petites gouttelettes d'eau étaient présentes à la surface [Fig. II.3 (a)]. Après l'application de la tension, elle fusionne et forme de grosses gouttelettes [Fig. II.3 (b)] et la forme des gouttelettes était hémisphérique. Au fur et à mesure que la tension augmentait en continu, des gouttelettes plus grosses se formeraient à la surface [la figure II.3 (c)]. Le phénomène juste avant l'embrassement a été illustré à la figure II.3 (d). Par rapport aux gouttelettes d'eau sans tension appliquée [Fig. II.3 (a)], le nombre de gouttelettes d'eau était beaucoup moins, alors que le volume de gouttelettes était beaucoup plus grand [Fig. II.3 (d)] en raison de la coalescence des gouttelettes d'eau. Et il y avait de nombreuses régions de bande sèche autour des électrodes [la figure II.3 (d)]. Lorsque le contournement s'est produit, un arc lumineux est apparu à la surface [Fig. II.3 (e)].



**Figure II- 3: Processus de contournement lorsqu'une surface en caoutchouc de silicone commune a été placée horizontalement. (a)–(c) Coalescence de l'eau gouttelettes avec la tension croissante, (d) –(e) Phénomène juste avant l'amorçage (d) et l'amorçage s'est produit**

La figure II.4 montre le processus de contournement lorsqu'une surface commune en caoutchouc de silicone est placée à un angle d'inclinaison de 20°. L'ensemble du processus contenait principalement 3 parties : la coalescence des gouttelettes d'eau



**Figure II- 4: Processus de contournement lorsqu'une surface commune en caoutchouc de silicone a été placée à 20°. (a)–(b) Coalescence des gouttelettes d'eau, (c)–(d) Glissement de gouttelettes d'eau, (e)–(f) Phénomène juste avant l'embrassement (e) et l'embrassement (f)**

[Figure. II.4 (a)–(b)], glissement de gouttelettes d'eau [Fig. II.4 (c)–(d)] et un contournement s'est produit [Fig. II.4 (e)–(f)]. De nombreuses petites gouttelettes étaient présentes sur la surface sans tension appliquée [Fig. II.4 (a)]. Alors, tout comme la situation où la surface commune était placée horizontalement, les petites gouttelettes d'eau fusionnent et deviennent de grosses gouttelettes avec une tension croissante [figure II.4 (b)].

Cependant, par rapport à la surface horizontale en caoutchouc de silicone, en raison de la surface inclinée, les gouttelettes ont dû souffrir gravité ( $mg \sin 20^\circ$ ) le long de la surface. Ensuite, les gouttelettes glisseraient sur la surface sous l'effet de la gravité [flèche noire sur la Fig. II.4 (c)] et être éloigné des électrodes [Fig. II.4 (d)].

Par conséquent, par rapport à la situation où la surface était placée horizontalement, il y avait moins de gouttelettes d'eau et plus de régions de bande sèches autour des électrodes juste avant le contournement [région du cercle rouge dans Fig. II.3 (d) et Fig. II.4 (e)].

## II.11 Techniques de lutte contre la pollution

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées [47].

Les différentes techniques utilisées pour la lutte contre la pollution sont :

### II.11.1 Allongement de la ligne de fuite

Elle permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution.

Deux méthodes sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.

- Rajout d'un matériau polymère à la surface de l'isolation existante dont le but est d'allonger la ligne fuite [48].

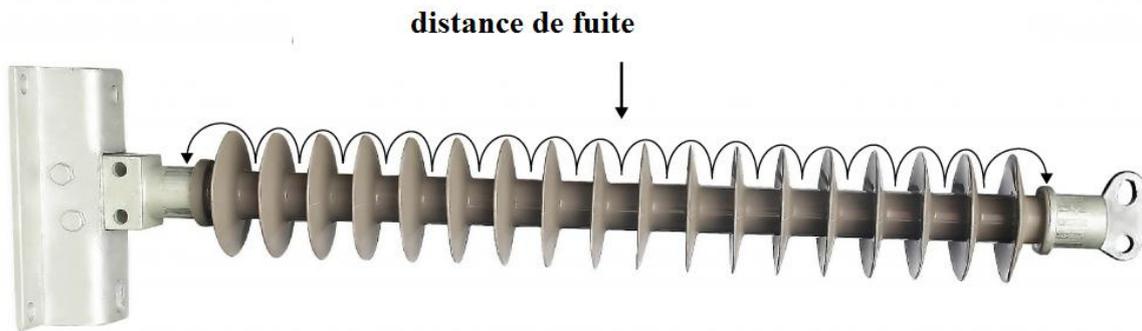


Figure II- 5: Allongement de la ligne de fuite.

### II.11.2 Graissage périodique

La graisse utilisée est à base de silicone. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement l'isolation [49].

### II.11.3 Revêtement silicone

Il consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Il protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est nettement supérieure à celle du graissage.



Figure II- 6: processus de revêtement à la silicone

### II.11.4 Les isolateurs composites

Ils ont aussi l'avantage d'être légers et d'avoir une grande résistance mécanique que leur confère le noyau. Ils ont également de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de contamination très sévères.

Ils sont constitués d'un noyau en fibre de verre imprégnée d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Cependant, ces isolateurs présentent l'inconvénient de vieillir en raison des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques et mécaniques) [50].

### **II.11.5 Nettoyage de l'isolation**

Afin d'éviter les coupures d'équipements électriques, des lavages d'isolants sous tension sont effectués à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, cela se fait selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et le respect des distances de sécurité pour exclure tout risque de contournement lors du lavage [49].

### **Conclusion**

Le comportement des isolateurs des lignes aériennes, et l'isolement externe d'une manière générale, est souvent affecté par le phénomène du contournement dû à la pollution. Donc La pollution de l'isolation est un facteur important à prendre en compte dans la conception des lignes électriques et des équipements dans le domaine de haute tension. Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. Cette sévérité réside dans l'étude de différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site. La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant (degré de pollution) ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante.

## CHAPITRE III : Partie expérimentale

## Introduction

L'objectif principal de ce travail est de caractériser et d'optimiser les performances électriques des surfaces isolantes superhydrophobes à base de silicone. Pour y parvenir, nous avons effectué des essais au laboratoire visant à évaluer l'évacuation des gouttes d'eau sur ces surfaces soumises à une tension continue positive en fonction de quelques paramètres électrogéométriques.

### III.1 Préparation de la surface isolante multicouche superhydrophobe

La Figure III.1 présente les étapes clés de la préparation de la surface superhydrophobe. Sur une plaque en verre neuve de dimensions (12x5x0.5) cm. Nous avons appliqué délicatement et uniformément une fine couche de silicone provenant du tube représenté dans la Figure III.1. Une quantité de silicone issue du même tube est également déposée sur un morceau de bois, que nous brûlons (Figure III.1). Ensuite, la plaque recouverte d'une couche de silicone est exposée à la flamme afin de la recouvrir de suie résultant de la carbonisation de la silicone (Figures III.1b et 1c). Enfin, la Figure III.1d montre une plaque entièrement noircie qui est ensuite nettoyée et rincée à l'eau du robinet. Pour obtenir des surfaces multicouche superhydrophobes, le processus de préparation peut être étendu en ajoutant des couches supplémentaires de silicone et de suie sur la plaque déjà préparé après l'avoir laissé séché pendant 24h .

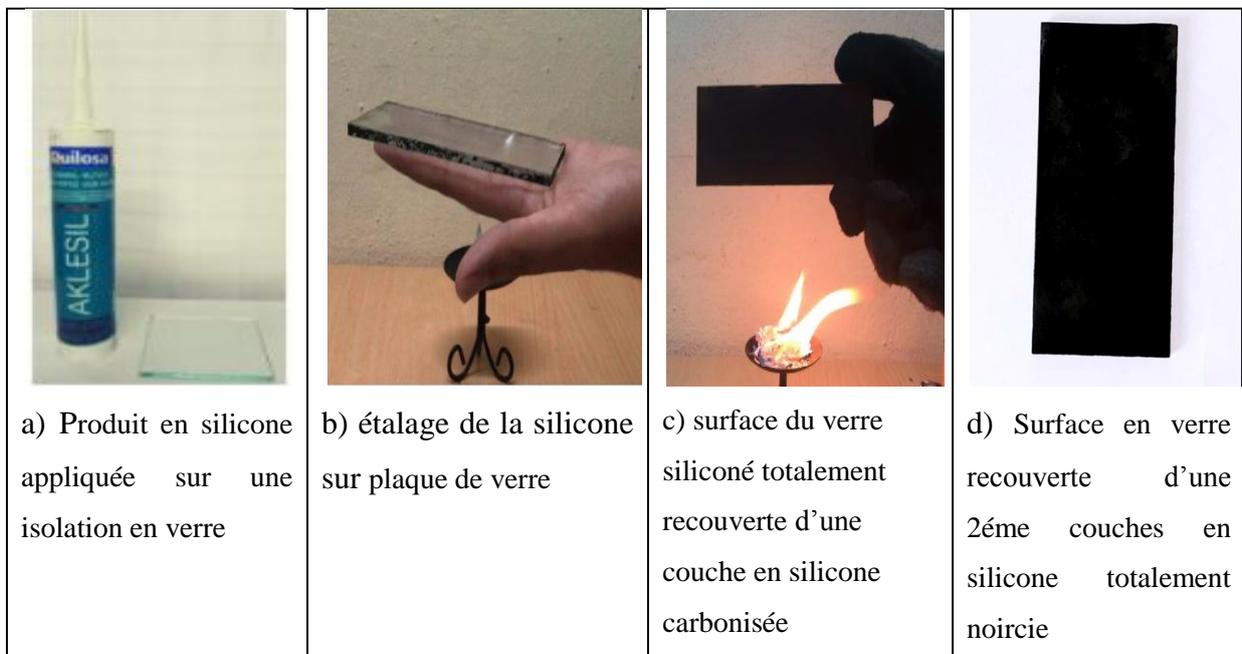


Figure III- 1 : Etapes essentielles de confection d'une surface en verre superhydrophobe.

### III.2 Modèle expérimental

Un support en bois avec une paroi supérieure mobile a été construit. Il a la forme d'un parallélépipède de dimensions 500 mm x 500 mm x 400 mm. Sa face supérieure est connectée à une rotule, ce qui lui permet de prendre différentes positions, y compris une position horizontale correspondant à un angle d'inclinaison de  $0^\circ$  ( $\alpha = 0^\circ$ ), comme illustré dans la Figure III.2. La position horizontale de l'isolation ( $\alpha = 0^\circ$ ) est choisie dans cette étude pour reproduire la situation la plus défavorable, où l'isolation superhydrophobe présente la plus faible performance électrique. Cela est dû à la faible mobilité des gouttes d'eau sous cet angle d'inclinaison et à la probabilité élevée de contournement de l'isolation par des décharges électriques. Ces décharges sont régies par les perles d'eau, qui coalescent et s'affinent sous l'effet d'un champ électrique quelconque [51-52].

#### III.2.1 profils d'électrodes suspendus

Parmi les trois géométries d'électrodes fabriquées lors des travaux antérieurs [31], seule la configuration des électrodes à pont permet l'éjection des gouttes d'eau hors de l'isolation, bien que certaines gouttes puissent rester à la base des électrodes. Cependant, la persistance et l'affinement de ces gouttes d'eau peuvent provoquer des décharges électriques partielles et/ou entraîner le contournement du matériau, ce qui peut entraîner une détérioration prématurée. Afin de résoudre ce problème, un ensemble d'électrodes en acier inoxydable a été fabriqué. Ces électrodes ont une forme parallélépipédique avec des extrémités très arrondies, comme illustré dans la Figure III.2. Leur largeur ( $l_e$ ) est de 30 mm, leur épaisseur ( $e_e$ ) est d'environ 8 mm et leur longueur ( $L_e$ ) est de 120 mm. La distance entre les électrodes ou la ligne de fuite de l'isolation considérée est de 40 mm (Figures III.2a1 et 2b4).

Les électrodes sont suspendues à une distance de 10 mm de la surface de l'isolation superhydrophobe à l'aide de deux pitons. Cet espace permet une évacuation facile et rapide des gouttes d'eau de l'isolation, qui sont collectées par un bac de couleur moutarde pour être récupérées (Figure III.2b6).

Un ensemble de deux électrodes pleines parallélépipédiques a été confectionné dans ce contexte.

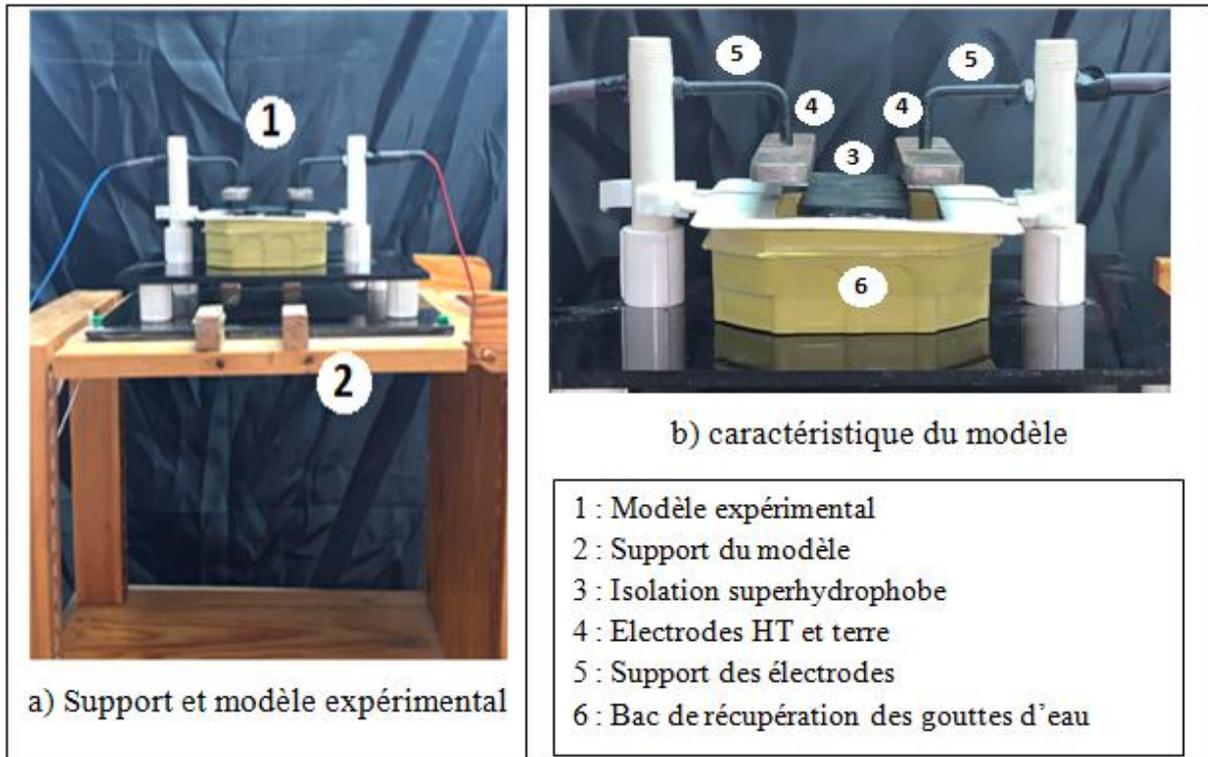


Figure III- 2: modèle expérimentale utilisé pour la réalisation des essais électriques

### III.2 Nombres et mode d'arrangement des gouttes d'eau sur la surface superhydrophobe

Dans le cadre de cette étude, une configuration spécifique de gouttes d'eau alignées en lignes droites sur la surface de l'isolation a été utilisée. La rangée de gouttes est disposée le long de la ligne de fuite de l'isolation (Fig. III.3). Elle est composée de cinq gouttes alignées de manière à maintenir des distances constantes entre les centres de ces gouttes et les électrodes sous tension ( $L_{dv}$ ) et de mise à la terre ( $L_{dg}$ ), ainsi qu'entre les centres des gouttes d'eau adjacentes ( $L_{dd}$ ) tout au long de l'expérimentation.

La première goutte est déposée à côté de l'électrode (HT), la deuxième entre le milieu de l'isolation et l'électrode haute tension (IHT), la troisième est déposée au milieu de la surface isolante (M), la quatrième entre le milieu de l'isolation et l'électrode terre (IT), enfin la cinquième au voisinage de l'électrode terre (T)

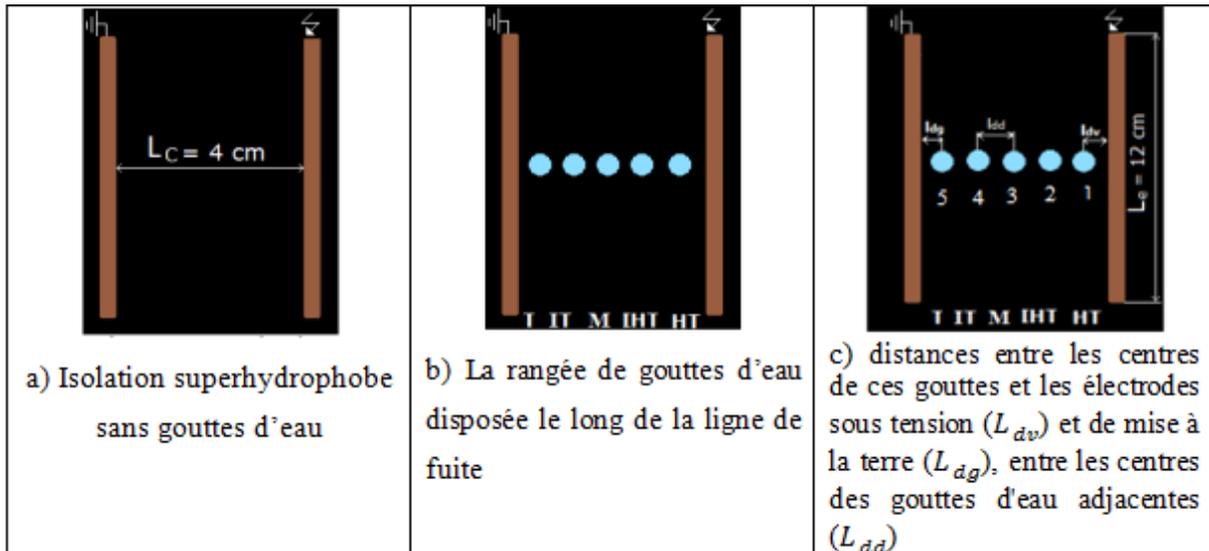


Figure III- 3: Emplacement des gouttes d'eau en lignes droites sur la surface de l'isolation

### III.3 Position et volume des gouttes d'eau

Une étude a été réalisée pour examiner l'impact du volume des gouttes d'eau sur les performances électriques de l'isolation superhydrophobe. Pour ce faire, une seule rangée de 5 gouttes d'eau a été utilisée, avec des volumes respectifs de (30, 50, 100)  $\mu\text{l}$  au moyen d'une micropipette graduée de 5 à 50  $\mu\text{l}$ . Ces valeurs ont été choisies en raison de la grande différence de taille entre les gouttes d'eau de pluie et de condensation naturelle.

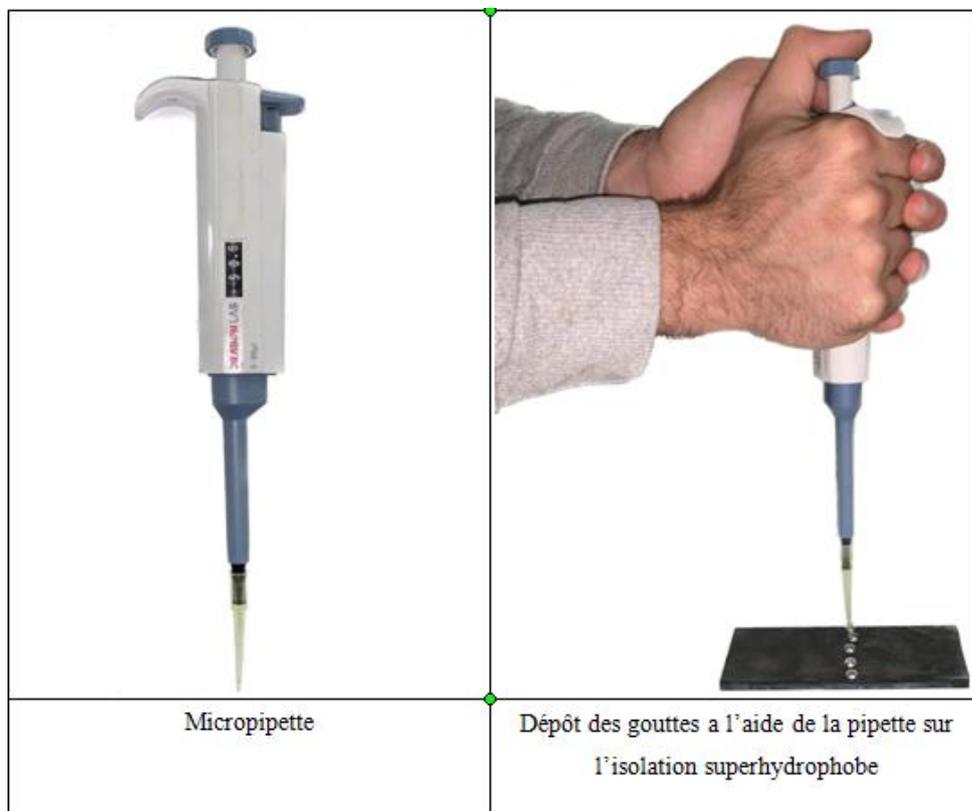


Figure III- 4: Micropipette de mesure de volume de gouttes d'eau graduée de 5 à 50  $\mu\text{l}$

**III.3.1 Mesure de tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante**

La tension continue d'essai de l'isolation est fournie par la station de mesure illustrée par la figure III.5. Celle-ci comprend principalement un transformateur élévateur délivrant à son secondaire une tension de 135 kV et un courant de 80 mA. Sa sortie est reliée au moyen de la diode D en connexion directe à la résistance d'affaiblissement de courant  $R_a$  (106 k $\Omega$ ), en dérivation avec le condensateur de lissage  $C_L$  (10 nF). Dans ces cas, les branchements de l'isolation superhydrophobe ( $S_{sh}$ ) et du voltmètre de crête ( $V_{DC}$ ) sont effectués respectivement aux bornes du diviseur de tension résistif ( $R_1/R_2$ ) et aux extrémités de la résistance de mesure  $R_2$ . Le bouton de montée de la vitesse de la rampe de tension d'essai est commandé manuellement. Pour chacune des grandeurs d'influence investiguées

Dans le cadre de ce travail, Un ensemble de 10 essais a été réalisé et la valeur retenue pour la tension d'éjection de chaque goutte d'eau est la moyenne arithmétique de toutes les mesures effectuées lors de la même série. En raison de la grande précision des techniques de mesure utilisées dans cette étude, l'erreur maximale relative obtenue est d'environ 5 % de cette valeur moyenne. [53 54]

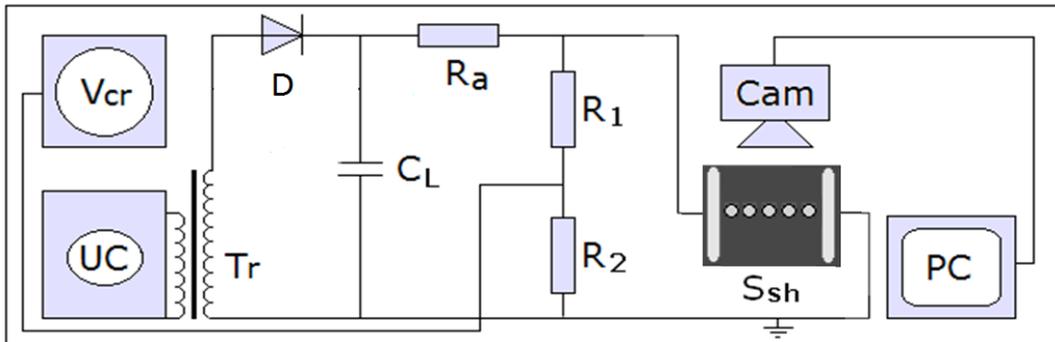


Figure III- 5: Schéma de mesure de la tension continue positive d'expulsion des gouttes d'eau de la surface

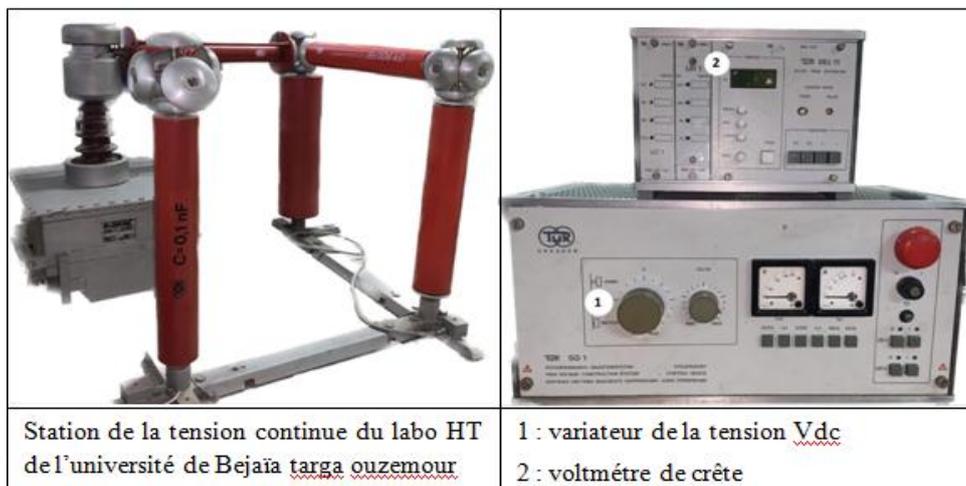


Figure III- 6: station de mesure de la tension

**III.3.2 Correction des résultats de tension en fonction des conditions atmosphériques**

Les conditions climatiques, telles que la température, la pression et l'humidité de l'air environnant, exercent une grande influence sur la tension d'évacuation des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante superhydrophobe. Dans des conditions normales de température ambiante, de pression et d'humidité ( $T = C^\circ$ ,  $P = 100 \text{ KPa}$  et  $H = 11 \text{ g/m}^3$ ), la valeur de la tension d'expulsion des gouttes peut être corrigée à l'aide de la relation suivante :

$$U_{c0} = \frac{K_H}{K_d} \cdot U_C \quad (\text{III. 1})$$

$U_C$ : Tension de contournement à la température  $\theta$ , à la pression  $P$  et à l'humidité  $H$  ;

$U_{c0}$ : Tension de contournement dans les conditions normales de température  $\theta$ , de pression  $P$  et d'humidité  $H$  ;

$K_d$ : Facteur de correction relatif à la température et à la pression ;

$K_H$ : Facteur de correction relatif à l'humidité ;

$$K_d = \frac{2.93 P}{273 + \theta} \quad (\text{III. 2})$$

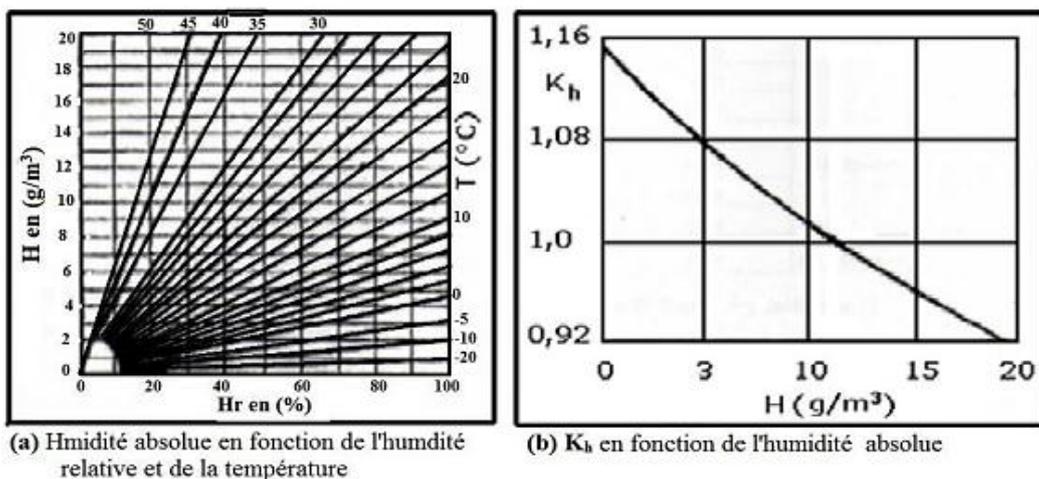
Ou :

$P$  : pression en kPa ;

$\theta$  : Température en  $C^\circ$ .

Afin de déterminer le facteur de correction  $K_H$ , il est nécessaire de convertir l'humidité relative (%) en humidité absolue (en  $\text{g/m}^3$ ), car  $K_H$  est donné en fonction de cette dernière. Le graphique de la figure (III-7) présente la transformation de l'humidité relative en humidité absolue en fonction de la température.

La valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque de la figure (III-7a) est reportée sur l'abaque de la figure (III-7b), pour déduire  $K_H$ ,



**Figure III- 7: Abaques de corrections en fonction de l'humidité et de la température**

### III.4 Résultats et interprétation

#### III.4.1 paramètres d'influence sur la tension d'évacuation des gouttes d'eau

D'après les résultats des travaux expérimentaux récemment publiés par K. Hamour et ses collègues [55], les forces hydrodynamiques et électriques responsables de l'élimination des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation peuvent être décrites par l'équation de Navier-Stokes. Cette équation repose sur la conservation des forces de mouvement et modélise le déplacement d'une goutte d'eau incompressible selon la formule suivante :

$$-\nabla P_{\Delta} + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F} = d \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) \quad (\text{III.3})$$

Ou :

-d,  $\mu$  et  $\vec{V}$  sont respectivement la densité du fluide, sa viscosité et sa vitesse ;

$-\nabla P_{\Delta}$ ,  $\mu \nabla^2 \vec{V}$  et  $\vec{F}$  représentent les effets de force dues à la pression, la viscosité et la force électrostatique exercée sur la goutte ;

La force électrostatique joue un rôle extrêmement important dans le mouvement de la goutte d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation [32]. Lorsqu'une goutte individuelle repose sur cette surface et est soumise à un champ électrique non nul, l'expression mathématique de cette force électrostatique est la suivante :

$$F = \rho_t E - \frac{1}{2} |E|^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left( |E|^2 \frac{d\varepsilon}{d\rho_m} \rho_m \right) \quad (\text{III.4})$$

Ou :

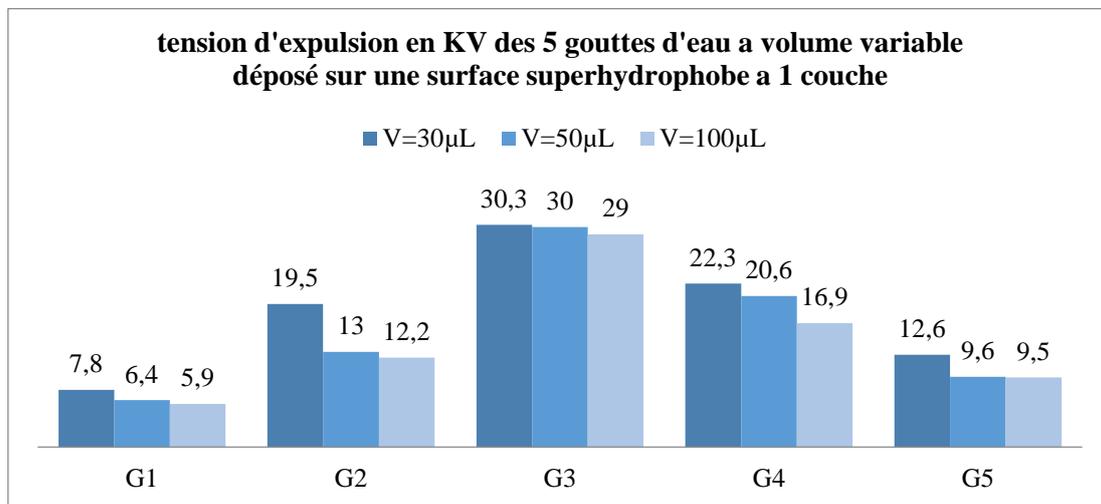
$E$ ,  $\rho_t$ ,  $\varepsilon$  et  $\rho_m$  sont respectivement le champ électrique, la charge totale, la permittivité absolue de l'eau et la densité volumique.

Les trois termes du côté droit de l'équation III.4 représentent respectivement la force de Coulomb, la force diélectrophorétique et la pression d'électrostriction. Dans le cadre de cette étude, les deux derniers termes sont négligés en raison de l'uniformité du champ électrique entre les électrodes planes et parallèles, ainsi que de la conservation de la forme sphérique de la goutte d'eau lorsqu'elle est éjectée de l'isolation. Par conséquent, l'éjection d'une goutte d'eau individuelle de l'isolation est pratiquement provoquée par la force de Coulomb.

Dans cette étude les paramètres d'influence sur la tension d'évacuation des gouttes d'eau sont : le nombre de couches de l'isolation superhydrophobe, le volume des gouttes d'eau et l'effet du couvercle. Le résultat de l'effet de chacun de ces facteurs est exposé aux paragraphes suivants.

#### III.4.2 nombres de couches de l'isolation superhydrophobe et le volume des gouttes d'eau

La figure III.8 illustre l'historique de la tension d'expulsion des cinq gouttes d'eau à volume variable (30, 50, 100)  $\mu\text{l}$  sur une surface isolante superhydrophobe à une couche. Il en découle que l'augmentation de volume des gouttes d'eau engendre une diminution de la tension d'expulsion des gouttes, en prenant la première goutte de volume 30  $\mu\text{l}$ , nous avons obtenu une tension d'expulsion de 7,8 KV. Comparativement à une goutte de 100  $\mu\text{l}$ , sa tension d'expulsion est de 5,9 KV, ce qui démontre que l'augmentation du volume des gouttes d'eau améliore la tension d'expulsion sur une surface isolante superhydrophobe. De plus, la position des gouttes le long de la trajectoire de l'isolation superhydrophobe indique que les gouttes situées plus près de l'électrode haute tension sont expulsées simultanément lorsque celle-ci est à proximité de l'électrode de terre.



**Figure III- 8: tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau a volume variable déposé sur une surface superhydrophobe à 1 couche (1C).**

La Figure III.9 représente l'évolution de la tension d'expulsion des cinq gouttes d'eau en fonction de leur volume pour une surface isolante à une couche. Les résultats montrent que la tension d'expulsion diminue à mesure que le volume des gouttes augmente, ce qui suggère une corrélation négative entre ces deux variables. Cependant, il convient de noter que la dernière goutte (G3) présente une légère baisse de tension d'expulsion, contrairement aux

autres gouttes où la diminution est plus importante. Cette différence peut être attribuée à la position de la dernière goutte, située au milieu. Les gouttes de petit volume se logent entre les aspérités de la surface isolante et nécessitent une tension d'expulsion plus élevée (effet Wenzel) pour être évacuées. En revanche, les gouttes de grand volume restent sur les aspérités de la surface (effet Cassis) et finissent par être expulsées avec une tension plus faible que les petites gouttes.

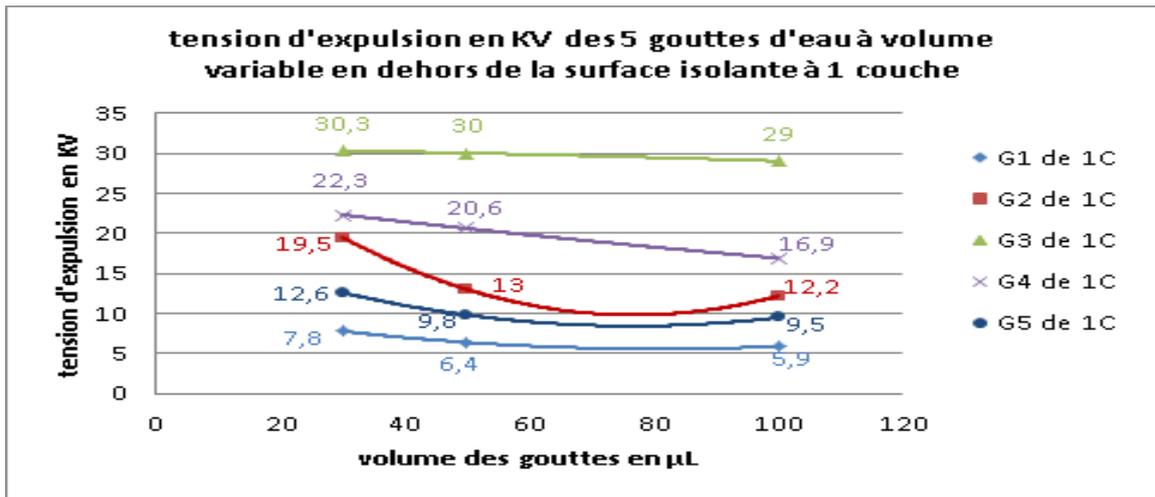


Figure III- 9: tension d’expulsion des 5 gouttes d’eau à volume variable en dehors de la surface isolante à 1 couche

La Figure III.10 présente l'histogramme de la tension d'expulsion de cinq gouttes d'eau à volume variable déposées sur une surface isolante superhydrophobe à deux couches. Les résultats indiquent que l'augmentation du volume des gouttes entraîne une diminution de la tension d'expulsion. De plus, l'ajout d'une couche supplémentaire réduit la tension d'expulsion par rapport à celle d'une seule couche, ce qui se traduit par une diminution de la tension pour toutes les gouttes, quel que soit leur volume.

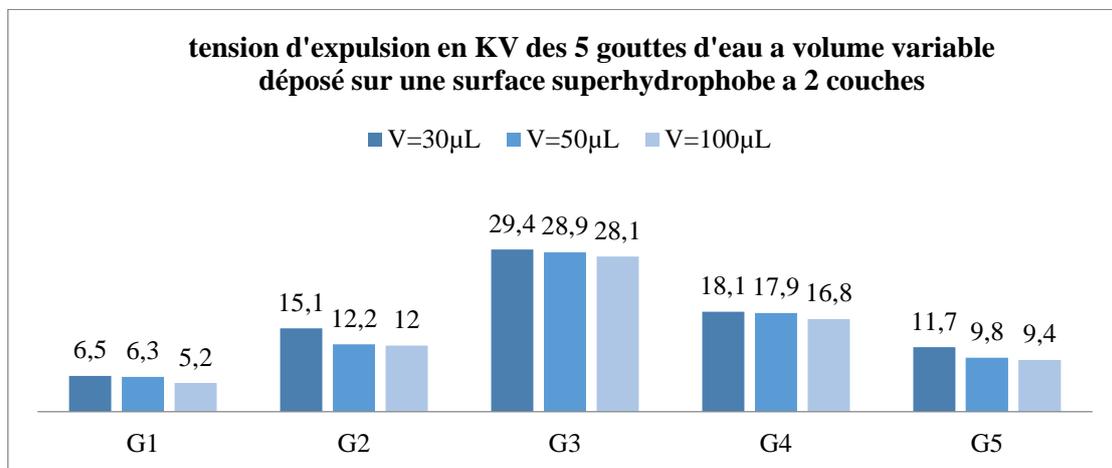


Figure III- 10 : tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau à volume variable déposé sur une surface superhydrophobe a 2 couches.

Dans la Figure III.11, le même graphe est présenté pour une surface isolante à deux couches. On observe une diminution de la tension d'expulsion pour les cinq gouttes par rapport à celle d'une couche. Cela est dû à la présence de la couche supplémentaire, qui améliore la performance de la surface isolante. De plus, la tendance générale montre que la tension d'expulsion diminue avec l'augmentation du volume des cinq gouttes, ce qui est cohérent avec les observations précédentes.

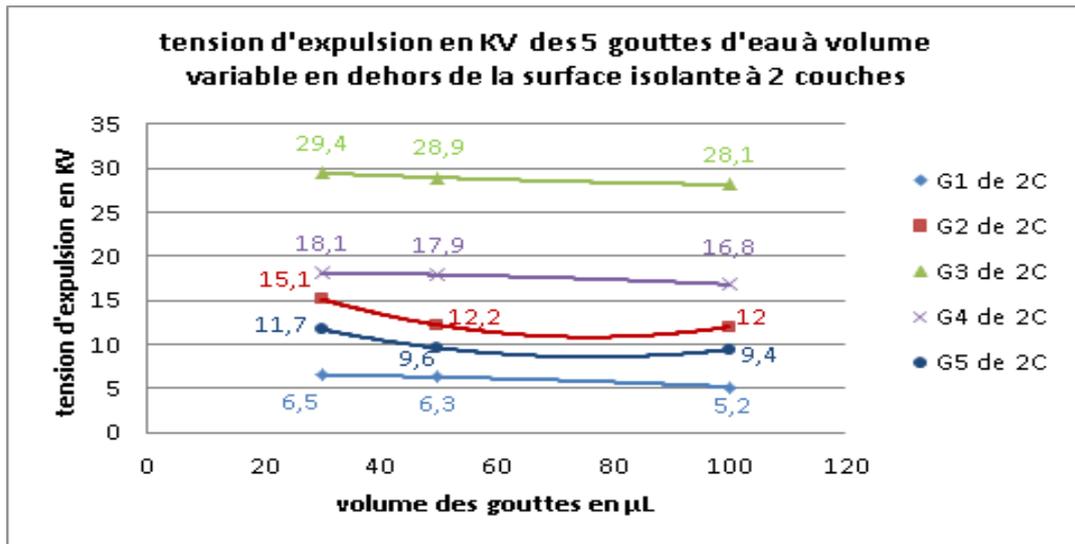


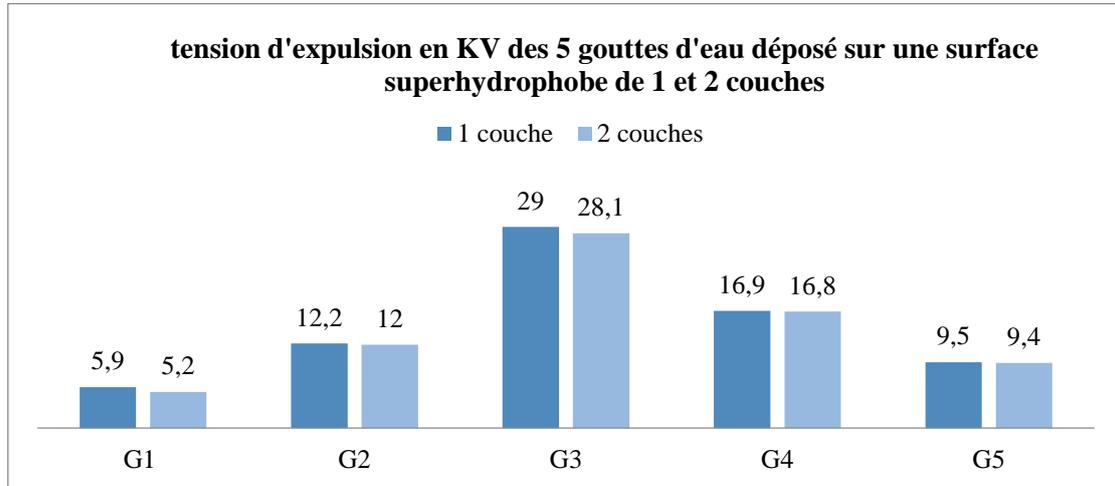
Figure III- 10: tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau à volume variable en dehors de la surface isolante à 2 couches (2C).

La Figure III.12 présente l'histogramme de la tension d'expulsion en KV des cinq gouttes d'eau déposées sur une surface superhydrophobe à une et deux couches. Les résultats démontrent que l'élévation du nombre de couche de la surface isolante superhydrophobe créer une diminution de la tension d'expulsion des gouttes. On observe que toutes les tensions d'expulsion des gouttes à deux couches sont inférieures à celles des gouttes à une seule couche.

Concernant le mouvement des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante superhydrophobe avec une variation de tension continue positive, les observations suivantes sont notées :

- La première goutte est expulsée en premier de la surface isolante avec une tension de 5,9 KV pour une seule couche et 5,2 KV pour deux couches.
- La cinquième goutte est expulsée avec une tension de 9,5 KV pour une seule couche et 9,4 KV pour deux couches.
- Ensuite, la deuxième goutte est éjectée avec une tension de 12,2 KV pour une seule couche et 12 KV pour deux couches.
- La quatrième goutte se déplace hors de la surface à une tension de 16,9 KV pour une seule couche et 16,8 KV pour deux couches.

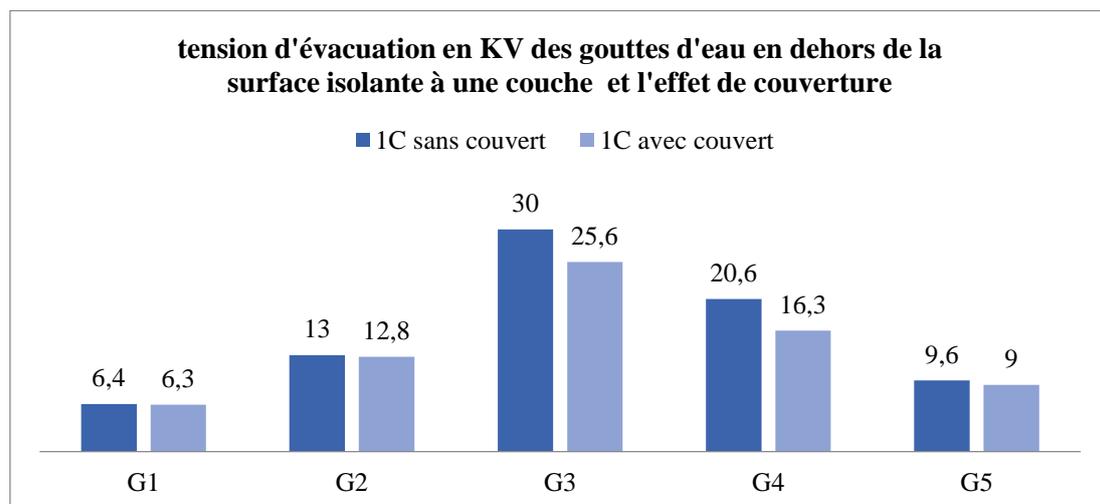
- Enfin, la troisième goutte, située au milieu de la surface, est la dernière à être expulsée avec une tension de 29 KV pour une seule couche et 28,1 KV pour deux couches.



**Figure III- 11: tension d'expulsion en KV des 5 gouttes d'eau déposé sur une surface superhydrophobe de 1 et 2couches.**

La Figure III.13 présente l'histogramme de la tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau hors de la surface isolante, à une couche et en tenant compte de l'effet de couverture. Les résultats révèlent une différence dans les tensions d'expulsion des gouttes à une couche en fonction de la présence ou de l'absence de couvert. On observe que les tensions d'expulsion des gouttes d'eau sont diminuées avec la présence du couvert. Pour la première goutte, la tension d'évacuation est réduite de 6,4 à 6,3 KV, et pour la goutte située au milieu de la surface, elle passe de 30 à 25,6 KV.

En ce qui concerne le mouvement des gouttes d'eau hors de la surface, les résultats sont similaires à ceux précédemment obtenue.



**Figure III- 12: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante à une couche et l'effet de couverture**

La Figure III.14 présente l'histogramme de la tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposées sur une surface isolante à une couche, avec une couverture de différentes épaisseurs. Les résultats montrent que le mouvement des gouttes hors de la surface isolante superhydrophobe est le même avec la variation de la tension d'expulsion. Cependant, on observe également que les tensions d'expulsion des gouttes avec une couverture d'épaisseur de 5 mm sont inférieures à celles avec une couverture d'épaisseur de 3 mm. Par exemple, pour la première goutte avec une couverture de 3 mm, sa tension d'expulsion est de 6,3 KV, tandis que pour une épaisseur de couverture de 5 mm, elle est de 5,3 KV. Ce même cas se reproduit pour les autres gouttes. Cela signifie que l'augmentation de l'épaisseur du couvert améliore les performances électriques de la surface isolante superhydrophobe.

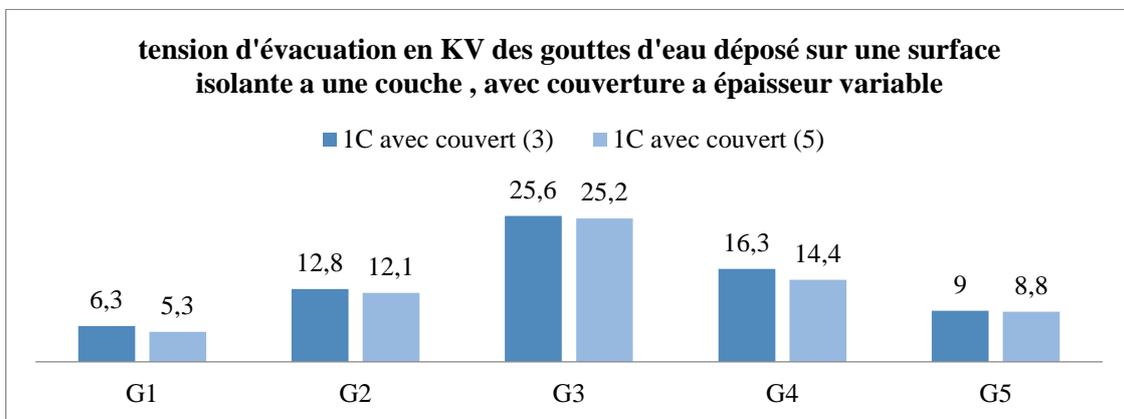


Figure III- 13: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposé sur une surface isolante a une couche, avec couverture à épaisseur variable (3 et 5 mm)

La Figure III.15 présente l'évolution de la tension d'expulsion des gouttes d'eau en fonction de l'épaisseur du couvercle pour une surface isolante à une seule couche, en utilisant un volume fixe de 50 µl. Les résultats indiquent que la tension d'expulsion diminue à mesure que l'épaisseur du couvercle augmente. Cela s'explique par l'effet de couverture, où la présence d'un couvercle quel que soit son épaisseur entraîne une diminution de la tension d'expulsion.

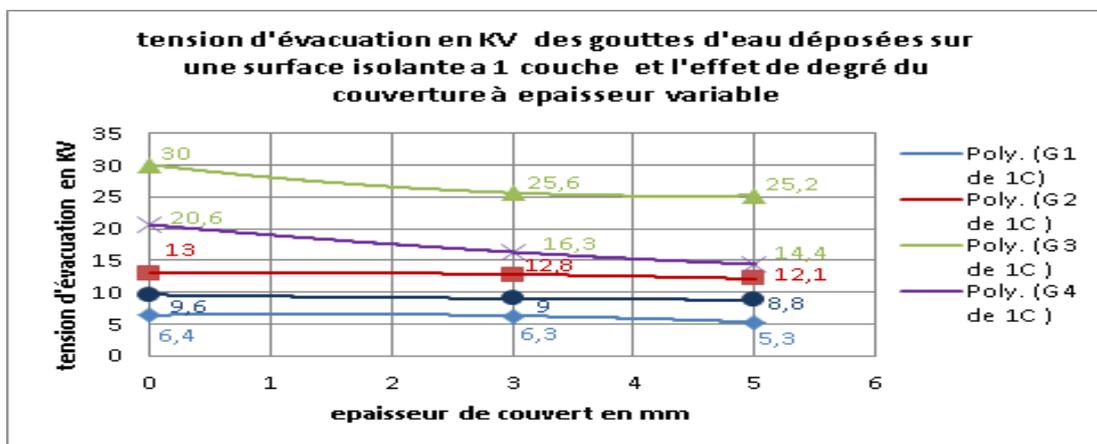


Figure III- 14: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposées sur une surface isolante à 1 couche et l'effet de couverture à épaisseur variable

La figure III.16 illustre l’histogramme de la tension d’évacuation en KV des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante à 2 couches et l'effet de couverture. Il en découle que les tensions d’expulsion des gouttes d’eau en dehors de la surface isolante à deux couches avec couvert sont diminuée par rapport à celle de deux couches sans couvert. Ce qui exprime que la présence de la couche supplémentaire avec l’effet de couverture améliore d’avantage la performance électrique de la surface isolante.

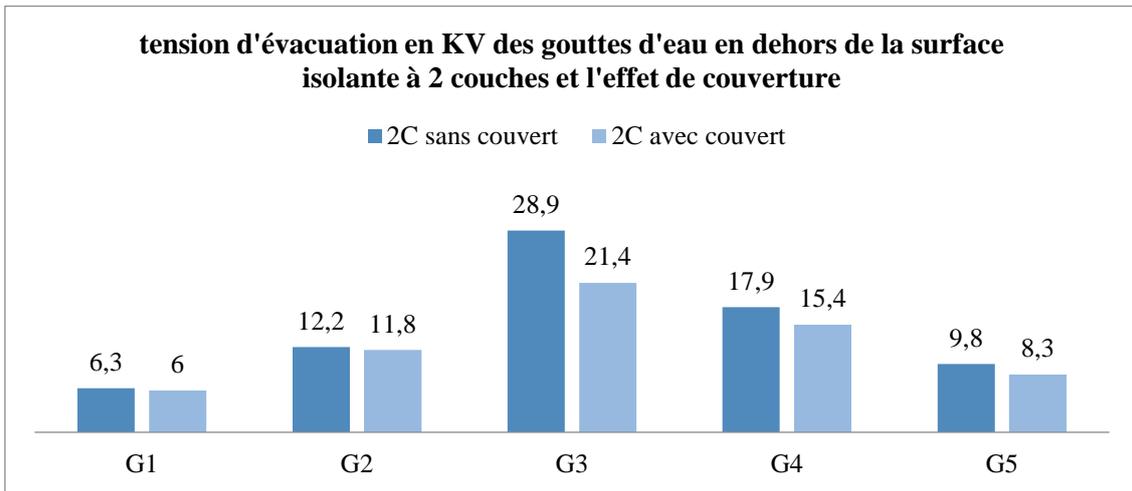


Figure III- 15: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau en dehors de la surface isolante à 2 couches et l'effet de couverture

La figure III.17 illustre l’histogramme de la tension d’évacuation en KV des gouttes d'eau déposé sur une surface isolante à deux couches, avec couverture a épaisseur variable. Il en découle presque les mêmes résultats que celle d’une couche mais avec des tensions d’expulsion des gouttes est légèrement inférieures.

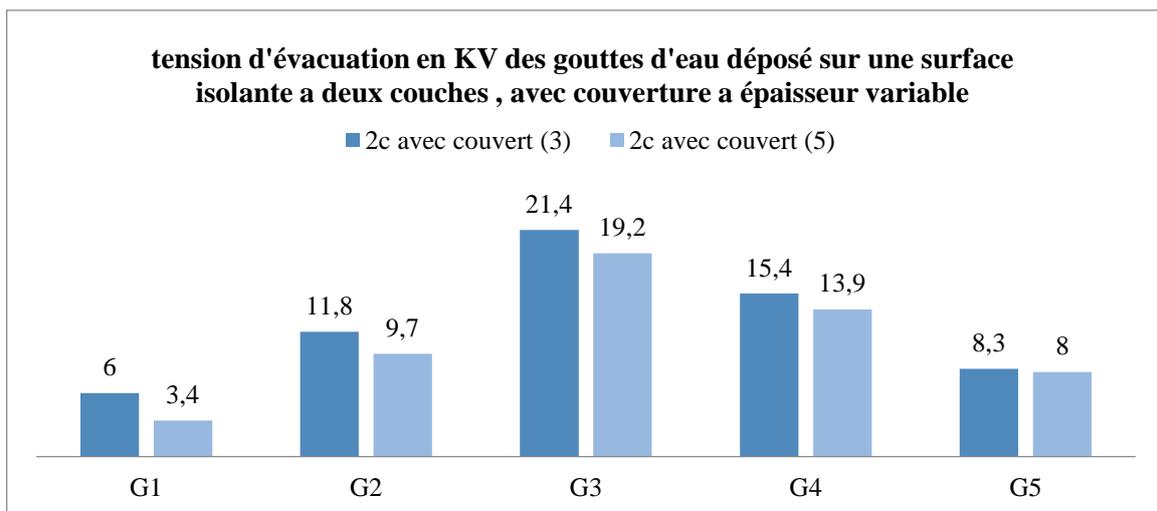


Figure III- 16: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposé sur une surface isolante a deux couches, avec couverture a épaisseur variable

La Figure III.18 représente l'évolution de la tension d'évacuation des gouttes d'eau en fonction de l'épaisseur du couvercle pour une surface isolante à deux couches, les résultats nous montrent que l'utilisation d'une surface isolante à deux couches, en combinaison avec un couvercle plus épais, permet d'obtenir une tension d'évacuation encore plus faible par rapport à une surface à une seule couche.

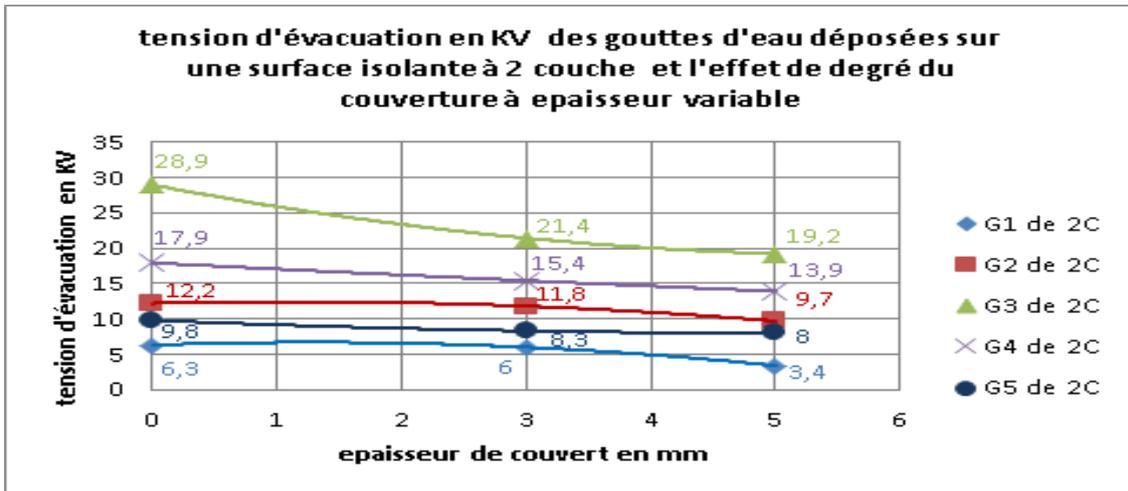


Figure III- 17: tension d'évacuation en KV des gouttes d'eau déposées sur une surface isolante à 2 couches et l'effet de couvercle à épaisseur variable

La figure III.19 illustre l'historgramme de la tension d'évacuation en KV des 5 gouttes d'eau déposé sur une surface superhydrophobe a 1 et 2 couches avec couvret (e=3mm). On remarque que la tension d'évacuation des 5 gouttes d'eau sur une surface superhydrophobe à deux couches avec couvret d'épaisseur 3 mm a diminuée par rapport à celle d'une couche, ce qui signifie que la présence de la couche supplémentaire avec l'effet de couvret rend les tensions d'expulsion des gouttes sur la surface meilleure.

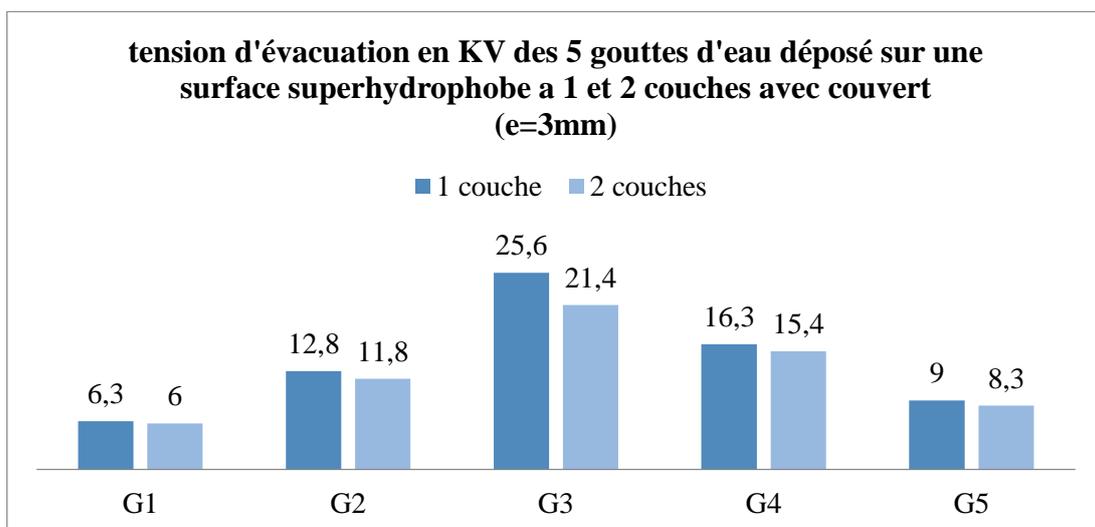


Figure III- 18: tension d'évacuation en KV des 5 gouttes d'eau déposé sur une surface superhydrophobe a 1 et 2 couches avec couvret (e=3mm)

La figure III.20 présente le même histogramme mais cette fois ci pour un couvert ( $e=5\text{mm}$ ) où on a observé une légère diminution de la tension d'évacuation pour les deux couches alors on conclut que l'épaisseur de couvert influe sur la tension d'expulsion des gouttes en dehors de la surface isolante.

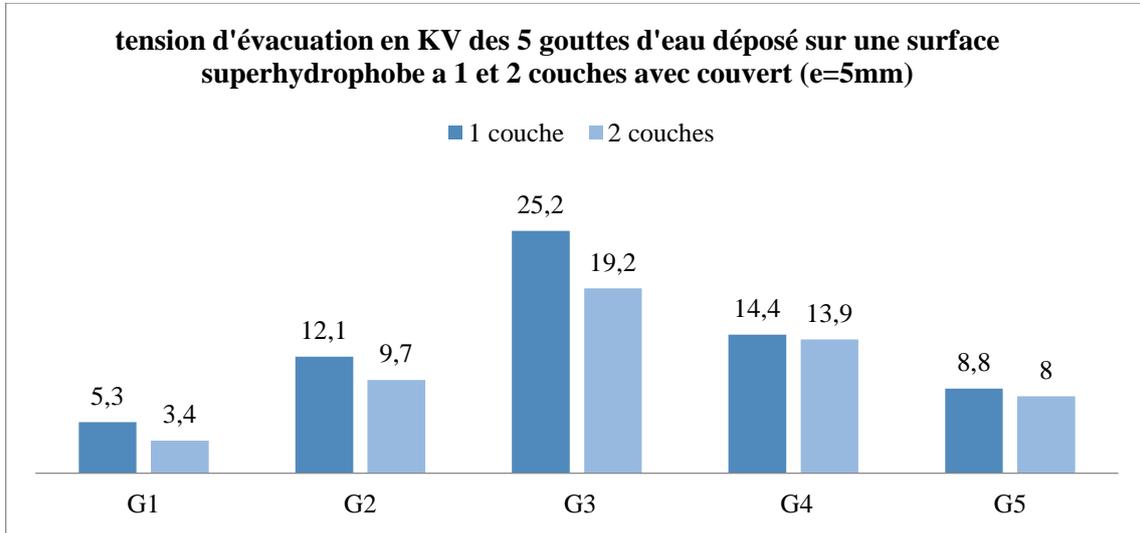


Figure III- 19: tension d'évacuation en KV des 5 gouttes d'eau déposé sur une surface superhydrophobe a 1 et 2 couches avec couvert (e=5mm).

La figure III.21 présente la tension d'expulsion de la première et la dernière goutte d'eau en dehors de la surface isolante superhydrophobe à une et deux couches sans et avec couvert à épaisseur variable, il est à signaler que la diminution de la tension d'expulsion des gouttes d'eau résultant avec celle de l'épaisseur couvert diélectrique quelque soit le nombre de couche de la surface superhydrophobe. En effet la diminution de la tension d'expulsion est due au renforcement des lignes du champ entre le couvert et les sommets des gouttes d'eau

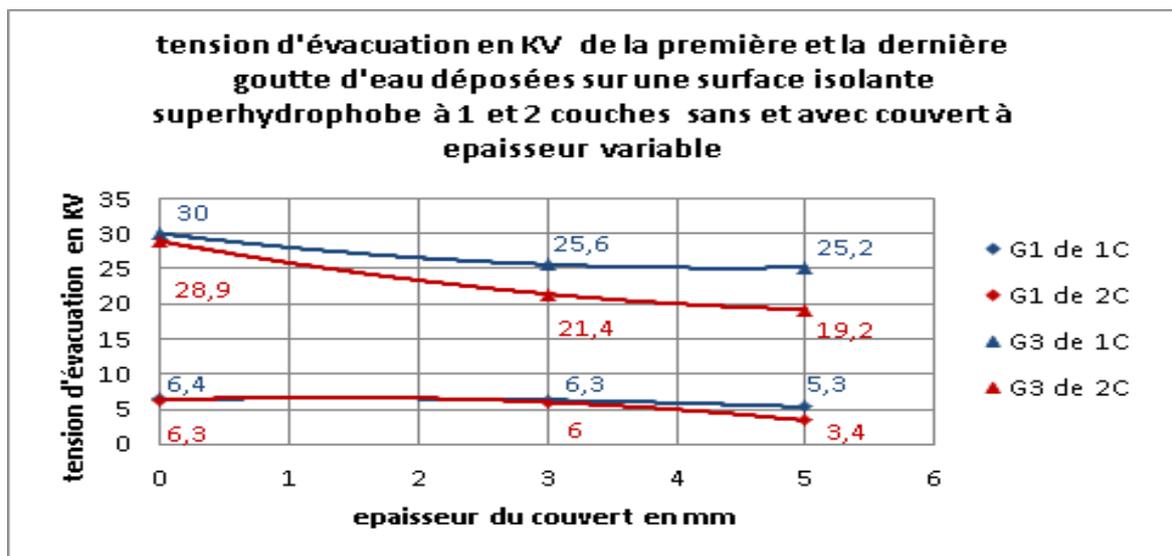


Figure III- 20: tension d'évacuation en KV de la première et dernière goutte d'eau déposée sur une surface isolante superhydrophobe à 1 et 2 couches sans et avec couvert à épaisseur variable

### III.5 mesure de l'angle de contact

La mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe est réalisée à l'aide d'un goniomètre dans le laboratoire des procédés membranaires des techniques de séparation et de récupération de l'université de Bejaia. Ce dernier est équipé généralement d'une source optique grossissante avec un module de seringue à commande électronique. Ceci permet d'ajuster en continue le volume de la goutte dans une plage qui peut atteindre 30  $\mu\text{l}$  avec un débit de distribution de 0.16 ml/min. L'enregistrement des images de la goutte déposée s'effectue à l'aide d'une caméra intégrée. Ces images sont évaluées à l'aide du logiciel (KRÜSS ADVANCE) qui détermine l'angle de contact de la goutte sur une image en direct.

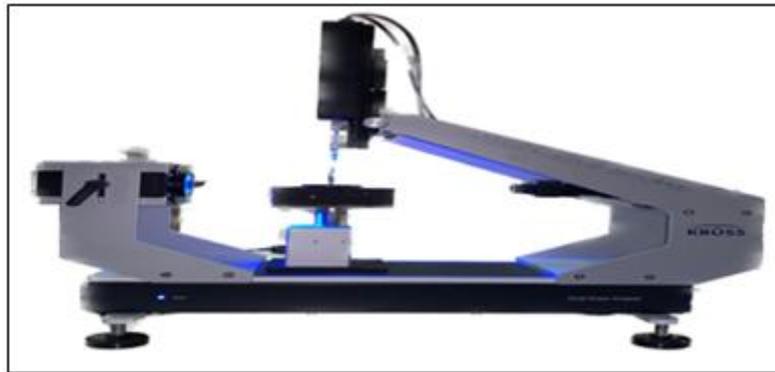


Figure III- 21: système de mesure d'angle de contact.

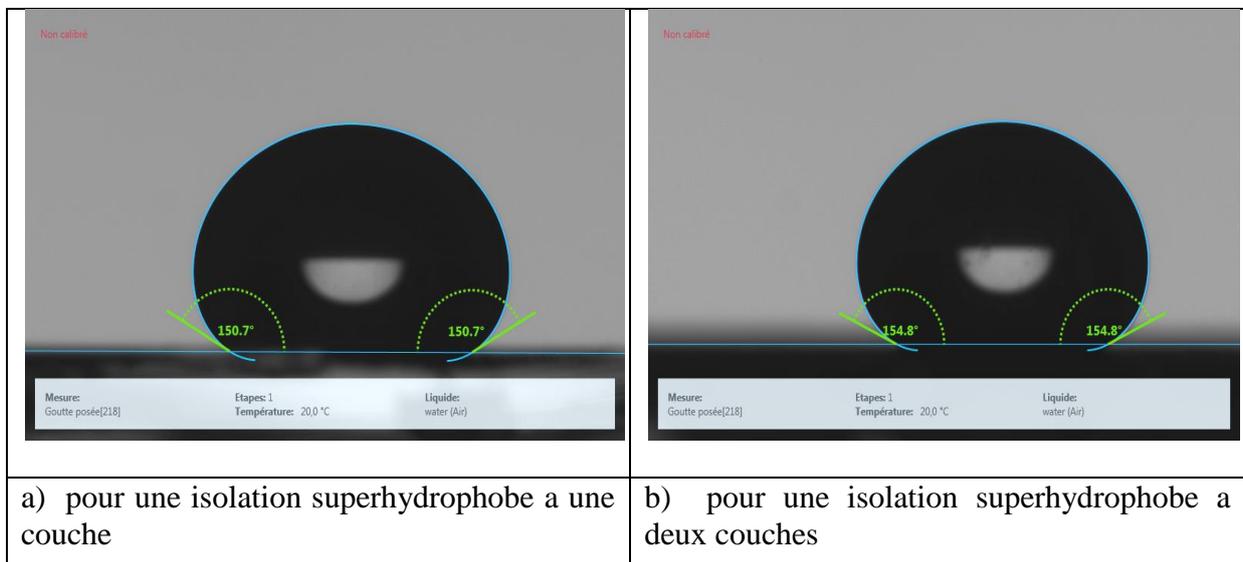


Figure III- 22: angle de contact des deux plaques superhydrophobe

Le dispositif de mesure de l'angle de contact a révélé que les plaques d'une seule couche de silicone ont un angle de contact de  $150,7^\circ$ , tandis que celles de deuxième couche ont un angle de contact de  $154,8^\circ$  ce qui justifie l'amélioration des performances électriques des surfaces superhydrophobes entre une et deux couches.

## Conclusion

Ce travail nous a permis d'élaborer des surfaces superhydrophobes à base de silicone avec un angle de contact égal à  $150.7^\circ$  pour celle d'une couche et de  $154.8^\circ$  pour celle de deux couches.

Après avoir testé divers échantillons de matériau superhydrophobe et pris en compte plusieurs variables, les résultats obtenus sur la performance électrique de l'isolation peuvent être résumés de la manière suivante :

- Pour une goutte de rang quelconque (première, médiane, dernière), sa tension d'éjection augmente en fonction de sa position allant du voisinage très proche des électrodes vers le milieu de la surface de l'isolation. Sa valeur est maximale lorsque celle-ci se trouve dans la zone médiane de l'isolation superhydrophobe ;
- Indépendamment de la position de la goutte d'eau, on constate que la tension d'éjection diminue avec l'augmentation de leur volume.
- La présence du couvert réduit la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface de l'isolation.
- L'élévation de l'épaisseur du couvert engendre une diminution de la tension d'expulsion des gouttes en dehors de la surface isolante superhydrophobe.
- La croissance du nombre de couches de l'isolation superhydrophobe crée une diminution de la tension.

Ces résultats soutiennent fortement une potentielle intégration de cette isolation dans le domaine de l'énergie électrique.

Conclusion générale

## Conclusion générale

Les surfaces superhydrophobes sont une solution prometteuse pour prévenir la pollution des isolateurs électriques à haute tension. Cependant, dans des conditions plus sévères et lors d'une exposition prolongée à l'extérieur, leur fiabilité peut être réduite, ce qui peut entraîner des perturbations dans les réseaux électriques haute tension.

L'objectif de ce travail consiste à l'amélioration des performances électriques d'une isolation superhydrophobe par l'ajoute d'une couche supplémentaire, tout en prenant compte de l'effet de quelques paramètres tel que le volume des gouttes d'eau déposées sur la surface isolante et la présence d'une couverture à épaisseur variable.

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

- L'augmentation du volume des gouttes d'eau décroît la tension d'expulsion des gouttes en dehors de la surface.
- La tension d'expulsion d'une goutte d'eau est plus faible lorsqu'elle est près de l'électrode haute tension par rapport à celle mise à la terre.
- La présence d'une couche supplémentaire de silicone améliore également les performances électriques de la surface isolante superhydrophobe.
- L'augmentation de l'épaisseur de la couverture réduit les tensions d'évacuation des gouttes d'eau hors de la surface superhydrophobe.
- L'augmentation de la valeur de l'angle de contact statique d'une surface isolante superhydrophobe à deux couches par rapport à celle d'une couche.

La méthodologie suivie et les résultats obtenus dans cette étude ouvrent de nombreuses perspectives pour les travaux de recherche futurs liés à ce domaine. Ils contribueront à approfondir les connaissances sur l'élaboration des surfaces superhydrophobes, leur application aux isolateurs de haute tension, ainsi que l'étude du comportement électrohydrodynamique des gouttes d'eau sur ces surfaces sous tension.

## Bibliographies

- [1] S.vitet, « la pollution des isolateurs » .EDF-Epure, N°27, Paris,France,(juillet 1990).
- [2] F. Amir et KH. Namaoui: « étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative » PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [3] M.Benakouche, R.Timghellette, « Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle », PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2005.
- [4]  
<https://sicamefrance.com/produitfrance/Aérien%20BT/Réseau%20aérien%20nu/10186/1018>  
Consulté le 06/03/2023.
- [5] A.Boubakeur, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, « Simulation Expérimentale sous Tension Alternative 50 Hz du Comportement d'un Isolateur de Haute Tension Naturellement Pollué », Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 271-278, 19-21, Tripoli, Libye, Mars 2001.
- [6] Y.Porcheron, « lignes aériennes : Matériel entrant dans la constitution d'une ligne aérienne ».
- [7] M.Rahali Hilal ; « comportement d'un modèle d'isolateur sous différentes configurations de pollution sous tension alternative 50Hz » mémoire de magister, ENP, Alger, 2011.
- [8] A.tilmatine « Isolateur des lignes aérienne haute tension », cours de haute tension (chapitre 6).
- [9] Brigitte FALLOU, « technique de l'ingénieur D214 ».
- [10] Lei Jiang et al., « Superhydrophobicity: from natural to biomimetic surfaces » Progress in Materials Science, 2010.
- [11] K. L. Mittal ET B. Adanur, «Wettability and surface energy of solids » CRC Press, 2009.
- [12] ADNANI Zineb, BENAMARA Katia, « Performance électrique d'une isolation superhydrophobe avec gouttes d'eau sous tension continue positive » université de Bejaïa (PFE 2018/2019).
- [13] Neinhuis, C. Barthlott, W., Ann. Botan. « Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces », (1997), 79, 667-677.
- [14] Abishek B. Kamaraj, Vincent Shaw, and Murali M. Sundaram «Novel Fabrication of Un-Coated Super-Hydrophobic Aluminum via Pulsed Electrochemical Surface Modification » (2015) volume 1.
- [15] FATIMA ZAHRA MADIDI. « Élaboration de revêtements nanocomposites avec des propriétés superhydrophobes, semi-conductrices et photocatalytiques », (Novembre 2016).

- [16] BinbinZhang, Weichen Xu. « Superhydrophobic, superamphiphobic and SLIPS materials as anti-corrosion and anti-biofouling barriers, » (September 2021) *New Journal of Chemistry* 45:15170-15179.
- [17] Emmanuelle Guerret Elina Moncada-Potignon Professeur encadrant : M. Merilhou Lycée Clément Marot CAHORS, « Super-hydrophobie », Olympiades de physique 2014-2015, pp .15-16.
- [18] Jolie McLane Nokes «Roll-to-Roll, Shrink-Induced Superhydrophobic Surfaces for Antibacterial Applications, Enhanced Point-of-Care Detection, and Blood Anticoagulation » 2015.
- [19] Lau, K.K.S.; Bico, J.; Teo, K.B.K.; Chhowalla, M.; Amaratunga, G.A.J.; Milne, W.I.; McKinley, G.H.; Gleason, K.K., *Nano Lett* «Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests» (2003), 3, 1701-1705.
- [20] Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Mater. Lett.* «A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces », (2010), 64, 2722-2724.
- [21] Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H.; Lee, Y.K «Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces», *TRANSDUCERS 2009 - 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (2009), 441-444.
- [22] Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R.; Kim, W.D «Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface », *Chinese Science Bulletin* (2009), 54, 3613-3616.
- [23] Sarkar, D.K.; Saleema, N. « One-step fabrication process of superhydrophobic green coatings », *Surf.Coat. Technol.* (2010), 204, 2483-2486.
- [24] Xiaolong Yang, Xin Liu « Directional transport of water droplets on superhydrophobic aluminium alloy surface » 2015.
- [25] <http://mag.monchval.com/>. Consulté le 22 avril 2023.
- [26] <https://www.artmajeur.com/>. Consulté le 25 avril 2023.
- [27] <https://tpehydrophobe.wordpress.com/2013/11/25/premiere-article/> consulté le 26 avril 2023.
- [28] <https://tribologie.free.fr/>. Consulté le 26 avril 2023.
- [29] <https://claiirefischer.wixsite.com/>. Consulté le 28 avril 2023.
- [30] <https://hydrophobie.wordpress.com/1-dans-la-nature/> consulté le 02 mai 2023.
- [31] SMATI Bahia et SOUDANI Sarah « Impact du dépôt de gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative » Mémoire de fin d'étude université de Bejaïa 2017 .

[32] Melle ALOUACHE Sara, KADRI Radia et BOUYAHMED Ryma « distribution du champ et potentiel électrique sur une isolation superhydrophobe avec gouttes d'eau sous tension continue » mémoire de fin d'étude université de Bejaïa 2020.

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

[34] Rebouh samia, « Impact de la pollution de l'air provoquée par la cimenterie tahar djouad sur la santé public et le cadre bati » Thèse de magister, option : ville et risque urbain, université mentouri de Constantine.

[35] H. Aitsaid, L. Slimanou, « Effet de l'épaisseur d'un écran pollué sur la rigidité diélectrique d'un système d'électrode à champ non uniforme » PFE Master, option réseau électrique, U. A. M. Bejaïa, 2009.

[36] S. Hai, R. Messouaf, « Effet de l'inclinaison sur le contournement d'une surface en silione hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue. », PFE master, U.A.M.Bejaia, juin 2014.

[37] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, «1S, D4, partie I».

[38] A. HAMZA SLAMET, « Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur pollué », Mémoire de Magister de l'USTO, 2013.

[39] TERRAB Hocine « Contribution à l'étude et l'analyse de la pollution et ses effets sur les isolateurs haute tension utilisés dans le réseau électrique national.» thèse doctorat UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1.

[40] MEKHALDI abdelouahab « étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes pollués sous tension alternative 50hz » thèse de doctorat d'états (1999).

[41] ZOUBIR Latifa YUCEF Samia « Distribution du champ et du potentiel électriques d'un isolateur de ligne 400kv » Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master (2015).

[42] F. Amidi, k. Ouerdane, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.

[43] W. Heise, G.F, luxa, G.Revrery , M. P. Verma, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE , rapport 33-09 1972.

[44] Mlle SATTA Samia « contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation » mémoire de magister université ferhat abbas setif.

[45] <https://www.sediver.com/fr/actualites/sedicoat-a-story-of-hydrophobicity/> consulté le 16/05/2023.

[46] Yufeng Li; HaiyunJin; ShichaoNie ... ET. Al « Effect of superhydrophobicity on flashover characteristics of silicone rubber under wet conditions »; <https://doi.org/10.1063/1.5012097>.

[47] T.Guia, « Comportement d'un modèle isolateur sous à une tension impulsionnelle », Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, Mai 2004.

[48] 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.

[49] T. Belhoul, « Performance d'un intervalle d'air à champ électrique non uniforme avec barrière isolante à géométrie variable sous atmosphère quelconque », thèse de doctorat université A. Mira Bejaia, 2018.

[50] 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.

[51] R. Boudissa, F. Bouchelga, T, Beloul, S. Kornhuber and K.D. Haim, « DC electrical performance of insulation silicone angled and covered with water drops rows arranged in zigzag », Conference Silicone Insulation (CSI), Wacker Academy, Germany.

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

[53] IEC 62271-304, « Technical Specification of design classes of indoor enclosed switching and control gear from 1 KV and up to and including 52 KV to be used in severe climatic condition », High Voltage Switchgear and controlgear-PART 304.

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

[55] K. Hamour, F.Bouchelga, R.Boudissa , S.Kornhuber , K.D. Haim « Optimisation of the superhydrophobic insulation longevity by expulsion of any wet deposit with a weak alternating electrical field », journal of electrostatics 105(2020) 103451.

## Résumé

L'objectif de notre travail consiste en l'élaboration des surfaces superhydrophobes isolante et utilisation d'un dispositif semi-automatique de dépôt de goutte d'eau sur les isolations à fin d'étudier leurs comportements électriques sous tension continue positive. En vue de cela nous avons évalué l'influence des paramètres géométrique (le nombre de couches de l'isolation, volume et degré de couverture a épaisseur variable) des gouttes d'eau sur la tension d'évacuation en dehors de la surface isolante a été quantifier.

Un profil composé de deux électrodes parallèles a été choisie pour cette étude de telle sorte qu'aucune goutte expulsée par la surface superhydrophobe à l'extérieur de l'isolation ne puisse s'attacher à celle-ci, lorsque l'isolation est mise sou tension proche de la tension de contournement.

Les principaux résultats obtenus peuvent être résumées comme suit :

- La tension d'expulsion des gouttes diminue avec l'élévation de leur volume.
- La tension d'éjection des gouttes diminue à l'effet du couvert quel que soit son épaisseur.
- La surface superhydrophobe s'améliore à la présence de la couche supplémentaire de ce fait la valeur de l'angle de contact statique augmente.

**Mots clés :** superhydrophobe, isolation, tension d'expulsion, degré de couverture