

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique*



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** Automatique

**Spécialité :** *Automatique et Systèmes*

**Par :** BEN RAHAL Elalmi

**Thème**

**Etude du comportement des gouttelettes d'eau déposées sur une surface isolante superhydrophobe**

**Soutenu publiquement le.././2019**

**Devant le jury :**

<b>ARIF Mohamed</b>	MCB	Université	<b>Président</b>
<b>MEDOUKALI Hamza</b>	MCB	Université	<b>Examineur</b>
<b>BOUKHARI Hamed</b>	MCB	Université	<b>Examineur</b>
<b>BOUCHELGA Fatma</b>	MCB	Université	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2018/2019**



# *Remerciement*

En préambule à ce mémoire nous remercions **ALLAH** qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères a madame **F.BOUCHELGA** qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de cette mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer et sans qui cette mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Ces remerciements vont à nos parents qui nous ont encouragé et permis d'entreprendre notre formation. Sans eux, nous n'en serons pas là.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de cette mémoire.

**Benrahal**



# *Dédicaces*

A Dieu le tout puissant, à qui je dois tout, et surtout d'avoir honoré et éclairé mon chemin par le savoir.

A ma mère qui à su être toujours à mes côtés dans la joie et la peine, ma mère, que Dieu te garde pour nous.

A mon chère père, qui a été toujours mon appui moral, et qui n'a jamais arrêté de m'encourager et de m'aider dans ma vie et surtout dans mes études, que Dieu te garde pour nous.

« Mon père, ma mère merci pour tout »

A mes chers et adorables frères, spécialement Ziani

« Mon souhait est de les avoir réussis dans leurs vies »

A mes chères et adorable sœurs,

« Mon souhait est de les voir toujours heureuses et d'avoir une vie pleine de joie et de réussite »

A mes chers amis.

A toute la promotion master 2 automatique 2019, à qui je souhaite un bon parcours professionnel

A tout mes camarades de l'université que j'ai côtoyé tout au long de mon.....



## Liste des Tableaux

---

Tableau. I.1 : Classification d'hydrophobicités .....	10
Tableau. III. 1 : Estimation de la durée de vie d'un élastomère de silicone .....	35
Tableau IV.1 : Almanach des données météorologiques des trois jours d'essais.....	46
Tableau IV. 1 : Dimension de la grande goutte d'eau sur la surface des plaques isolantes....	54
Tableau IV. 2 : Dimension d'une moyenne goutte d'eau sur la surface des plaque isolantes ...	55
TableauIV.3 :Dimension de la petite goutte d'eau sur la surface des plaque isolantes .....	56
TableauIV.4 : Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de l'isolation Superhydrophobe.....	58
Tableau IV. 3 : Diamètre des gouttes en fonction de leur volume.....	60



## Liste des figures

---

Figure. I.1: Arrangements des gouttelettes par rapport aux électrodes .....	8
Figure. I. 2: Tension de contournement en fonction de la conductivité et arrangement des gouttes.....	8
Figure. I. 3: Activités des décharges sur un isolateur en silicone.....	9
Figure. I. 4 : Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6).....	10
Figure. II.1 : Représentation de l'angle de contact à l'équilibre.....	18
Figure. II.2 : Les différents états de la mouillabilité.....	19
Figure. II.3 : Comportement d'une goutte sur une surface .....	20
Figure. II.4: Angle de glissement.....	20
Figure. II.5 :Modèles de Wenzel et de Cassie .....	21
Figure. II.6 : Modèle de surfaces super hydrophobes.....	22
Figure. II.7 : Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact. L'angle de droite est l'angle d'avancée et celui de gauche est l'angle de reculée.....	23
Figure. II.8 : Goutte d'eau sur une surface hydrophile à super hydrophobe .....	23
Figure. II. 9 : Images montrant la surface super hydrophobe et autonettoyante de la feuille de lotus: (a) Une feuille de lotus, (b) Une feuille de lotus contaminée avec de l'argile, (c) Élimination de l'argile par l'eau, (d-f) Des images de MEB montrant la surface des feuilles de lotus avec différents grossissements .....	26
Figure. II. 10 : Insecte Gerris sur une surface d'eau .....	26
Figure. II. 11: Gouttes de pluie sur une feuille de lotus à caractère super hydrophobe.....	27
Figure. II. 12: hydrophobicité d'une surface en silicone .....	28
Figure. II. 13: Appareil de mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide.....	28
Fig. III. 1 : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension.....	36
Fig. III. 2 : Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement) .....	37
Fig. III. 3 : Circuit électrique équivalent série et parallèle .....	38
Figure IV. 1 : Modèle expérimentale.....	45
Figure IV. 2 : Principales phases de confection d'une surface en verre superhydrophobe .....	46
Figure IV. 3 : Contamination des plaques superhydrophobes durant dix heures .....	48
Figure IV.4 : Dessiccateur.....	49
Figure IV.5 : Micropipette .....	50
Figure IV.6 : Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur la 1ère plaque .....	50
Figure IV.7 : Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur la 2ère plaque .....	51

## Liste des figures

---

Figure IV.8 : Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur les plaques 3, 4, 5 et 6.....	52
Figure IV.9 : Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur les plaques 7, 8, 9 et 10 .	53
Figure IV.10 : Modèle réalisé sous Comsole.....	58
Figure IV. 11 : Maillage du modèle.....	59
Figure IV. 12 : Simulation d'une goutte d'eau de 2 $\mu\text{l}$ de volume .....	61
Figure IV. 13 : Simulation d'une goutte d'eau de 5 $\mu\text{l}$ de volume .....	61
Figure IV. 14 : Simulation d'une goutte d'eau de 40 $\mu\text{l}$ de volume .....	62
Figure IV. 15 : Simulation d'une goutte d'eau de 100 $\mu\text{l}$ de volume .....	62
Figure IV. 16 : UDC= $f(L_f)$ d'une surface superhydrophobe.....	63
Figure IV. 17 : Caractéristique du champ électrique d'une surface superhydrophobe avec une goutte d'eau.....	64
Figure IV. 18 : Distribution du potentiel électrique sur la surface superhydrophobe .....	65
Figure IV. 19 : Distribution du champ électrique sur la surface superhydrophobe.....	65
Figure IV. 20 : Allure du potentiel électrique en fonction de la longueur de fuite.....	66
Figure IV. 21 : Allure du champ électrique en fonction de la longueur de fuite.....	66



## Liste Des Abréviation

---

$U_c$  : Tension de contournement

EPDM : Ethylène Propylène Diène Monomère

$\mu A$  : Micro-Ampère

cm : Centimètre

HTV : Caoutchouc en silicone à haute température vulcanisé

CH : Classification d'hydrophobicités

SEM : Scanning electron microscope

MEB : Microscopie électronique à balayage

$\epsilon_r$  : Permittivité relative

PDMS : Poly-Di-Méthyl-Siloxane

HT : Haute tension

MT : Moyenne tension

UV : Ultra-violet

$\Theta$  : Température

$\gamma$ : Coefficient de tension superficielle (N/m),

$\gamma_{SL}$ : Tension de surface Solide-Liquide (N/m),

$\gamma_{SG}$ : Tension de surface Solide-Gaz (N/m),

$\gamma_{LG}$ : Tension de surface Liquide-Gaz (N/m),

$\theta$ : Angle de contact ( $^\circ$ ),

$\theta^*$  : Angle apparent

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

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

$\gamma_s$ : La fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose;

$\gamma_a$  : La proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée.

$\theta_a$  Angle d'avancée

$\theta_r$  Angle de reculée

$E_p$ : Champ électrique propre (V/m)

$E_e$ : Champ électrique extérieur (V/m)

$Q_{ac}$  : Charges électriques aux armatures (C)

$Q_p$  : Charges électriques aux armatures (C)

$E_i$  : Rigidité Diélectrique Longitudinale (RDL) (V/m)

$E_d$  : Rigidité Diélectrique Transversale(RDT) (V/m)

$I_c$ : Courant de contournement (A)

$I_d$ : Courant de perforation (A)





## Liste Des Abréviation

---

Rv: Résistance transversale ( $\Omega$ )

Rs: Résistance superficielle ( $\Omega$ )

Ri: Résistance d'isolement ( $\Omega$ )

# Table des Matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Liste des tableaux.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des abréviations.....	VI
Table des Matières.....	VIII
Résumé.....	XII
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante

I.1 Introduction.....	4
I.2 Synthèse des travaux sur la performance électrique d'une surface isolante hydrophile (verre) .....	4
I. 2.1 Mohammed El Amine SLAMA (2015).....	4
I. 2.2 Fatma bouchelga (2016).....	4
I.3 Synthèse des travaux sur la performance électrique d'une surface isolante hydrophobe (silicone)..5	
I.3.1 S. Gurbanski et R. Hartings, 1995.....	5
I.3.2 S. M. Gubanski et al, 1999.....	6
I.3.3 N. M. Ijumba, A. C. Britten et J. P. Swartz, 2002.....	6
I.3.4 Y. Zhu, S. Yamashita, 2003.....	7
I.3.5 K. Karakoulidis, M.G. Danikas, P. Rakitzis, 2005.....	8
I.3.6 S. Thong-Om, W. Payakcho, 2011.....	9
I.3.7 Jean Ndoumbe 2014.....	10
I.3.8 Yong Liu*, Member, et all 2018.....	11
I.4 Synthèse des travaux sur la performance électrique d'une surface isolante hydrophobe superhydrophobe .....	11
I.4.1 CASSIE (A.B.D), BAXTER (S), 1944.....	11
I.4.2 Shibuichi, S., Onda, T., Satoh, N. & Tsujii (1996).....	12
I.4.3 ONDA (T.) et al, Langmuir, 1996.....	13
I.4.4 RICHARD (D.) et al., 2002.....	13
I.4.5 LAFUMA (A), QUÉRÉ (D.), 2003.....	13
I.4.6 M.-F. Wang, N. Raghunathan, and B. Ziaie, Langmuir, 2007.....	14
I.4.7 S. Srinivasan, V. K. Praveen, R. Philip, and A. Ajayaghosh, AngewChem,2008.....	14
I.4.8 Isaac Ramallah et al 2015.....	15
I.4.9 Arshad, G. Momen, M. Farzanehand A. Nekahi 2017.....	15
I.5 Conclusion.....	15

## Chapitre II : Caractérisation des surfaces super hydrophobes

II.1. Introduction.....	18
II.2. Propriétés superhydrophobe.....	18



# Table des Matières

---

II.2.1. Définition de la mouillabilité.....	18
II.2.2. Non mouillabilité.....	19
II.2.3. Angle de contact .....	19
II.2.4. Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact .....	19
II.2.4.1. Effet Wenzel... ..	20
II.2.4.2. Effet de Cassie-Baxter.....	21
II.2.5. L'hystérésis de l'angle de contact.....	22
II.2.6. Surface super hydrophile.....	23
II.2.7. Surface hydrophile.....	23
II.2.8. Surface hydrophobe.....	23
II.2.9. Surface Super hydrophobe .....	24
II.3. Techniques de préparation de surfaces super hydrophobes.....	24
II.3.1. Dépôt par vapeur chimique .....	24
II.3.2. Dépôt électrochimique.....	24
II.3.3. Photolithographie .....	24
II.3.4. Techniques utilisant le plasma.....	25
II.4. Applications.....	25
II.5. Les surfaces super hydrophobes dans la nature.....	25
II.5.1. Goutte de pluie sur une surface superhydrophobe.....	26
II.6. Technique de caractérisation des surfaces.....	27
II.6.1. Energie de surface .....	27
II.6.2. Hydrophobicité .....	27
II.7. Méthodes et appareils de mesure de la pluie .....	28
II.7.1. Mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide.....	28
II.7.2. Mesure de la hauteur d'eau précipitée.....	29
II.8. Conclusion.....	29

## Chapitre III : Matériaux isolants et leur pollution

III.1. Introduction.....	31
III.2. Définitions.....	31
III.2.1. Isolants.....	31
III.2.2. Isolations.....	32
III.2.3. Diélectrique.....	32
III.3. Matériaux utilisés pour les isolants solides.....	32
III.3.1. Porcelaine.....	32
III.3.2. Verre .....	33
III.3.2.1. Verre trempés .....	33
III.3.2.2. Verres recuits .....	33



# Table des Matières

---

III.3.3. Bakélite .....	34
III.3.4. Silicone.....	34
III.3.4.1. Les propriétés de la silicone.....	35
III.4. Propriétés électriques .....	36
III.4.1. Permittivité .....	36
III.4.2. Rigidité diélectrique.....	36
III.4.3. Résistance d'isolement.....	37
III.4.3.1. Résistance transversale ou volumique (Rv) .....	37
III.4.3.2. Résistance superficielle (Rs) .....	37
III.4.3.3. Résistance d'isolement (Ri) .....	37
III.4.4. Facteur de pertes .....	37
III.5. Définitions .....	38
III.5.1. Contournement .....	38
III.5.2. Tension de Contournement .....	38
III.5.3. Tension de tenue .....	39
III.6. Formation et réparation de la couche de pollution.....	39
III.7. Sources de pollution.....	39
III.7.1. Pollution naturelle .....	39
III.7.1.1. Pollution désertique.....	40
III.7.1.2. Pollution marine .....	40
III.7.1.3 Autre type de pollution naturelle.....	40
III.7.2. Pollution industrielle .....	40
III.7.3. Pollution mixte .....	41
III.8. Techniques de lutte contre la pollution .....	41
III.8.1. Techniques de lutte contre la pollution .....	41
III.8.2. Allongement de la ligne de fuite .....	41
III.8.3. Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables) .....	41
III.8.4. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes) .....	42
III.8.5. Revêtements à base de silicones .....	42
III.8. Conclusion.....	42
<b>Chapitre IV : Etude expérimentale</b>	
IV.1. Introduction.....	45
IV. 2. Modèle expérimental et techniques de mesure.....	45
IV.2.1. Fabrication d'une surface superhydrophobe isolante.....	45
IV.2.2. Procédure d'essais.....	46
IV.3. Calcule l'angle de contact des gouttes d'eau.....	49
IV.3.1. Définition Image J.....	49



# Table des Matières

---

IV. 3. 2. Mesure de l'angle de contact des gouttes d'eau.....	50
IV. 3. 2. 1. Goutte d'eau avec un grand volume .....	53
IV. 3. 2. 2. Goutte d'eau avec un moyen volume.....	55
IV. 3. 2. 3. Goutte d'eau avec un petit volume .....	56
IV. 4. Simulation de la performance de la plaque superhydrophobe .....	57
IV. 4. 1. Comsol Multiphysics.....	57
IV. 4. 2. Procédure de simulation.....	57
IV.4. 3. Résultats et discussions.....	59
IV.4. 3. 1. Volume de gouttes d'eau .....	59
IV.4. 3. 2. Nombre de goutte.....	64
IV. 5. Conclusion.....	67
Conclusion générale .....	69
Les Référence.....	71

## المخلص

الغرض من هذه الدراسة هو بناء أسطح عازلة نافرة للمياه لدراسة سلوكها الكهربائي عند الجهد العالي. تتكون هذه الدراسة من تحسين صلابة العزل الكهربائي الطولية في حالة وجود حبيبات الرمل وقطرات الماء على سطحه ، وذلك من خلال تباين حجمها وعددها. بالإضافة إلى ذلك ، اسقاط الحقل والشدة الكهربائية الناتجة عن قطرات الماء الموجودة على سطح العازل النافر للمياه عند تعرض هاته الأخيرة لضغط تيار مستمر. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها وجود حجم محدود من قطرة الماء المودعة في العازل النافر للمياه ، مغطاة بطبقة من الحبوب الرملية التي تؤثر على خصائصه. تتحقق القوة العازلة الطولية المثلى للعازل في غياب قطرات الماء. أيضًا ، يؤثر عدد وحجم قطرات الماء سلبًا على توزيع الشدة والمجال الكهربائي على العازل مما يعني انخفاض صلابة العزل الطولي لها وبالتالي ضعف قوة العزل.

**الكلمات المفتاحية:** العوازل النافرة للمياه، زاوية التلامس، التيار المستمر ، التلوث، Comsol Multiphysics، قطرة الماء ، ImageJ.

## Résumé

Le but visé dans cette étude consiste en la confection des surfaces isolantes superhydrophobes afin d'examiner leur comportement électrique en haute tension. Cette étude consiste à optimiser sa rigidité diélectrique longitudinale en présence de grains de sable et des gouttes d'eau sur sa surface, par la variation de leur volume et leur nombre. De plus, la simulation du champ et du potentiel électrique créés par les gouttes d'eau sur la surface de l'isolation superhydrophobe lorsque le matériau est soumis au contrainte de tension continue. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'existence d'un volume limite de la goutte d'eau déposée sur l'isolation superhydrophobe, recouverte d'une couche de grains de sable à partir du quel celui-ci affect ses caractéristiques superhydrophobes. La rigidité diélectrique longitudinale optimale de l'isolation superhydrophobe est obtenue en absence de gouttes d'eau. Egalement, le nombre et le volume des gouttes d'eau affectent négativement la distribution du potentiel et du champ électrique sur l'isolation superhydrophobe ce qui implique la diminution de sa rigidité diélectrique longitudinale et par conséquent l'affaiblissement de son pouvoir d'isolement.

**Mots clés :** Isolation superhydrophobe, angle de contact, DC performance, pollution, Comsol Multiphysics, goutte d'eau, ImageJ.

## Abstract

The purpose of this study is to construct superhydrophobic insulating surfaces, to examine their electrical behavior at high voltage. This study consists in optimizing its longitudinal dielectric rigidity in the presence of grains of sand and water drops on its surface, by the variation of their volume and their number. In addition, the simulation of the electric field and potential created by the water drops on the surface of the superhydrophobic insulation when the material is subjected to DC stress. The results obtained showed the existence of a limit volume of the water drop deposited on superhydrophobic insulation, covered with a layer of sand grains from which it affects its superhydrophobic characteristics. The optimal longitudinal dielectric strength of the superhydrophobic insulation is achieved in the absence of water drops. Also, the number and the volume of the water drops negatively affect the distribution of the electric potential and field on the superhydrophobic insulation which implies the reduction of its longitudinal dielectric rigidity and consequently the weakening of its insulation power.

**Key words:** Superhydrophobic insulation, contact angle, Dc performance, pollution, Comsol Multiphysics, water drops, ImageJ.





**INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

---

La tenue diélectrique des isolateurs aériens est souvent influencée par divers facteurs environnementale. L'humidification de la couche de pollution accumulée sur les surfaces isolantes de nature différente, favorisent le développement des décharges électriques séries et parallèles, après l'assèchement de cette couche par le passage du courant électrique sur l'isolation. Ce qui implique le contournement de celle-ci, et par conséquent, des pannes au niveau des réseaux de transport d'énergie électrique.

Afin de limiter l'influence négative du dépôt polluant sur les surfaces isolantes, nombreuses études expérimentales et théoriques ont été réalisées sous tension alternative, continu avec les deux polarités et impulsionnelle (chocs de foudre et de manœuvre), pour empêcher la formation des couches électrolytes sur ces surfaces. Avec la progression de la recherche, ils ont trouvé que la seule nature chimique des surfaces est la nature hydrophobe. Celle-ci a pour avantage la meilleure performance dans des conditions humide, et leur hydrophobicité qui ne permet pas la formation d'un film d'eau en réduisant ainsi les fuites de courant et donc la perte de puissance. Également par rapport au verre et porcelaine, leur légèreté les rend plus facile pour le montage et la mise en service. Ce qui nous a poussés à penser à une autre solution plus efficace que cette dernière, et la possibilité d'améliorer l'hydrophobicité ainsi que la résistance de ces surfaces. Plusieurs hypothèses et modèles ont été développées afin de comprendre l'effet superhydrophobe sur différentes surfaces, rugueuse et non rugueuse, puisque ces deux états influent forcément l'angle de contact des gouttes d'eau déposées sur la surface.

En vue de mieux comprendre les mécanismes de la superhydrophobie, et le comportement d'une surface de telle nature sous les conditions climatiques de notre région. Nous avons fabriqué des surfaces superhydrophobes et nous avons proposé d'étudier l'effet du dépôt de grain de sable mouillé sur le comportement de ces surfaces. Egalement, nous allons réaliser un test sous et sans l'application du champ électrique sous le logiciel Comsole Multiphysics.

Notre manuscrit est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre sera pour nous l'occasion d'évoquer des investigations essentielles qui sont faites sur la performance d'une surface isolante hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau, effectuées par différents chercheurs qui seront passées en revue.

Dans le second chapitre, nous essayons de présenter les différentes caractéristiques d'une surface superhydrophobe et les divers techniques de fabrication de ce type de surfaces, de plus, les techniques de mesure de l'angle de contact des gouttes d'eau déposées sur celles-ci.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des propriétés diélectriques des matériaux



## INTRODUCTION GENERALE

---

isolants et les classes de pollutions et leurs effets sur la performance électriques de celles-ci.

Le peu des travaux théoriques et expérimentaux qui ont été menées au cours des dernières décennies sur la performance d'une surface isolante superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau ne permettent pas une meilleure compréhension du mouvement des gouttes comment peuvent-elles influencer sur la tension de contournement intervenant sur la surface d'un isolant en silicone. C'est cela qui nous a amené à dédier le quatrième chapitre qui sera consacré à l'étude expérimentale. Nous étudierons le comportement de notre surface isolante superhydrophobe sous conditions climatique saharienne sans et avec la présence du champ électrique. De plus, nous exposons les résultats obtenus dans cette analyse.

Nous finirons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos divers résultats. Nous donnerons également les perspectives ouvertes par ce travail.

# **CHAPITRE I**

**Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante**

## **I.1 Introduction**

Dans ce premier chapitre nous allons présenter les différentes technologies des matériaux isolants dans le domaine électrique, à savoir, les isolants hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobes. Nous allons exposer les diverses recherches expérimentales effectuées par des chercheurs à l'échelle mondiale. Plusieurs paramètres ont été investigués afin de bien comprendre le comportement et la performance électrique de ces matériaux et pour faciliter le dimensionnement des isolateurs et améliorer leur rendement.

## **I.2 Synthèse des travaux sur la performance électrique d'une surface isolante hydrophile (verre) :**

### **I.2.1 Mohammed El Amine SLAMA [1]**

Son travail est consacré à l'étude de la propagation des décharges électriques sur une surface isolante et à la mise au point d'un modèle de contournement analytique dans l'air à la pression atmosphérique. D'après ces résultats expérimentaux, il a constaté que les conditions critiques de contournement sont supérieures à la moitié de la distance de ligne de fuite. De plus, il a développé une relation qui donne la tension de contournement ( $U_c$ ) en se basant sur le critère d'impédance et le circuit équivalent électrique. Cette relation suggère que la tension de contournement est en fonction des paramètres thermiques des décharges, de la capacité et de la résistance de l'isolant solide et des conditions de propagation de la décharge. Les tensions de contournement calculées à l'aide de cette relation se trouvent en bon accord avec ses relations expérimentales.

### **I. 2.2 Fatma Bouchelga [2]**

Le but de sa recherche est l'étude du développement des décharges électrique parallèles sur une surface isolante large uniformément et non uniformément polluée et leur conséquence sur la performance électrique de celle-ci, lorsqu'elle est mise sous tension continue polarité variable. Les résultats expérimentaux émanant de cette étude montrent qu'il existe une largeur limite d'une bande de pollution, à partir de laquelle deux arcs électriques consécutifs peuvent se développer indépendamment l'un de l'autre jusqu'au contournement de l'isolation avec une tension minimale.

## **CHAPITRE I: Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante**

---

La valeur de cette largeur limite est de l'ordre de 12 cm en polarité positive et de 20 cm en polarité négative. Il a été remarqué que cette largeur effective limite n'est pas du tout influencée par la variation de la conductivité volumique, mais elle engendre une diminution de la performance de l'isolation. Elle a constaté aussi qu'à tout système d'électrodes plan - plan délimitant une surface isolante polluée à largeur variable peut lui être associé plusieurs configurations pointes - pointes équivalentes ayant la même performance. De plus les résultats émanant de la quantification de l'effet de la non uniformité de répartition transversale de pollution sur le contournement d'une large surface isolante en verre montrent que la tension de contournement de la surface isolante, sous l'effet d'une distribution transversale non uniforme, est plus élevée que celle obtenue sous pollution uniforme, quelle que soit la polarité de la tension continue appliquée à l'isolation en verre. Egalement, l'existence d'une valeur limite à partir de laquelle la performance électrique demeure constante a été mise en évidence. Elle a remarqué aussi, qu' indépendamment du rapport des conductivités électriques des deux zones de l'isolation et la polarité de la tension appliquée, le court-circuit de l'isolation s'effectue dans la zone fortement polluée. Ainsi, l'élargissement de la zone fortement polluée engendre la réduction de la probabilité de contournement de la zone faiblement contaminée, ce qui entraîne le déclin de la tension de contournement de l'isolation.

### **I.3 Synthèse des travaux sur la performance électrique d'une surface isolante hydrophobe (silicone) :**

#### **I.3.1 S. Gurbanski et R. Hartings [3]**

La recherche suédoise sur l'utilisation d'isolants composites dans l'isolation extérieure se concentre sur les recherches dans des conditions naturelles et artificielles, de nouvelles méthodes de diagnostic, ainsi que les effets du vieillissement et des variations d'hydrophobie. Des phénomènes de contournement basiques sur des surfaces hydrophobes sont également étudiés par ces chercheurs.

Lorsque les isolateurs composites sont nouveaux, leur surface est hydrophobe. L'eau adhère donc difficilement à leur surface. Par conséquent, les impuretés qui se trouvent sur la surface d'isolant composite sont dissoutes moins facilement que celles qui s'accumulent à la surface en céramique. L'hydrophobicité des isolants composites améliore donc leur performance électrique sous pollution. D'après leur étude, les chercheurs ont constaté que l'isolation en silicone a un meilleur comportement à cette considération que l'isolant en

## **CHAPITRE I: Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante**

---

EPDM. En effet, tous les isolants en silicone qu'ils ont testé recouvrent rapidement leur hydrophobicité, ce qui ne fait pas le cas des isolants en EPDM. Cependant, l'hydrophobicité n'est pas permanente. En effet, elle peut être perdue temporairement ou de façon permanente.

### **I.3.2 S. M. Gubanski et al [4]**

Les travaux de Gubanski et al, ont été effectués sur des isolateurs composites de différents types de matériaux. Ils se sont basés dans leur étude sur le comportement du courant de fuite propagé sur une surface isolante de différente nature.

Ils ont conclu que le courant de fuite est souvent capacitif en caractère et sinusoïdal en forme ; une fois l'hydrophobie perdue, le courant de fuite devient de plus en plus résistif, avec des pics dus aux décharges dans les zones sèches.

Ils ont trouvés que :

- Pour les isolateurs qui gardent leur hydrophobicité, le courant de fuite est capacitif, sinusoïdal et de l'ordre du  $\mu\text{A}$  ;
- Pour les isolateurs dont la surface est complètement mouillée (hydrophile), le courant de fuite est sinusoïdal à caractère résistif d'ordre relativement élevé ;
- Pour les isolateurs ayant perdu totalement ou partiellement leur hydrophobicité, le courant de fuite a une forme non linéaire avec une amplitude dont l'ordre de grandeur est relativement élevé ;

Ils ont montré que le temps de repos a une influence sur le comportement du courant de fuite et donc sur l'état de surface de certains isolateurs.

Dans le cas des isolateurs composites, le temps de repos leur permet de réacquies leurs propriétés hydrophobes, par contre pour les isolateurs en céramique cette influence est moins importante.

### **I. 3.3 N. M. Ijumba et al [5]**

Les chercheurs ont pu modéliser et simuler un isolateur de ligne grâce à un logiciel Qnicfield-TM qui utilise la méthode des éléments finis pour le calcul du champ électrique. La tension a été choisie de manière à obtenir un champ électrique moyen de  $2 \text{ kV} / \text{cm}$ , ce qui

## **CHAPITRE I: Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante**

---

est similaire à celle d'un isolateur de ligne. Le travail des chercheurs consiste à déterminer le facteur de perte d'hydrophobicité de la silicone, la goutte d'eau a été modélisée entre deux électrodes planes, soumise à un champ électrique constant de polarité positive ou négative. La permittivité électrique de chaque matière doit être introduite dans le modèle pour tenir compte des effets de bord. Les permittivités relatives des matériaux utilisés étaient : l'eau pure (80) ; La silicone (3,45) ; les fibres de Verre (4).

N.M. Ijumba, A.C. Britten & J.P. Swart ont étudié l'effet de la couronne des gouttelettes d'eau et de la perte d'hydrophobicité des isolateurs en silicone sous un potentiel élevé (HVDC). L'eau a tendance à former des gouttelettes sur la surface hydrophobe. Un angle appelé angle de contact peut être mesuré quand une goutte d'un liquide entre en contact avec une surface du solide. Cet angle de contact est une mesure de la mouillabilité de la surface. Selon ces recherche rune surface est dite mouillable lorsque l'angle de contact que fait le liquide avec la surface est égal ou inférieure à  $30^\circ$ . Cependant, la surface est dite partiellement mouillable si l'angle de contact est compris entre  $30^\circ$  et  $89^\circ$ .

Les chercheurs ont pu conclure aussi que l'intensification du champ causée par la goutte conduit à une décharge couronne et c'est ce qui provoque la perte temporaire de l'hydrophobie sur la surface de l'isolateur en silicone. L'intensification du champ est due à la forme sphérique de la goutte, sa taille et sa forte permittivité relative.

### **I.3.4 Y. Zhu et S. Yamashita [6]**

Dans leur recherches, ils ont présentés des résultats des expériences faites pour examiner le comportement des gouttelettes d'eau sur la surface de polymère sous l'augmentation du champ électrique alternatif, et le phénomène de décharge couronne pendant ce processus. Des essais ont été faits sur des gouttelettes d'eau de différentes conductivités et volumes déposées sur la surface de caoutchouc en silicone avec une micropipette. Les facteurs qui affectent la décharge couronne des gouttelettes d'eau ont été analysés au moyen de calcul de champ électrique et quelques expériences. Ils ont démontrés que les gouttelettes d'eau sur le polymère s'apprêtent localement à augmenter le champ électrique et peuvent causer la décharge de couronne.

## I.3.5K. Karakoulidis et al [7]

K. Karakoulidis et al, ont étudié le comportement des gouttelettes d'eau sur une surface polymère (silicone) sous un champ électrique alternatif. Ils ont choisis des arrangements des gouttes de 1, 2, 3, 5 et 9 et les volumes de ces dernières ont été de 0,2 et 0,3 ml, afin de mieux simuler les conditions réelles. Les électrodes sont positionnées à une distance de 4 cm parallèles les unes des autres de sorte que le positionnement de gouttelettes entre eux serait facile comme le montre la figure I.1. Les paramètres fondamentaux influençant le comportement des gouttelettes d'eau sur la surface polymère, à savoir, la conductivité et le volume des gouttelettes d'eau, la rugosité de surface du polymère, leur positionnement par rapport aux électrodes ont été étudiés.

Ils ont conclu que l'arrangement et l'augmentation de la conductivité des gouttes avec un volume constant de 0.3 ml entraînent une diminution de la tension de contournement comme le montre la figure I.2, conformément à la figure I.1. Cette conclusion est généralement valable indépendamment du matériau utilisé. De plus, ils ont constaté que l'état de la surface influe de façon positive sur la tension de contournement lorsque le nombre de gouttelettes est important, et le positionnement joue un rôle plus important que le volume de la goutte.

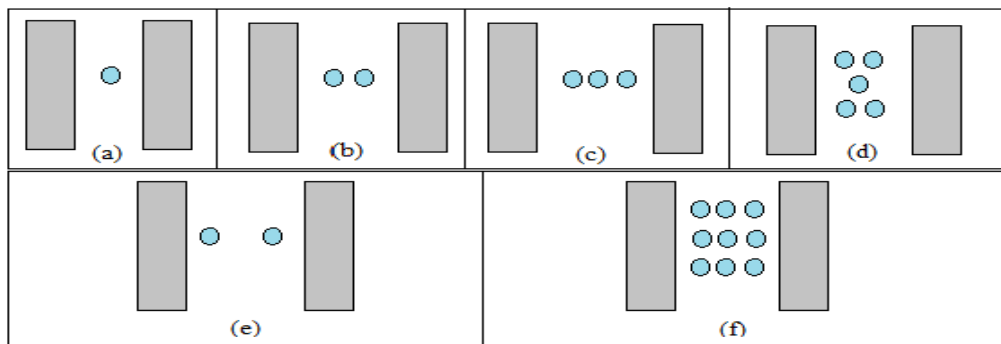


Figure. I. 1: Arrangements des gouttelettes par rapport aux électrodes

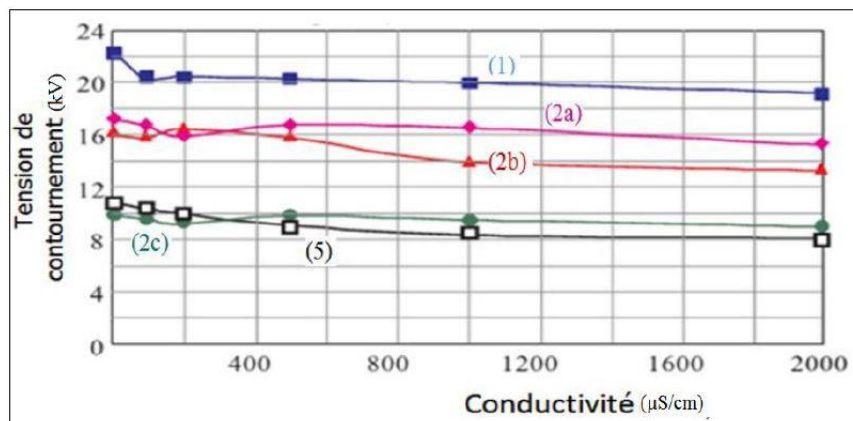


Figure.I.2: Tension de contournement en fonction de la conductivité et arrangement des gouttes

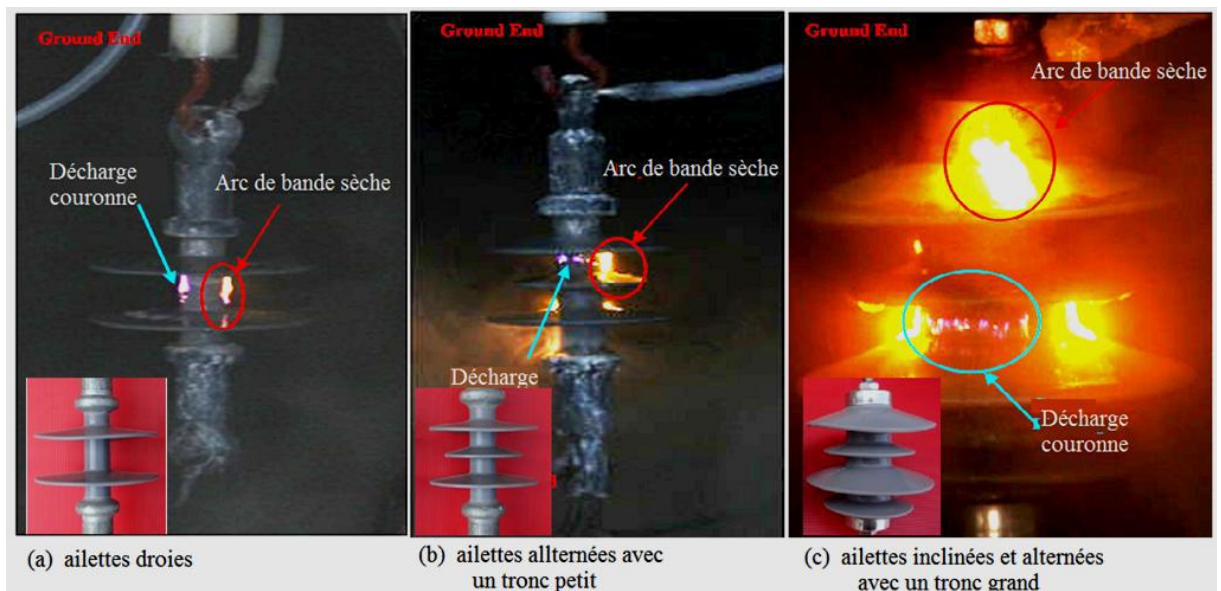
### I.3.6 S. Thong-Om et W. Payakcho [8]

Ces chercheurs ont réalisés des essais de vieillissement sous le brouillard salin sur les isolateurs polymères, basés sur la norme CEI 61109. Les échantillons fabriqués de caoutchoucs en silicones HTV avec le contenu d'ATH ayant trois configurations différentes (ailettes droites, ailettes alternées, et ailettes inclinées et alternées), ont été testé sans interruption pendant 1000 heures, dans une chambre de brouillard salin artificielle. Le degré de contamination, la réduction de l'hydrophobicité et mesure de la dureté, ont été employés comme techniques d'analyse des dommages physiques, pour évaluer le degré de détérioration de surface.

➤ La perte d'hydrophobicité améliore graduellement le mouillage extérieur et l'humidifient les formes des films d'eau ayant la conductivité élevée. Ceci induits des décharges couronnes et d'arcs de bande sèche sur la surface d'isolant polymère.

➤ La diminution d'hydrophobicité d'échantillons testé comparées avec un échantillon neuf indique le degré de détérioration de surface.

Ils ont observé l'arc de la bande sèche et les décharges couronnes sur la surface extérieure du tronc dans tout type d'échantillons (**Figure I.3**).



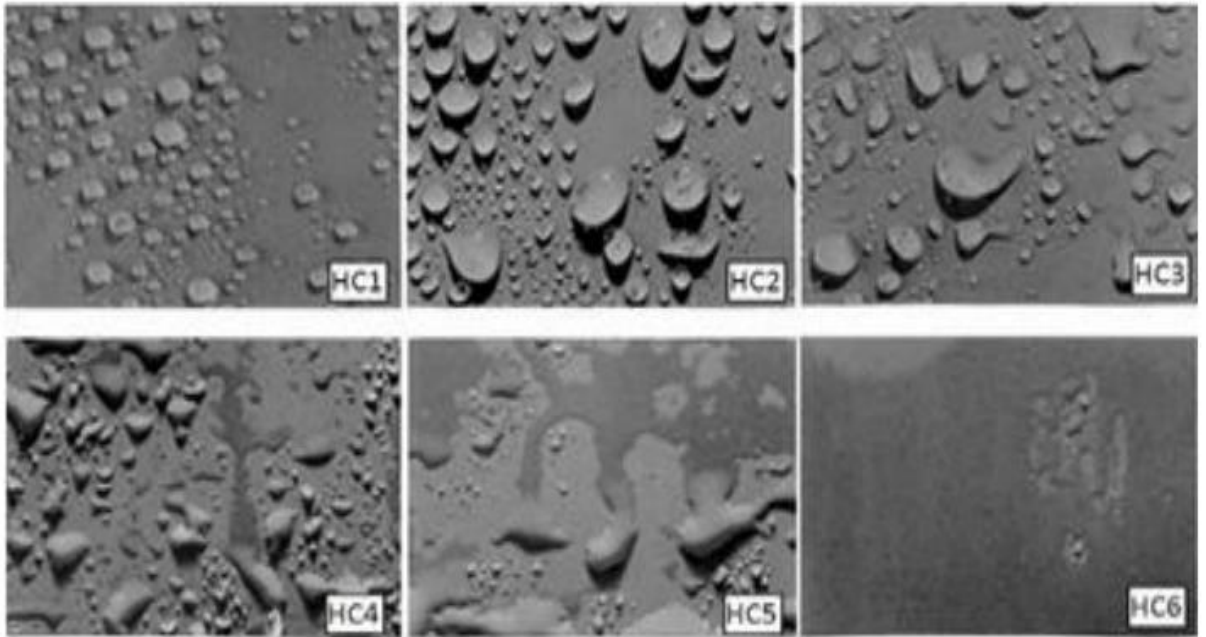
**Figure. I. 3:** Activités des décharges sur un isolateur en silicone

➤ Une plus grande réduction d'hydrophobicité a été mesurée sur la surface de tronc comparée avec la surface des ailettes de tous types d'échantillon.



# CHAPITRE I: Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante

L'évaluation du niveau d'hydrophobicité de la surface des échantillons testés a été basée sur la classification faite selon la figure I.4.



**Figure. I.4:** Classification d'hydrophobicité (HC1-HC6)

**Tableau. I.1.** Classification d'hydrophobicités

ailettes droites		ailettes alternées		ailettes à pente et alternées	
Position	HC	Position	HC	Position	HC
1	HC 5	1	HC 4	1	HC 2
2	HC 5	2	HC 5	2	HC 1
3	HC 2	3	HC 2	3	HC 3
4	HC 4	4	HC 4	4	HC 2
5	HC 5	5	HC 5	5	HC 1
6	HC 2	6	HC 3	6	HC 3
7	HC 5	7	HC 4	7	HC 2
		8	HC 4	8	HC 2
		9	HC 2	9	HC 3
		10	HC 4	10	HC 4
				11	HC 4

### I.3.7 Jean Ndoumbe [9]

Ce travail porte sur l'étude expérimentale et théorique du comportement des gouttelettes d'eau (instabilité, déformation, coalescence), déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension, en présence d'un champ électrique. La déformation des gouttelettes d'eau est étudiée en fonction de plusieurs paramètres tels que le volume, le nombre et la conductivité des gouttelettes ainsi que leurs positions par rapport aux électrodes. Un intérêt particulier est porté à la charge accumulée sur la surface d'une gouttelette. L'influence des gouttelettes sur la

répartition du champ électrique ainsi que le facteur d'amplification du champ électrique par une méthode numérique ont été étudiés. De plus une formulation mathématique de la déformation d'une gouttelette d'eau posée sur une surface d'isolateur est développée. Les mécanismes ainsi que les paramètres impliqués dans la coalescence d'une paire de gouttelettes d'eau sous l'effet du champ électrique sont également traités. Un modèle mathématique permettant d'analyser la coalescence d'une paire de gouttelettes d'eau posées sur la surface d'un isolateur en présence du champ électrique est proposé, par ces chercheurs, Le modèles est basé sur une approche à interface diffuse qui consiste essentiellement en un couplage entre les équations de Navier-Stokes, le calcul de la force électrique et une équation de type Cohn-Hilliard décrivant l'évolution de l'interface en prenant en compte les phénomènes de tensions superficielles.

### **I.3.8 Yong Liuet all [10]**

Vise à leur étude, la simulation numériques et une étude expérimentale sur le mécanisme dynamique de la formation de gouttelettes d'eau de différentes tensions appliquées et la distribution des gouttelettes et des décharges superficielles induites à la surface du silicium isolant composite en caoutchouc sous l'impact du champ électrique alternatif. La dynamique des fluides numérique(CFD) un modèle de déformation multiple de gouttelettes est présenté. Ils ont constaté que la force du champ électrique et la tension superficielle jouent des rôles significatifs dans le comportement dynamique des gouttelettes d'eau à la surface de l'isolateur. Les résultats obtenus révèlent que la fusion se produit d'abord entre des gouttelettes de taille inférieure, et la force du champ électrique qui est liée à la valeur du champ électrique tend à allonger la gouttelette d'eau et s'oppose à la tension superficielle qui ramène la goutte d'eau. Avec l'augmentation de la distribution fractale, l'intensité maximale du champ électrique montre une tendance croissante.

## **I.4 Synthèse des travaux sur la performance électrique d'une surface isolante superhydrophobe :**

### **I.4.1 Cassieet Baxter [11]**

Dans ce travail, une méthode est présentée pour la production d'une fibre de cellulose textile avec des propriétés non mouillantes convenant à des applications allant du traitement des plaies et de l'ingénierie tissulaire aux vêtements et autres applications textiles. La non-mouillabilité est obtenue en recouvrant une microfibre de cellulose textile avec des nanofibres

de cellulose électro filées, créant une surface large et rugueuse qui est ensuite traitée au plasma avec du plasma au fluor. La rugosité élevée de la surface et le dépôt efficace des groupes fluorés liés par covalence ont pour résultat que la fibre présente des propriétés non mouillantes avec des mesures d'angle de contact indiquant une superhydrophobie (angle de contact de l'eau > 150 °). C'est une méthode respectueuse de l'environnement et la flexibilité du procédé d'électro filage permet une conception soignée des propriétés des matériaux, du choix des matériaux à la chimie de surface en passant par la morphologie de la fibre et l'assemblage des fibres, ce qui permet de visualiser le potentiel de la méthode et des fibres développées dans un large éventail d'applications.

### **I.4.2 Shibuichi et all [12]**

Les chercheurs ont étudié des surfaces présentant un angle de contact de 174 °. Dans cette analyse les gouttelettes d'eau ont été réalisées en alkyl cétène dimère (AKD). Celles-ci roulent sans fixation sur les surfaces superhydrophobes lorsqu'elles sont légèrement inclinées. L'AKD est une sorte de cire et forme spontanément une structure fractale à ses surfaces par solidification à partir de la masse fondue. Les surfaces fractales de l'AKD repoussent complètement une gouttelette d'eau et montrent un angle de contact supérieur à 170 ° sans aucun traitement de fluoration. La prédiction théorique de la mouillabilité des surfaces fractales a été donnée dans la relation entre l'angle de contact de la surface plane  $\theta$  et celui de la surface fractale  $\theta_f$  est exprimé par l'équation :

$$\cos \theta_f = \left(\frac{L}{1}\right)^{D-2} \cos \theta \text{ où } \left(\frac{L}{1}\right)^{D-2} \quad (\text{I.1})$$

Est le facteur de grossissement de la surface. Il a été déterminé que la dimension fractale de la surface AKD solide était  $D \approx 2.3$  par l'application de la méthode de comptage de boîtes aux images SEM de la section transversale d'AKD. L et l, qui sont les limites de taille la plus grande et la plus petite du comportement fractal de la surface, sont également estimés à l'aide de la méthode de comptage de boîtes. Les angles de contact de quelques mélanges eau / 1,4-dioxine sur les surfaces fractales et AKD ont été déterminés et les valeurs de  $\cos\theta_f$  ont été tracées par rapport à  $\cos \theta$ . Le graphique  $\cos \theta_f$  contre  $\cos \theta$  va bien dans le sens de la prédiction théorique. Ce travail a montré que le concept fractal est un outil puissant pour développer de nouveaux matériaux fonctionnels.

### **I.4.3 Onda et all [13]**

La mouillabilité des surfaces fractales a été étudiée théoriquement et expérimentalement, par ces chercheurs, l'angle de contact d'une gouttelette liquide placée sur une surface fractale s'exprime en fonction de la dimension fractale, de la plage de comportement fractal et du rapport de contact de la surface ont été testé. Les résultats ont montré que les surfaces fractales peuvent être superhydrophobes lorsque les surfaces sont composées de matériaux hydrophobes. Ils ont démontrés également une surface fractale superhydrophobe faite de dimère d'alkyl cétène; une gouttelette d'eau présente sur cette surface un angle de contact atteignant 174 °.

### **I.4.4 Richardet all [14]**

Les chercheurs ont montré que lorsqu'une goutte de liquide atterrit sur une surface solide sans la mouiller, elle rebondit avec une élasticité remarquable. Dans leur études ils ont mesuré la durée du contacte de la goutte avec le solide. Pendant le choc, leurs résultats pourraient aider à quantifier l'efficacité des surfaces hydrofuges (solides super-hydrophobes) et à améliorer le refroidissement à l'eau des solides chauds, qui est limité par le rebondissement des gouttes ainsi que par les effets de la température.

### **I.4.5 La fuma et all [15]**

Dans ce travail, la pâte de bois (kraft) a d'abord été séchée en un matériau de type mousse de faible densité par échange de solvant avec de l'éthanol anhydre. La tomographie aux rayons X a montré que, bien que les fibres de la pulpe soient plates et ressemblent à des rubans après séchage à l'eau, celles séchées à l'éthanol sont quasi tubulaires, ce qui en déduit que les forces capillaires dérivées d'un solvant à faible tension superficielle ne sont pas assez fortes pour favoriser l'effondrement de la lumière des fibres contrairement à ce qui se passe dans l'eau. Lorsque la pâte résultante de type mousse a ensuite été soumise à une réaction en phase vapeur avec du trichlorométhylsilane (TCMS), un revêtement polymère à base de silicium a été créé à la surface des fibres et la totalité des groupes hydroxyle (-OH) sur la surface externe des fibres de cellulose et la surface interne des micropores dans la paroi de la fibre sont devenues sillées, alors que la surface des nano pores était inaccessible à TCMS. La nouveauté réside dans la possibilité de modifier à la fois la surface externe et la structure microporeuse interne des fibres de cellulose d'une couverture de silane de 50 à 100%, ce qui

## **CHAPITRE I: Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante**

---

donne un nouveau matériau superhydrophobe, avec un angle de contact d'environ 150 °. C'est la première fois que la cellulose est hydrophobes à la fois en interne et en externe. Ils ont appelé la mousse résultante Cellufoam.

### **I.4.6 M.-F. Wang et all [16]**

Afin de produire des propriétés hydrophobes extrêmement élevées avec une faible teneur en fluor, des spacer longs en dodécyle ont été introduits entre un polymère et des chaînes fluorées afin de réduire la mobilité des chaînes fluorées, en particulier des chaînes courtes de perfluorobutyle (F-butyle). Nous rapportons la synthèse et la caractérisation de surfaces de polymère électro déposées obtenues à partir de dérivés de fluor(EDOP) originaux. Des chaînes semi-fluorées de trois longueurs différentes (F-octale: PEDOPC12F8, F-hexyle: PEDOPC12F6 et F-butyle: PEDOPC12F4) ont été greffées sur l'EDOP et séparées avec une chaîne n-dodécyle afin de réduire la mobilité des chaînes F-butyle. . Pour la première fois, un angle de contact étonnamment élevé de 138 ° a été mesuré avec de l'hexa décane sur PEDOPC12F4, bien que des queues de F-octale soient nécessaires pour produire des surfaces superhydrophobes robustes. En produisant des surfaces lisses, nous séparons avec succès l'influence de l'hydro- et oléo phobie intrinsèque et de la structuration de la surface sur les angles de contact statiques de l'eau et de l'hexa décane. Ici, la structuration de surface augmente l'angle de contact de l'hexa décane de 90 ° pour PEDOPC12F4. L'équation de Cassie – Baxter prédit une porosité de 84,5% entre la surface et une gouttelette d'hexa décane.

### **I.4.7 S. Srinivasan et all [17]**

Dans ce travail, ils ont préparé des films minces de nanotubes de carbone à parois multiples (MWCNT) sur des substrats de verre dotés de propriétés transparentes, conductrices et superhydrophobes. Les MWCNT ont été dispersés dans des solutions de fluoropolymère (FP) afin de modifier leur surface par greffage de FP. Un procédé de revêtement par immersion a été utilisé pour préparer les films à une vitesse continue et avec un nombre de revêtements différent. Les compositions chimiques et les microstructures de la surface du film préparé ont également été étudiées par spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS) et par microscopie électronique à balayage (MEB). Le film présentait une transmittance de 83,5% et une résistance de feuille de  $1,38 \times 10^4 \Omega \text{ sq}^{-1}$ , ainsi qu'un angle de contact élevé de 160,2 °. Les réseaux 3D MWCNT et la faible énergie de surface du FP jouent un rôle important dans la création de la surface superhydrophobe du film MWCNT.

### **I.4.8 Isaac Ramallah et all [18]**

Ce travail propose une nouvelle technique pour améliorer la stabilité des isolateurs hautes tensions, affectés par la présence de prolonger sa stabilité, ils ont appliqué un revêtement en poudre sur les isolateurs qui ont des propriétés isolantes et un superhydrophobie. Dans leur travail, les auteurs s'inspirent de «l'effet lotus», et une poudre de taille nanométrique a été mise au point par la méthode sol-gel et le revêtement est effectué sur la surface isolante en porcelaine, laquelle élimine toutes les normes de test électrique et maintient son isolation. Propriété de nature superhydrophobe. L'angle de contact des gouttelettes d'eau de  $158,8^\circ$  et un angle de glissement de 80 indiquent le caractère super-hydrophobe à la surface de l'isolant. L'isolant a été maintenu dans un environnement très pollué pendant six mois à différents endroits où aucune poussière n'a été collectée sur l'isolateur par rapport à un isolant non revêtu.

### **I.4.9 Arshad et all [19]**

Cette investigation présente une analyse détaillée pour effectuer des revêtements superhydrophobes dans les environnements pollués et environnements de congélation a été examiné. Des revêtements superhydrophobes pour isolants extérieurs semble prometteur pour réduire le risque d'accumulation de glace et accumulation de pollution. Cependant, cela doit être vérifié davantage à partir d'expériences. En particulier, cette revue suggère la nécessité pour des tests standardisés et une procédure pour évaluer le long terme durabilité des revêtements super hydrophobes à l'extérieur environnement. En outre, des tests de laboratoire approfondis sont nécessaires pour évaluer le vieillissement et la dégradation de revêtements superhydrophobes dans des environnements difficiles.

## **I.5 Conclusion**

La synthèse des travaux réalisés par plusieurs investigateurs sur l'étude du comportement des surfaces hydrophiles, hydrophobe et superhydrophobe était présentée dans ce chapitre. Nous avons constaté que les surface superhydrophobes peuvent être considérer comme une meilleur solution pour l'isolation HT, en raison de leur caractéristique de non muabilité. Par exemple, ces isolateurs recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de court-circuit plus élevée que les modèles hydrophobe et

## **CHAPITRE I: Synthèse des travaux réalisés sur les surfaces isolante**

---

hydrophile. Dans ce cas, la formation et la propagation des décharges électriques est difficile même dans des conditions de pollution extrêmes.

Lors de l'analyse des travaux suscités, nous n'avons pas rencontré des investigations sous condition climatique saharienne concernant des surfaces isolantes superhydrophobe. Cela explique le grand intérêt accordé à ce thème de recherche.



## CHAPITRE II

### Caractérisation des surfaces superhydrophobes





## II.1.Introduction

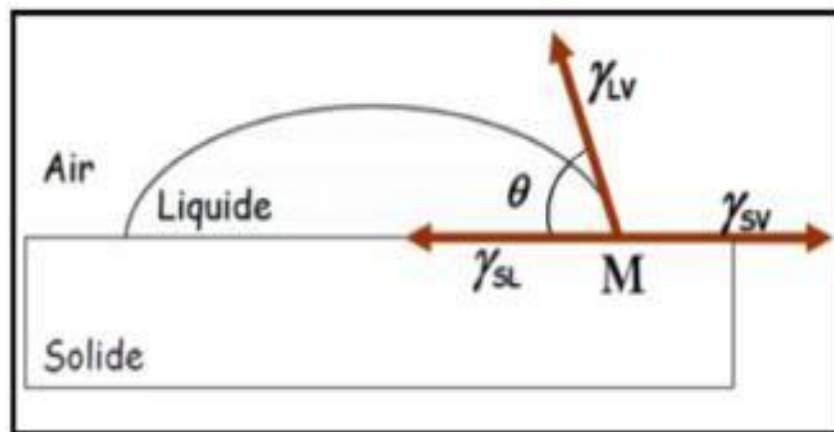
Dans ce qui suit, nous allons citer les différentes définitions et caractéristiques des surfaces isolantes de nature différentes, à savoir, les surfaces hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobes. De plus, un aperçu sur la classification des surfaces par rapports à leur angle de contact à été décrit également.

Nous allons présenterles différentes étapes et méthodes liées à la fabrication des revêtements superhydrophobes découvert jusque aujourd'hui.

## II.2.Propriétés superhydrophobe

### II.2.1.Définition de la mouillabilité

La mouillabilité caractérise la facilité avec laquelle une goutte de liquide s'étale sur une surface solide. Elle dépend de l'angle de contact que forme une goutte d'eau déposée sur cette dernière. 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 (habituellement une calotte sphérique) définie par un angle de contact  $\theta$  qui caractérise les interactions entre le liquide et le solide (Figure II. 1).



**Figure. II.1:** Représentation de l'angle de contact à l'équilibre

L'équilibre thermodynamique du point M sur la ligne triple solide-liquide-vapeur s'exprime par l'équation de Young reliant les énergies de surface (Équation II.1) :

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

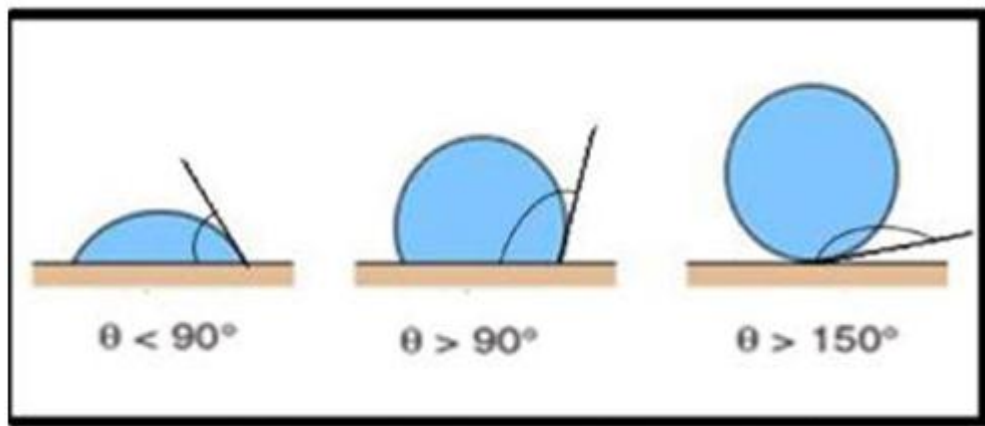
Où :

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

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

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

L'équation de Young ne peut s'appliquer que dans le cas des surfaces parfaitement lisses, sans porosité ni rugosité et totalement homogènes.



**Figure. II.2** : Les différents états de la mouillabilité

### II.2.2. Non mouillabilité

La non-mouillabilité désigne la capacité de la surface d'un matériau à ne pas pouvoir créer des liaisons d'hydrogène avec une goutte d'eau, c'est ce qui l'empêche de s'étaler sur la surface [20].

### II.2.3. Angle de contact [21]

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 de 0 à 180°, en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

### II.2.4. Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact

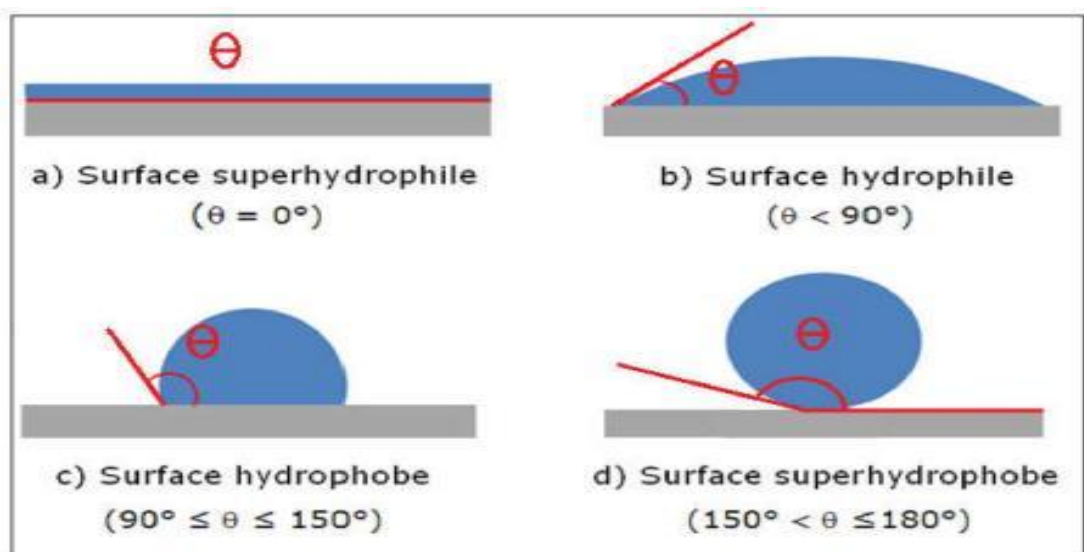
Si l'angle de contact est presque égale a 0°, alors la surface sur laquelle repose la goutte

d'eau est dite superhydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Figure. II. 3a).

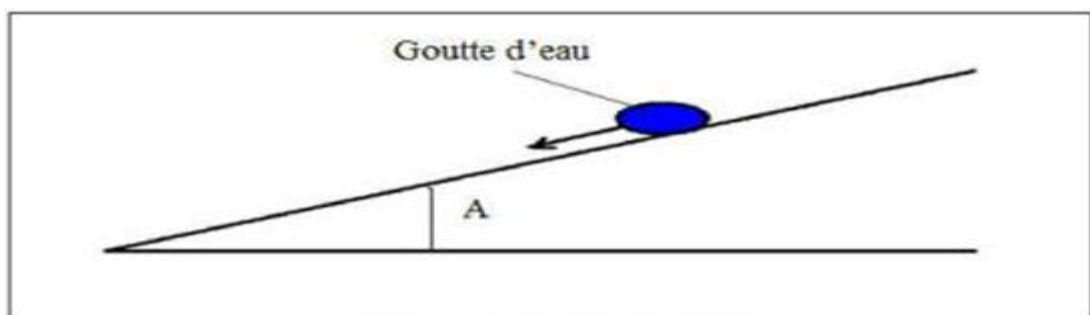
Si l'angle de contact est inférieur à  $90^\circ$ , alors la surface sur laquelle repose la goutte d'eau est dite hydrophile, elle ne repousse pas l'eau (Figure. II. 3b).

Si l'angle de contact est compris entre  $90^\circ$  et  $150^\circ$ , alors la surface est hydrophobe et la goutte d'eau sera bombée (Figure. II. 3c).

Si l'angle de contact est compris entre  $150^\circ$  et  $180^\circ$ , on dit que la surface est superhydrophobe et la goutte d'eau sera presque sphérique (Figure. II. 3d) [21].



**Figure.II.3:** Comportement d'une goutte sur une surface [22]



**Figure.II. 4:**Angle de glissement

#### II.2.4.1. Effet Wenzel [23]

En 1936, Wenzel affirme que lorsqu'on pose une goutte d'eau sur une surface présentant une faible densité d'aspérités, l'épouse, vu que la rugosité s'imprègne et donc retient la goutte sur

son support, dans ce cas, le mouillage est partiel.

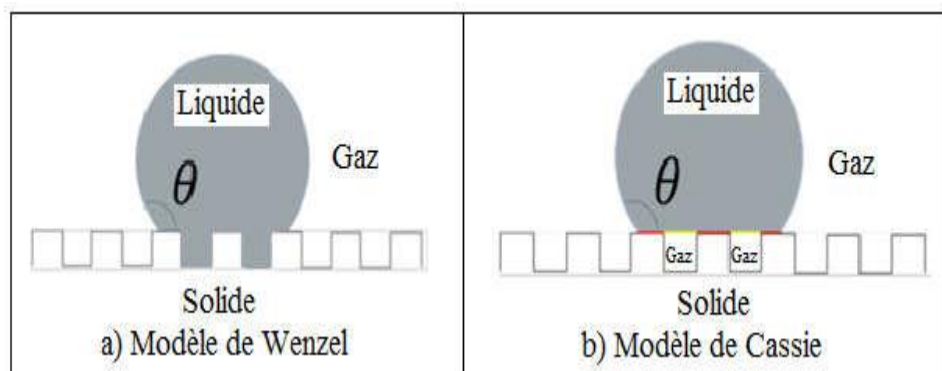
La relation de Wenzel est la suivante:

$$\cos\theta^* = r\cos\theta \tag{II.2}$$

$r$  : la rugosité ( $r > 1$ );

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

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



**Figure. II.5** : Modèles de Wenzel et de Cassie

**II.2.4.2. Effet de Cassie-Baxter**

Le modèle de Cassie-Baxter, dans sa forme générale, considère le mouillage statique d'une goutte liquide qui repose sur une surface lisse hétérogène (Figure II.6-b). 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.

Equation de Cassis est la suivante :

$$\cos\theta^* = y\cos\theta - (1 - y) \tag{II. 3}$$

Avec :

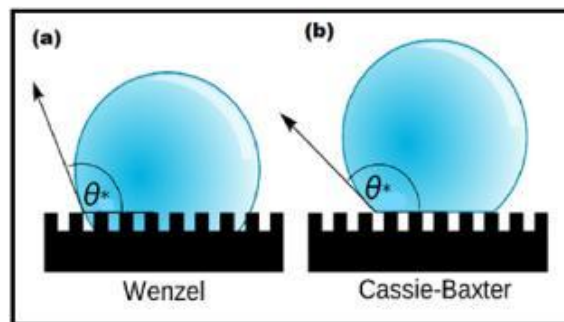
$\theta$  : angle de contact sans la rugosité ;

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

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

$(1 - \phi_s)$  : la proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée.

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



(a) Modèle de Wenzel, (b) Modèle de Cassie [24]

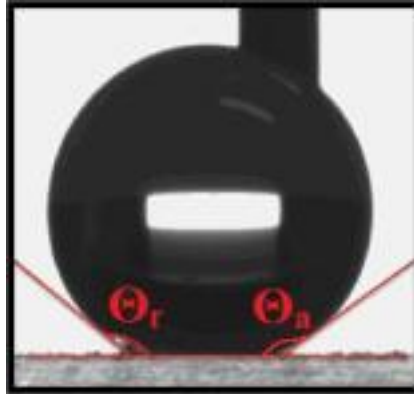
**Figure. II. 6:** Modèle de surfaces super hydrophobes

### II.2.5. L'hystérésis de l'angle de contact

Un angle de contact supérieur à  $150^\circ$  n'est pas le seul critère permettant de qualifier les surfaces superhydrophobes. Ces surfaces démontrent aussi une faible hystérésis de l'angle de contact (HAC) [25]. Ce dernier nous permet de comprendre le comportement d'une goutte d'eau vis-à-vis d'une surface en mouvement. C'est-à-dire de savoir si la goutte va s'accrocher ou glisser sur la surface. Pour cela, on mesure l'angle d'avancée et de reculée (Figure II.7).

On note HAC la différence entre l'angle d'avancée ( $\theta_a$ ) et l'angle de reculée ( $\theta_r$ ). Plus l'hystérésis de l'angle de contact est grande, plus l'accrochage des gouttes est important. À l'opposé, plus il est petite, plus la goutte glisse facilement sur la surface. L'importance de l'hystérésis de l'angle de contact est souvent attribuée aux surfaces chimiquement et morphologiquement hétérogènes et aussi à la présence d'une rugosité [26].

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



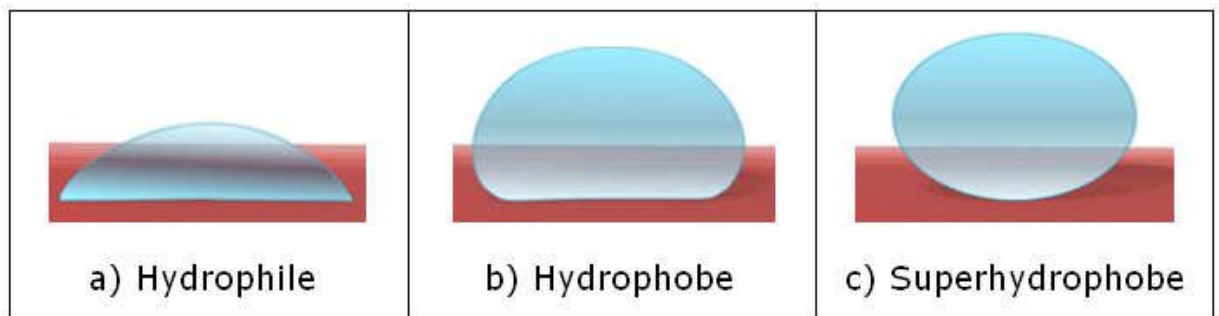
**Figure. II.7:** Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact. L'angle de droite est l'angle d'avancée et celui de gauche est l'angle de reculée.

### II.2.6. Surface superhydrophile

Une surface superhydrophile est une surface ayant un angle de contact presque égal  $0^\circ$  avec une goutte d'eau [27].

### II.2.7. Surface hydrophile

Une surface hydrophile ( $9 < 90^\circ$ ) [21] 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 (Figure II. 8a) [28].



**Figure. II. 8 :** Goutte d'eau sur une surface hydrophile à superhydrophobe [29]

### II.2.8. Surface hydrophobe

Contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes ont du mal à créer des liaisons d'hydrogène avec les gouttes d'eau, qui, en les déposants sur celle-ci, se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau (Figure. II. 8b) [30].

**II.2.9. Surface Superhydrophobe**

Les matériaux superhydrophobes sont une catégorie des matériaux hydrophobes ayant un angle de contact supérieur à 150°.

En y déposant une goutte d'eau, cette dernière a tendance à se rassembler en gardant une forme sphérique (Figure. II. 8c) [21].

La caléfaction est le degré extrême de la superhydrophobicité. On l'atteint en déposant une goutte d'eau sur une plaque chauffante à 300°. La goutte ne s'évapore pas, ceci est dû au film de vapeur qui se crée entre elle et la plaque chauffante, ce qui explique sa mobilité, longévité et son angle de contact proche de 180° [31].

**II.3. Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes**

Plusieurs méthodes existantes dans la littérature ont été utilisées par des chercheurs afin de produire ce type de surface :

**II.3.1. Dépôt par vapeur chimique [32]**

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 coûteuse, du fait qu'elle nécessite une chambre qui contrôle la pression et la température.

**II.3.2. Dépôt électrochimique [33]**

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).

**II.3.3. Photolithographie [34]**

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.

**II.3.4. Techniques utilisant le plasma [35]**

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.

**II.4. Applications**

Les industriels s'intéressent de plus en plus au phénomène de la superhydrophobie car elle répond à de nombreux besoins et problèmes des industriels, ainsi que pour les consommateurs.

Les surfaces superhydrophobes possèdent un large champ d'applications dans divers domaines. L'application la plus courante est celle des surfaces autonettoyantes [36-37]. Cette propriété permet l'élimination des poussières et d'autres saletés des surfaces.

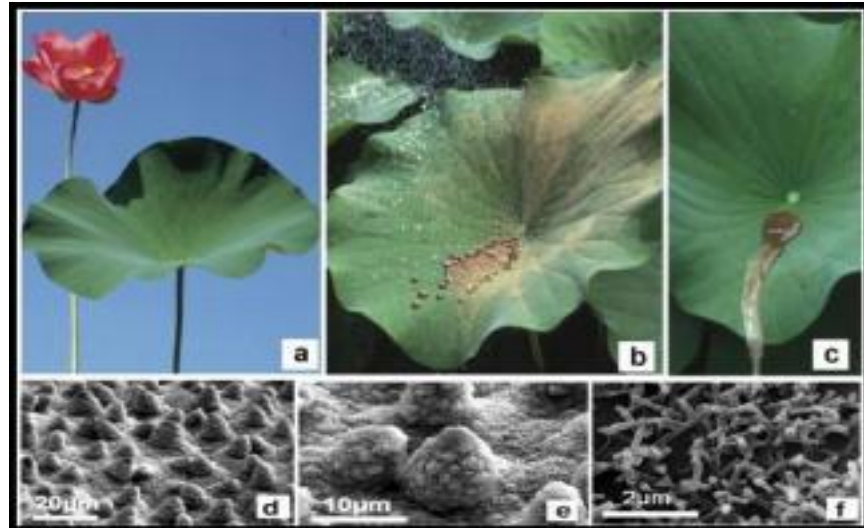
Les surfaces superhydrophobes sont souvent utilisées dans le domaine biomédical, [38-39] empêchant les contaminants de se propager sur les surfaces. De plus, ces surfaces peuvent servir comme des agents anticorrosifs [40-41]. Aussi, ils sont applicables afin de protéger différentes structures et équipements de la neige ou le givre qui adhèrent [42-43].

La reproduction des propriétés superhydrophobes sur des matériaux requiert l'étude des systèmes déjà présents dans la nature, qui développent de telles propriétés.

**II.5. Surfaces superhydrophobes dans la nature**

Comme nous avons mentionné au paravent une surface est dite superhydrophobe lorsqu'elle est très difficile à mouiller, c'est le cas de la feuille de lotus (Figure II.9.a). Cet aspect est aussi nommé l'effet lotus [44]. Au microscope électronique à balayage (MEB) l'analyse de la surface de cette feuille a montré qu'elle présente une rugosité hiérarchique à la fois microscopique et nanoscopique. Par ailleurs, la surface de la feuille de lotus est formée de papilles de quelques microns (Figure II.9.d) sur lesquelles reposent des cristaux de cire (Figure II.9.e-f). Cette couche de cire est hydrophobe, ce qui confie à la surface de la feuille de lotus des capacités autonettoyantes (Figure II.9.b-c): L'eau ne touche que le haut des papilles, donc peu de solide et beaucoup d'air, ce qui permet à la goutte d'être ultra-mobile. C'est donc cette texture couverte d'une chimie hydrophobe qui confie à la feuille de lotus cette propriété remarquable qu'on appelle la superhydrophobicité.





**Figure. II. 9:** Images montrant la surface superhydrophobe et autonettoyante de la feuille de lotus: (a) Une fleur de lotus, (b) Une feuille de lotus contaminée avec de l'argile, (c) Élimination de l'argile par l'eau, (d-f) Des images de MEB montrant la surface des feuilles de lotus avec différents grossissements [45, 24]

De nombreuses plantes ont cette propriété d'être superhydrophobes [44]: Bartlett et Neinhuis ont classé environ 200 plantes, dont le Ginkgobiloba, le Magnolia et Y Eucalyptus. Certains animaux et insectes possèdent également cette propriété [46]. C'est le cas pour les plumes d'un canard ou les ailes et les pattes de certains insectes comme le Gerris (Figure II.13.).



**Figure. II. 10:** Insecte Gerris sur une surface d'eau [46]

### II.5.1. Goutte de pluie sur une surfacesuperhydrophobe

L'eau ne mouille pas la feuille de lotus qui est superhydrophobe, après la pluie : les gouttes restent dispersées, et leur angle de contact avec la surface est très élevé. Les plus petites d'entre elles sont quasi sphériques ; les grosses, elles, sont aplaties par la pesanteur [47].



**Figure. II. 11:** Gouttes de pluie sur une feuille de lotus à caractère superhydrophobe [48]

## II.6. Technique de caractérisation des surfaces

### II.6.1. Energie de surface

L'énergie de surface résulte des forces d'attraction et de répulsion existantes entre les matériaux présents au voisinage de la zone de séparation de chacune des phases. Cette énergie est représentée par la tension superficielle, dans le cas d'un liquide en équilibre avec sa phase vapeur ou par la tension inter faciale pour des systèmes solide-liquide ou liquide-liquide non miscibles. La mesure de l'énergie libre de la surface d'un solide est déduite de la mesure de l'angle de contact de liquides sonde de tension superficielle connue sur le solide. La mesure de l'angle de contact se fait à la jonction de trois phases mises en jeu lorsque le liquide sonde est déposé sur le solide ces phases sont liquides, solides et gazeuses. En somme, la détermination de l'angle de contact permet d'évaluer l'affinité d'une surface vis-à-vis d'un liquide [49].

### II.6.2. Hydrophobicité [50]

Par rapport aux autres matériaux, les silicones se distinguent par un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme, appelé hydrophobicité : l'eau ne pénètre pas dans les pièces d'isolation en élastomères silicones, mais perle à la surface (Figure. II.15), même au bout de nombreuses années. Ils minimisent les courants de cheminement et évitent les décharges dues

au contournement électrique, même si la surface est fortement polluée, car ils transmettent leurs propriétés hydrophobes à la couche de dépôts par transfert d'hydrophobie.

L'application d'un revêtement silicone à posteriori sur les isolateurs en verre ou en porcelaine permet d'obtenir le même effet et supprime les opérations de nettoyage difficiles jusqu'à présent nécessaires.

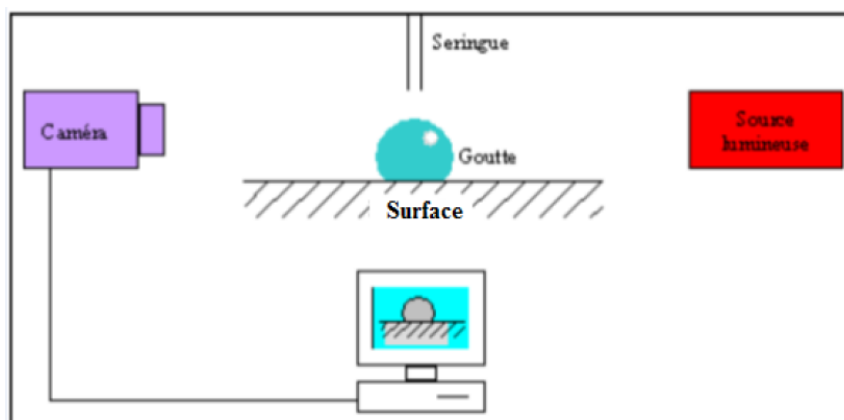


**Figure. II.12 :** hydrophobicité d'une surface en silicone [51]

## II.7. Méthodes et appareils de mesure de la pluie

### II.7.1. Mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide

La figure.II.13 donne le schéma d'un appareil de mesure de l'angle de contact.



**Figure. II. 13:** Appareil de mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau de pluie sur une surface solide [52]

En pratique, une goutte de liquide, en général de l'eau ultra-pure, est déposée à l'aide d'une seringue sur la surface de l'échantillon à analyser.

La mesure de l'angle se fait à partir d'images capturées par un PC via une caméra. Le logiciel

WINGOUTTE permet de numériser le contour de la goutte par traitement des images. Il détermine ensuite l'angle de contact grâce à des méthodes d'interpolation [52].

### **II.7.2. Mesure de la hauteur d'eau précipitée**

Quelle que soit la forme de la précipitation, liquide ou solide, on mesure la quantité d'eau tombée durant un certain laps de temps. On l'exprime généralement en hauteur d'eau tombée horizontale (mm) ou en intensité (mm/h). Mais sur les bulletins météo à la télévision, on entend toujours parler de ( $l/m^2$ ). Cette unité plus parlante, est identique à celle utilisée par les météorologues (le millimètre), puisqu'en effet [53] :

$$1 \text{ litre} = 1 \text{ dm}^3 = 10^6 \text{ mm}^3$$

$$1 \text{ m}^2 = 10^6 \text{ mm}^2$$

$$\text{D'où } 1 \text{ l} / \text{m}^2 = 10^6 \text{ mm}^3 / 10^6 \text{ mm}^2 = 1 \text{ mm}$$

Les principaux instruments de mesures des précipitations sont le pluviomètre et le pluviographe [53].

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

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales caractéristiques les différents états de la mouillabilité et les angles de contacts et leurs utilisations, ainsi que les méthodes et les appareils de mesure de la pluie et de mesure de l'angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface solide isolant.

D'après l'analyse réalisé dans ce chapitre, nous avons constaté que la plupart des techniques de fabrication des surfaces coûtent chères, ce qui nous a poussé dans cette étude à trouver une autre méthode moins cher et efficace pour confectionner ces surfaces, et d'utiliser un autre logiciel facile afin de calculer l'angle de contact des gouttes d'eau déposé sur les surfaces superhydrophobes.

## **Chapitre III**

### **Matériaux isolants et leur pollution**

**III.1. Introduction**

La conception et le fonctionnement de l'équipement électrique dépendent des matériaux disponibles. Ainsi, les propriétés des isolants jouent un rôle très important dans la construction des appareils électriques. La fonction principale d'un isolant est d'empêcher le passage du courant lorsqu'on le met à une tension électrique. Cependant, celui-ci ne peut supporter des tensions trop élevées, à une certaine tension il se produit un phénomène de contournement ou la substance perd ses propriétés isolantes. Lorsqu'il atteint la tension de claquage, des électrons sont arrachés de leur orbite extérieure et deviennent libres. Il existe une grande variété d'isolants solides. En plus des isolants naturels, on trouve sur le marché de nombreux isolants synthétiques (silicone) qui ont été développés pour différentes applications.

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

Dans ce chapitre, nous parlons des types d'isolateurs et des types de pollution en général.

**III.2. Définitions****III.2.1. Isolants [54]**

Les isolants sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :  $10^8$  à  $10^{16}$   $\Omega.m$ , car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tou

s les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif.

### **III.2.2. Isolations**

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage des matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées.

### **III.2.3. Diélectrique [55]**

Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Polarizable, c'est-à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits). Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. À ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. On compte parmi ces milieux : le vide, le verre et de nombreux plastiques.

## **III.3. Matériaux utilisés pour les isolants solides**

Les matériaux isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine. Mais les résines synthétiques commencent aussi à être utilisées.

### **III.3.1. Porcelaine**

La porcelaine est constituée par du kaolin et du quartz de première qualité. Ils sont cuits à 1500°C, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau [56].

Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes :

- > Rigidité diélectrique élevée, 25 à 35 kV/mm ; permittivité relative  $\epsilon_r = 6$  à 7 ;
- > grande résistivité, environ  $10^{11}$  Q. cm à 20°C ;
- > Manque de pertes électrique en basse fréquence et en haute tension ;
- > résistance mécanique 2500 à 4000 N/mm.

En plus de ces bonnes caractéristiques, elle est d'une grande résistance aux agents atmosphériques et chimiques, elle n'absorbe pas l'humidité. Elle présente aussi une grande résistance aux températures super élevées sauf qu'au-delà de 300°C ; ces propriétés diélectriques diminuent rapidement.

### **III.3.2. Verre [56. 57]**

Il 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 se 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'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 ( $\tan \delta$ ) =  $5 \times 10^{-2}$  ;

Les principales variétés des verres utilisées dans l'industrie électrique sont les suivantes :

#### **III.3.2.1. Verre trempés**

Ils consistent à porter la pièce à une température voisine de son point de ramollissement 100°C et à la refroidir brusquement au moyen de jets d'air froid sous pression, ce traitement améliore les qualités mécaniques du verre ainsi que sa tenue aux chocs thermiques en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut changer soudainement la température pouvant atteindre 100°C.

Caractérisé du verre trempé est de rendre visible tout isolateur perforé, ce qui n'est pas des isolateurs à capot et tige en céramique, sous les efforts d'une contrainte électrique trop forte ou même lors d'une déféctuosité de l'isolateur.

#### **III.3.2.2. Verres recuits**

Ils ont été utilisés pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit



ne supporte que des tensions mécaniques relativement faible, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension. On cite aussi les verres sodiques, borosilicate et les polyamides.

### **III.3.3. Bakélite**

C'est une résine artificielle inventée vers 1909 par le chimiste BAKELAND. On l'obtient sous trois états [57, 58].

> La Bakélite A : produite par un chauffage modéré (50°C), et une résine jaunâtre, fondant facilement dans l'alcool méthylique.

> La Bakélite B : C'est de la bakélite A transformée par un chauffage prolongé vers (110°C) ; elle est solide, friable, insoluble dans les dissolvants usuels ;

> La Bakélite C : s'obtient vers (180° C) ; elle est insoluble, dure infusible et supporte sans se décomposer une température de 300°C ; elle n'est pas attaquée par l'oxygène, l'ozone et les acides usuelles.

### **III.3.4. Silicone**

La silicone est une substance synthétique à base de silicium et d'oxygène formant une quantité particulière de plastique. Les silicones, ou polysiloxanes, sont des polymères inorganiques formés d'une chaîne silicium oxygène (...-Si O Si O Si O- ...) sur laquelle des groupes se fixent sur les atomes de silicium. Certains groupes organiques peuvent être utilisés pour relier entre elles plusieurs de ces chaînes Si-O. le type le plus courant est le polydiméthylsiloxane linéaire ou PDMS. Le silicium étant présent en proportion suffisante pour affecter les propriétés du produit de façon sensible.

Les silicones sont d'excellents isolants pour les applications hautes et moyenne tension en raison de leur structure moléculaire. Par exemple, les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution présentent une résistance aux courants de cheminement plus haut que les modèles en porcelaine, en verre ou en EPDM. Les décharges électriques sont évitées même dans des conditions de pollution extrêmes.

Mais leurs avantages ne se limitent pas aux isolateurs. Aujourd'hui, on utilise les silicones isolants dans toutes les applications MT et HT exigeant une super sécurité de fonctionnement et une grande longévité, par ex. dans les transformateurs, sous forme d'huile, ou dans les

extrémités de câbles haute tension [50].

### III.3.4.1. Les propriétés de la silicone [59]

Les silicones représentent quelques propriétés fondamentales :

- > Liaison Si-O 'forte' et grande inertie chimique ;
- > bonne tenue aux UV par rapport aux autres polymères ;
- > Température de dégradation élevée ; Flexibilité à froid de la chaîne polymérique ;
- > Température de transition vitreuse basse ;

Ils possèdent une stabilité remarquable aux intempéries et au vieillissement thermique. A titre d'exemple on peut citer l'estimation qui figure dans le tableau suivant :

**Tab III. 1:** estimation de la durée de vie d'un élastomère de silicone

Température (C°)	Durée de vie (année)
90	40
150	5-10
200	2-5
250	0.25
315	0.04

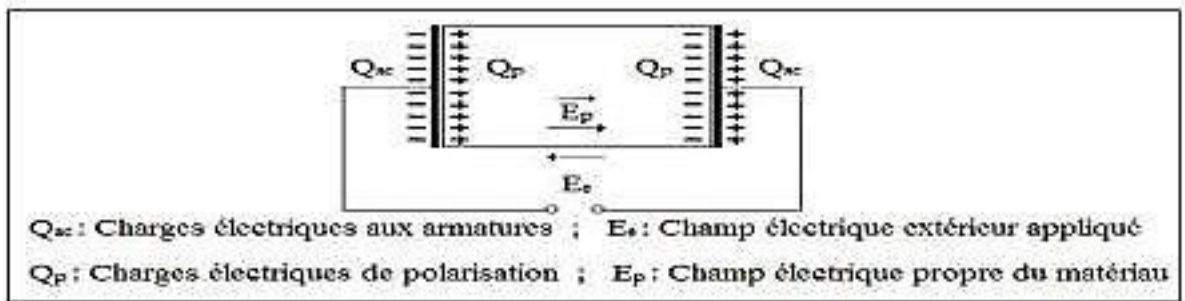
Les valeurs des propriétés suscitées ont été tirées de la littérature

- > Rigidité diélectrique 15 kV/mm ;
- > Permittivité relative à 25 °C est de 5,4 ;
- > Facture de dissipation diélectrique à 25 °C est 10 kHz ;  $\text{tg } \delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$  ;
- > Conductivité thermique : 0,41 à 0,62 W/m.K ;
- > Température d'auto-inflammation est le plus grand à 300 °C ;
- > Masse volumique de 2300 à 2800 kg/m<sup>3</sup> ;

### III.4. Propriétés électriques [60]

#### III.4.1. Permittivité

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre  $E_p$  à l'intérieur de la substance, s'opposant au champ électrique ( $E_e$ ) extérieur appliqué (Figure. III.1). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $S_r$ .



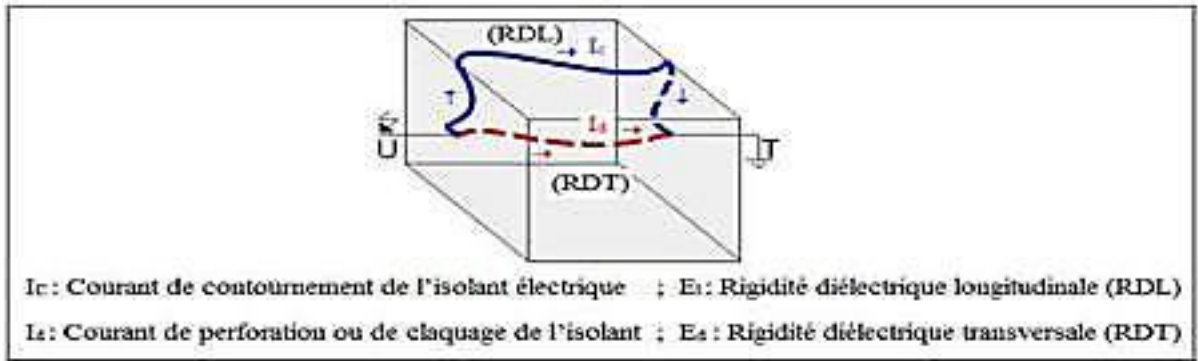
**Figure. III. 1:** Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

#### III.4.2. Rigidité diélectrique

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

Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux on distingue deux types de rigidité:

- On parle de rigidité diélectrique transversale (RDT), lorsque le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau. Par contre la rigidité diélectrique longitudinale (RDL) est obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface du matériau (Figure. III. 2).



**Figure. III. 2:** Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)

### III.4.3. Résistance d'isolement

On distingue trois types de résistivités:

#### III.4.3.1. Résistance transversale ou volumique ( $R_v$ )

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

#### III.4.3.2. Résistance superficielle ( $R_s$ )

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

#### III.4.3.3. 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.

### III.4.4. Facteur de pertes

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (Figure. III. 3).

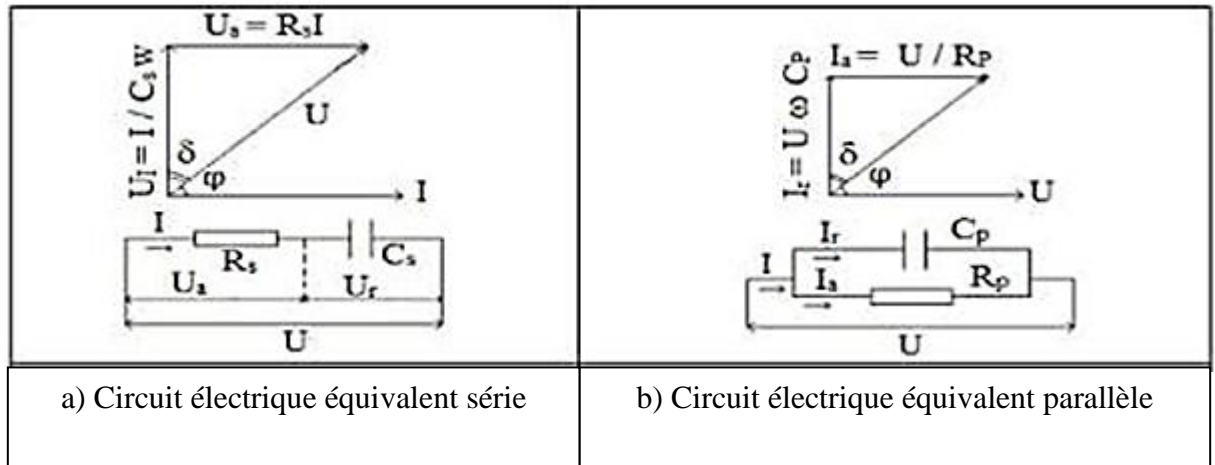


Figure. III. 3 : Circuit électrique équivalent série et parallèle

### III.5. Définitions

#### III.5.1. Contournement

Est fait décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier. Dans notre cas, c'est de l'isolateur qu'il s'agit. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur [61,62].

#### III.5.2. Tension de Contournement

C'est le niveau de tension le plus bas au-delà duquel les arcs électriques joignent les deux électrodes [63]. D'après A. Cimador [64] elle dépend de :

- > La nature de la tension et sa polarité ;
- > La longueur de l'isolateur ;
- > La forme des électrodes (pointe-plan, plan-plan,...etc.) ;
- > La résistivité volumique moyenne de la couche polluante ;
- > La répartition de la couche de pollution ;
- > Le profil de l'isolateur (largeur de la couche de pollution) ;
- > la météo telles que la pression, l'humidité et la température ;

**III.5.3. Tension de tenue**

C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive [65].

**III.6. Formation et réparation de la couche de pollution**

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépendent du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et du niveau de tension qui leur est appliqué.

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vent et forte pluie). Par conséquent, la répartition de la pollution le long des chaînes d'isolateurs est loin d'être uniforme [66]. Cette non-uniformité devient plus accentuée lorsque la longueur des chaînes d'isolateurs augmente.

La répartition de la pollution est loin d'être uniforme et homogène et dépend essentiellement :

- > De l'orientation (verticale ou inclinée) de la chaîne par rapport au sol ;
- > De la distance à la source de la pollution ;
- > De la nature des dépôts, poids et taille des particules ;
- > Les conditions climatiques du site (vent, pluie, givre,..) ;

**III.7. Sources de pollution**

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

**III.7.1. Pollution naturelle**

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

**III.7.1.1. Pollution désertique**

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sables déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs une couche de pollution contenant des sels. Une fois humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [67, 68].

**III.7.1.2. Pollution marine**

Dans les installations en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux même, ou par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [69].

**III.7.1.3 Autre type de pollution naturelle**

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

**III.7.2. Pollution industrielle**

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ...etc. Les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs. De plus, dans les régions agricoles; les agents polluants peuvent être insecticide engrais, grains de pollens, cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.

**III.7.3. Pollution mixte**

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées, comme exemple les pollutions marine et industrielle lorsque les installations électriques sont situées en bord de mer.

**III.8. Techniques de lutte contre la pollution**

Sont considérés l'augmentation du degré de pollution un risque immense pour les installations électriques. Pour cela, plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

**III.8.1. Techniques de lutte contre la pollution**

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

- > Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- > L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [70].

**III.8.2. Allongement de la ligne de fuite**

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont utilisées :

Allongement de la ligne de fuite totale d'une chaîne isolateurs, donc l'augmentation du nombre d'isolateurs, est la méthode la plus employée dans les zones à pollution moyenne.

Cette technique est certes limitée un pylône d'un certain type ne peut pas admettre un important supplément d'isolateurs

**III.8.3. Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)**

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



utilisés dans les régions désertiques [71].

#### **III.8.4. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)**

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [72].

#### **III.8.5. Revêtements à base de silicones**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [73].

### **III.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les diverses sources de pollution, ainsi que les caractéristiques des matériaux isolants et leurs utilisations. Nous pouvons conclure que :

- Un matériau isolant ne peut être caractérisé électriquement que par sa rigidité et sa permittivité diélectrique, son facteur de pertes et sa résistivité transversale ou longitudinale.
- Un matériau isolant ne peut être considéré comme un bon isolant que lorsque celui-ci possède une permittivité moins élevée, des pertes électriques les plus faibles, une rigidité diélectrique très grande.
- La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement d'isolement dans les ouvrages de haute tension.
- La connaissance de degré de pollution est une condition indispensable, pour prévoir une isolation externe convenable.
- Pour mieux dimensionner les chaînes (ailettes) d'isolateurs, il est indispensable de

connaître la sévérité de la pollution des sites concernés, cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

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



**Chapitre IV**  
**Etude expérimentale**

## IV.1. Introduction

Ce chapitre est divisé en deux sections : la première section concerne essentiellement la méthode de fabrication des surfaces superhydrophobes et la présentation de notre procédure d'essais. Après l'obtention de ce type de surfaces, des tests expérimentaux ont été réalisés sur celles-ci sous site avec deux types de pollution :

- Grain de sable ;
- Pluie fine ;

Après ces essais, nous avons calculé l'angle de contact des gouttes d'eaux déposées sur les surfaces isolantes par l'utilisation du logiciel ImageJ.

La deuxième section vise la simulation sous Comsole Multiphasics de l'application du champ électrique sur celle-ci. Dans le but de mieux comprendre le comportement de ce matériau, plusieurs paramètres ont été examinés, à savoir, le volume des gouttes d'eau déposées sur la surface superhydrophobe et le nombre de gouttes de différent volume.

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

### IV.2.1. Fabrication d'une surface superhydrophobe isolante

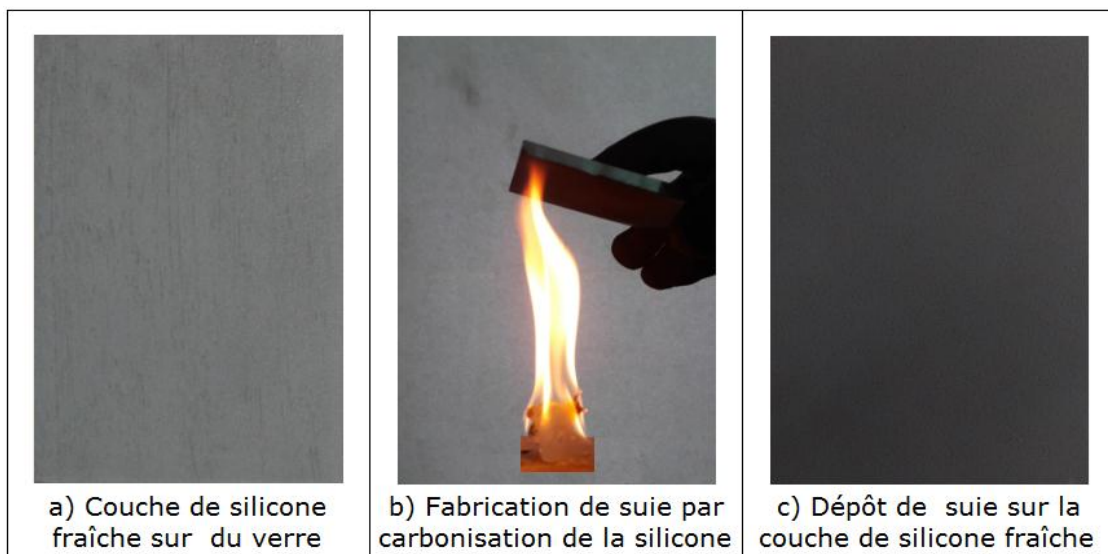
Le dispositif expérimental est composé de dix plaques en verre à face supérieure et bords superhydrophobes (Figure IV. 1a). Cette dernière a pour dimensions: (10cm de longueur x 10cm de largeur x 0.5cm d'épaisseur). Les plaques superhydrophobes sont déposées sur un support, afin de les protéger contre n'importe quelles anomalies qui peut affecter le bon déroulement de nos essais expérimentaux (Figure IV.1b).



Figure IV. 1. Modèle expérimentale

L'obtention de la superhydrophobicité de nos plaques en verre est subordonnée à la réalisation des deux étapes essentielles suivantes:

- Etalage manuel et uniforme d'une quantité de gel en silicone fraîche sous forme d'une couche très fine sur sa face supérieure (Figure IV. 2a).
- Apport de la suie sur la couche fraîche de gel en silicone recouvrant l'isolation au moyen de la carbonisation du gel en silicone (Figure IV. 2b). La figure 2c montre la plaque noircie et rincée à l'eau du robinet.



**Figure IV. 2.** Principales phases de confection d'une surface en verre superhydrophobe

**IV.2.2. Procédure d'essais**

Afin d'examiner l'effet de la pollution atmosphérique sur le pouvoir d'isolement des surfaces superhydrophobe, nous avons exposé nos échantillons en plein air avec les conditions météorologiques suivantes :

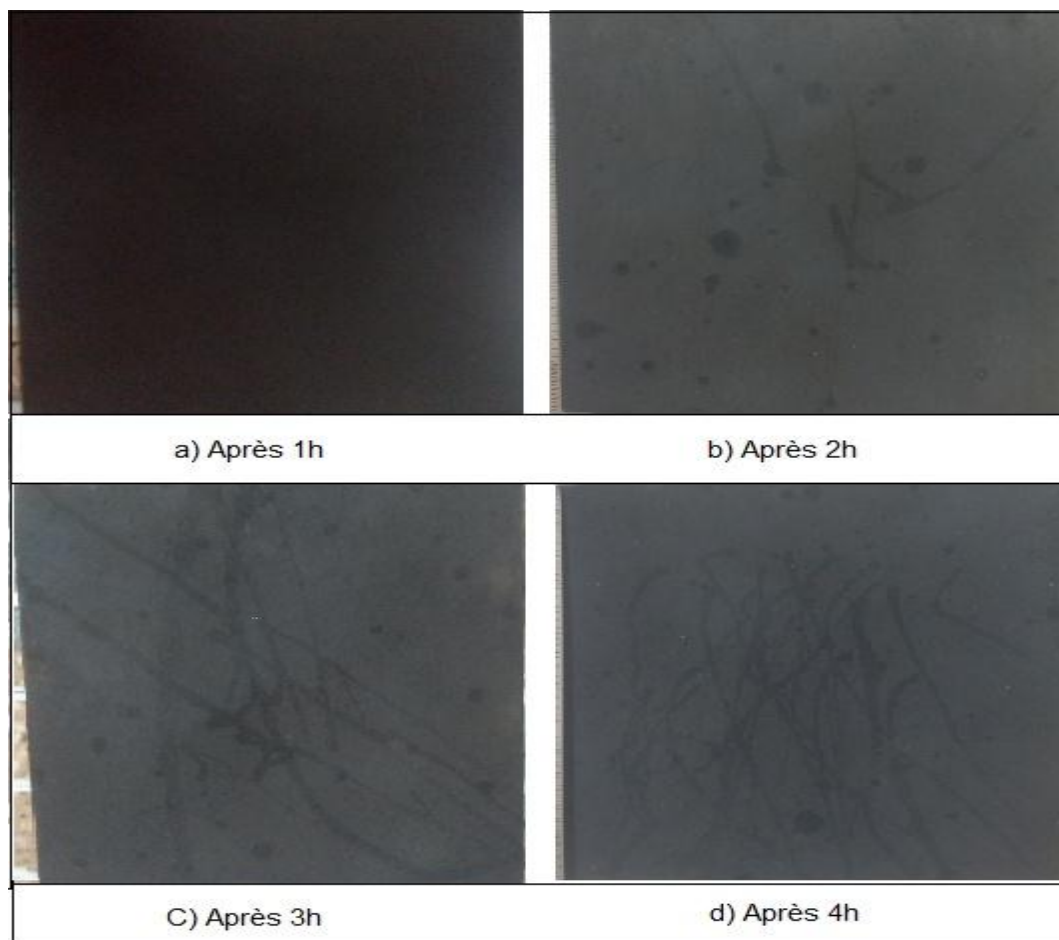
**Tableau IV.1.** Almanach des données météorologiques des trois jours d'essais

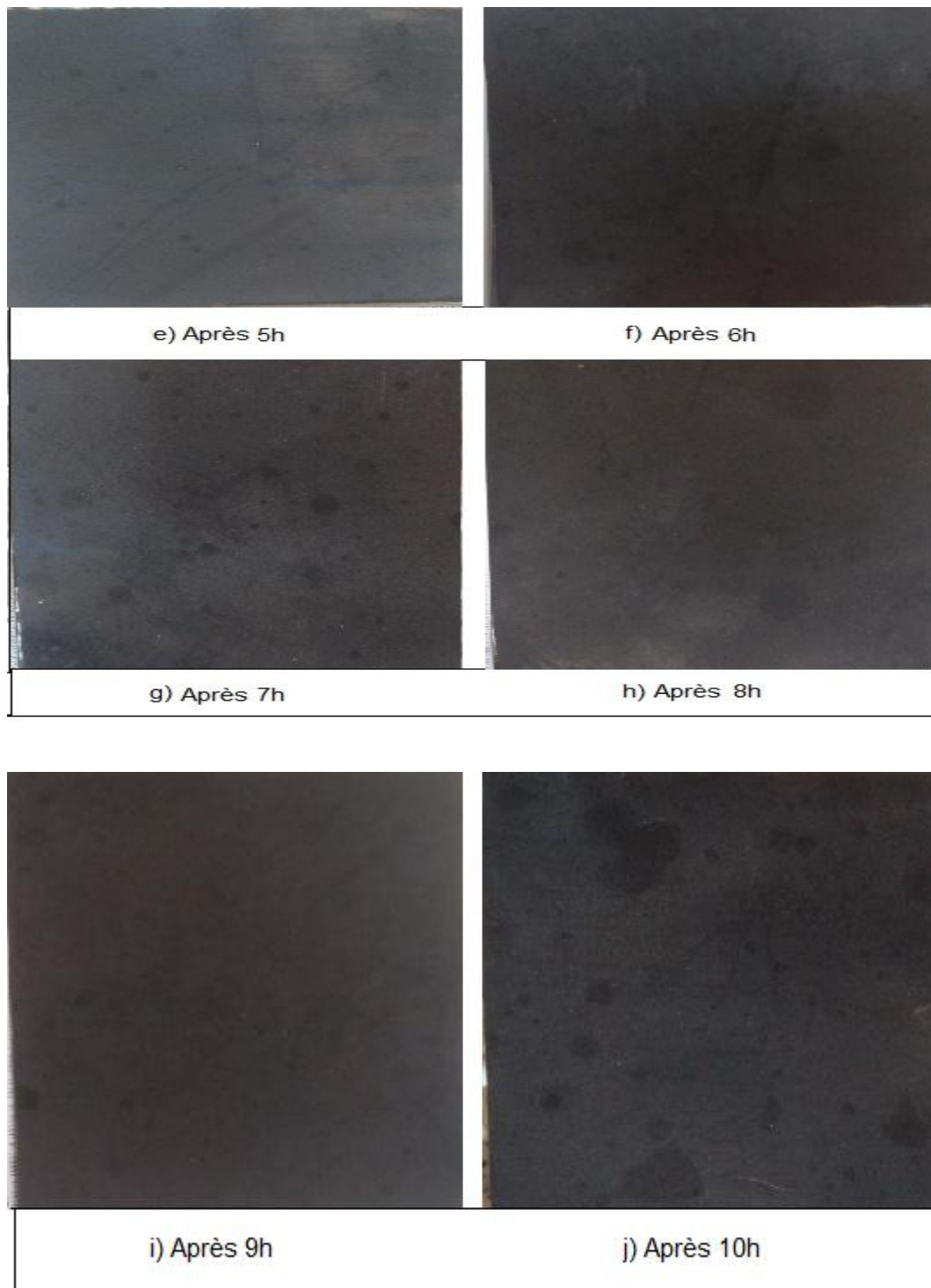
Jour	Max. moy.	Min. moy.	Moy.	Record max./min.	Nuage	Humidité	Précipitation	Vent
30 Avr	34°C	21°C	27°C	37°C / 19°C	15%	19%	0 mm	18 Km/h
2 Mai	29°C	20°C	25°C	36°C / 16°C	4%	18%	0 mm	20 Km/h
3 Mai	31°C	19°C	25°C	38°C / 14°C	1%	18%	0 mm	14 Km/h

Nous avons réalisé des essais durant trois jours, nous commençons par l'exposition de

toutes les plaques au même temps, après chaque heure nous enlevons une plaque et nous enregistrons son état de contamination par des photos.

Les images présentées dans la figure IV.3, illustrent l'état des surfaces superhydrophobes exposées à la pollution atmosphérique durant 10 h, il est à signaler l'absence des gouttes de pluie fine tombées sur les dix surfaces superhydrophobes, celles-ci ont laissé leurs traces sur ces dernières (Figure IV. a, b, c, d), cela peut être expliqué par le fait que la présence des grains de sable n'affecte pas la superhydrophobie des plaques. Cependant, au fur et à mesure que le temps d'exposition est grand, l'accrochage des gouttes d'eau s'élève (Figure IV.3 e, f, g, h, i, j), cela veut dire que la zone où les gouttes s'accrochent sont devenue hydrophobe.

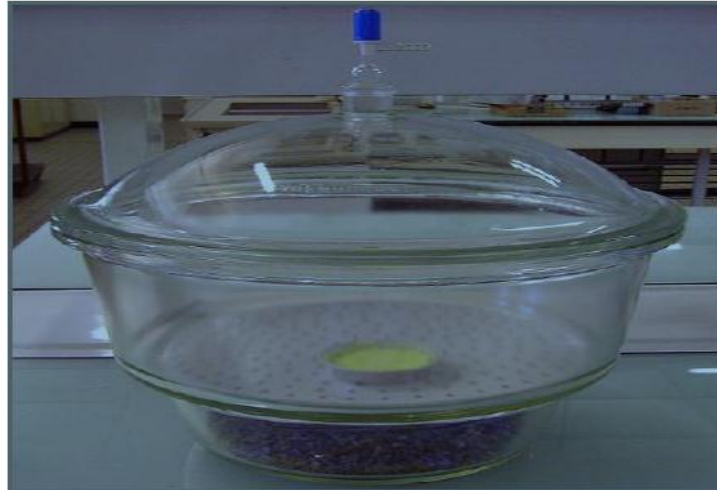




**Figure IV. 3.** Contamination des plaques superhydrophobes durant dix heures

A la fin de chaque essai les plaques superhydrophobes sont déposées directement sans nettoyage dans un dessiccateur. Ce dernier est un équipement utilisé afin de protéger des substances contre l'humidité. Il est constitué d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle; l'ensemble est en verre épais ou en polycarbonate. La liaison des deux parties peut être réalisée par un rodage en verre ou un joint torique en élastomère. Certains modèles sont

équipés d'une prise de vide avec robinet. Au préalable, une quantité suffisante de dessiccant (tel le gel de silice ou encore le silicagel) souvent bleu (présence d'indicateur coloré) est déposée au fond de l'appareil. Lorsque le dessiccant change de couleur (virant souvent au rose), il faut le régénérer par étuvage. Le diamètre intérieur d'un dessiccateur varie généralement de 100 à 300 millimètres.



**Figure IV.4.** Dessiccateur

### **IV.3. Calcule l'angle de contact des gouttes d'eau**

#### **IV.3.1. Définition Image J**

Image J est un logiciel libre, qui fonctionne sur analyser des images c'est un outil très versatile pour effectuer des mesures physiques à partir d'images ou de vidéos. Ce logiciel est utilisé pour réalisé plusieurs mesures, à savoir :

- Imposer une échelle, mesurer des longueurs dans une image ;
- Mesurer un profil d'intensité lumineuse le long d'une ligne sur une image ;
- Augmenter un contraste d'une image ;
- Binariser une image, dans ce cas les couleurs de l'image seront transformées en noir et blanc ;
- Détecter un contour dans une image ;
- Analyse automatique de particules qui permet par exemple d'estimer une distribution de taille de grains sur un cliché ;
- Mesure de l'angle de contact d'une particule avec une surface quelconque.



### IV. 3. 2. Mesure de l'angle de contact des gouttes d'eau

Le volume des gouttes d'eau est mesuré à l'aide d'une micropipette, graduée de 5 à 100  $\mu\text{l}$  (Figure IV. 5). Le choix de la quantité d'eau à aspirer d'un b cher par la pipette est r gl e grâce à son compteur. Cette même quantité d'eau est d pos e sous forme d'une goutte d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation. Afin de mesurer l'angle de contact des gouttes déposées sur les surfaces superhydrophobes, nous avons utilisé le logiciel imageJ. Les photos pr sent es dans les figures IV. 6, 7, 8, et 9 montrent la mesure pour la petite, la moyenne et la grande goutte d'eau, ces gouttes ont été déposées sur les surfaces superhydrophobes à l'aide d'une micropipette illustr e dans la figure IV. 5.



Figure IV.5. Micropipette

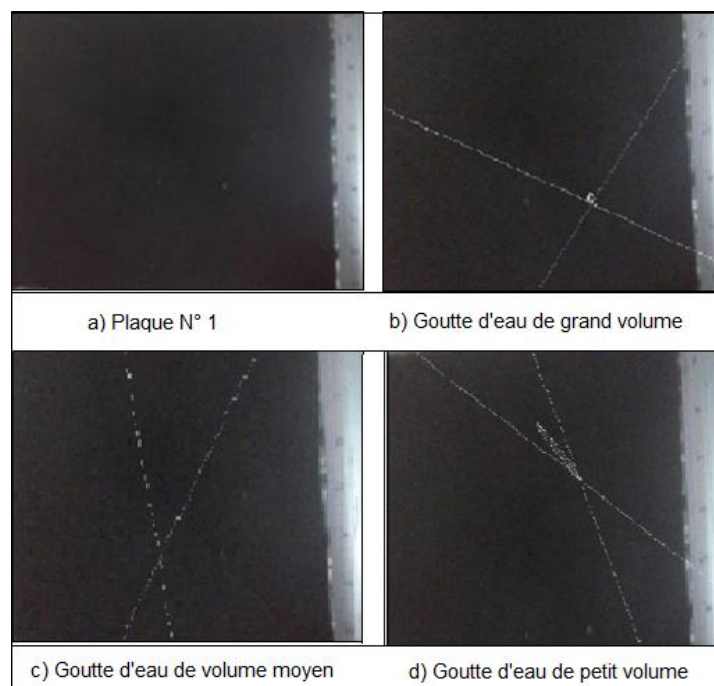
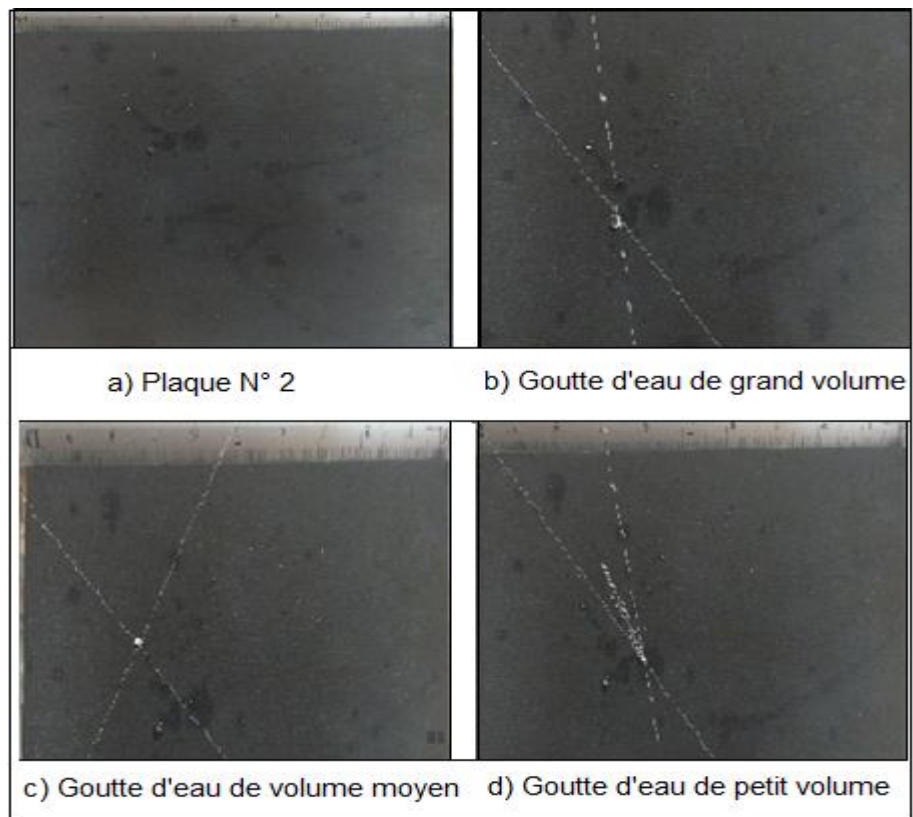
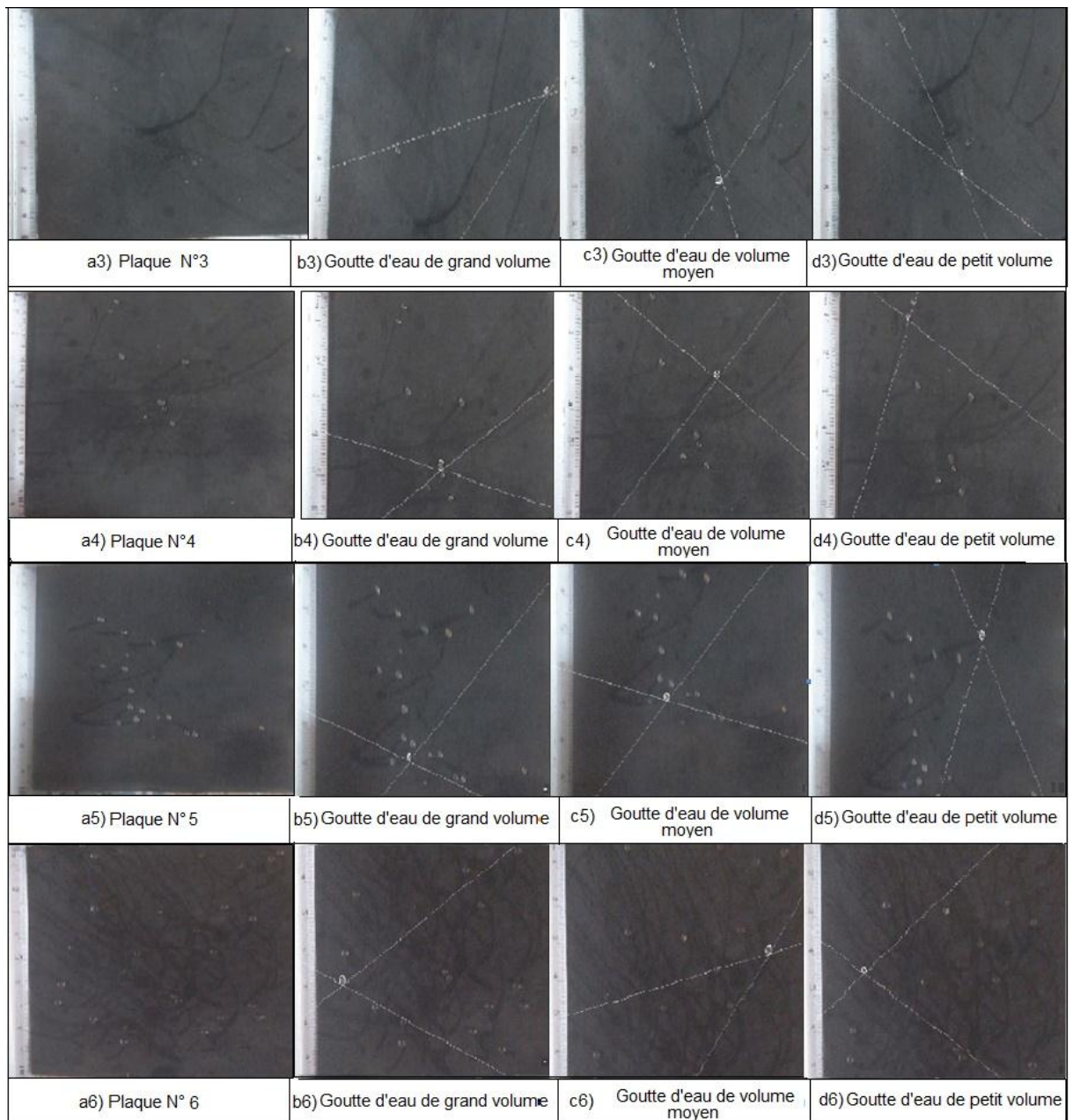


Figure IV.6. Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur la 1<sup> re</sup> plaque

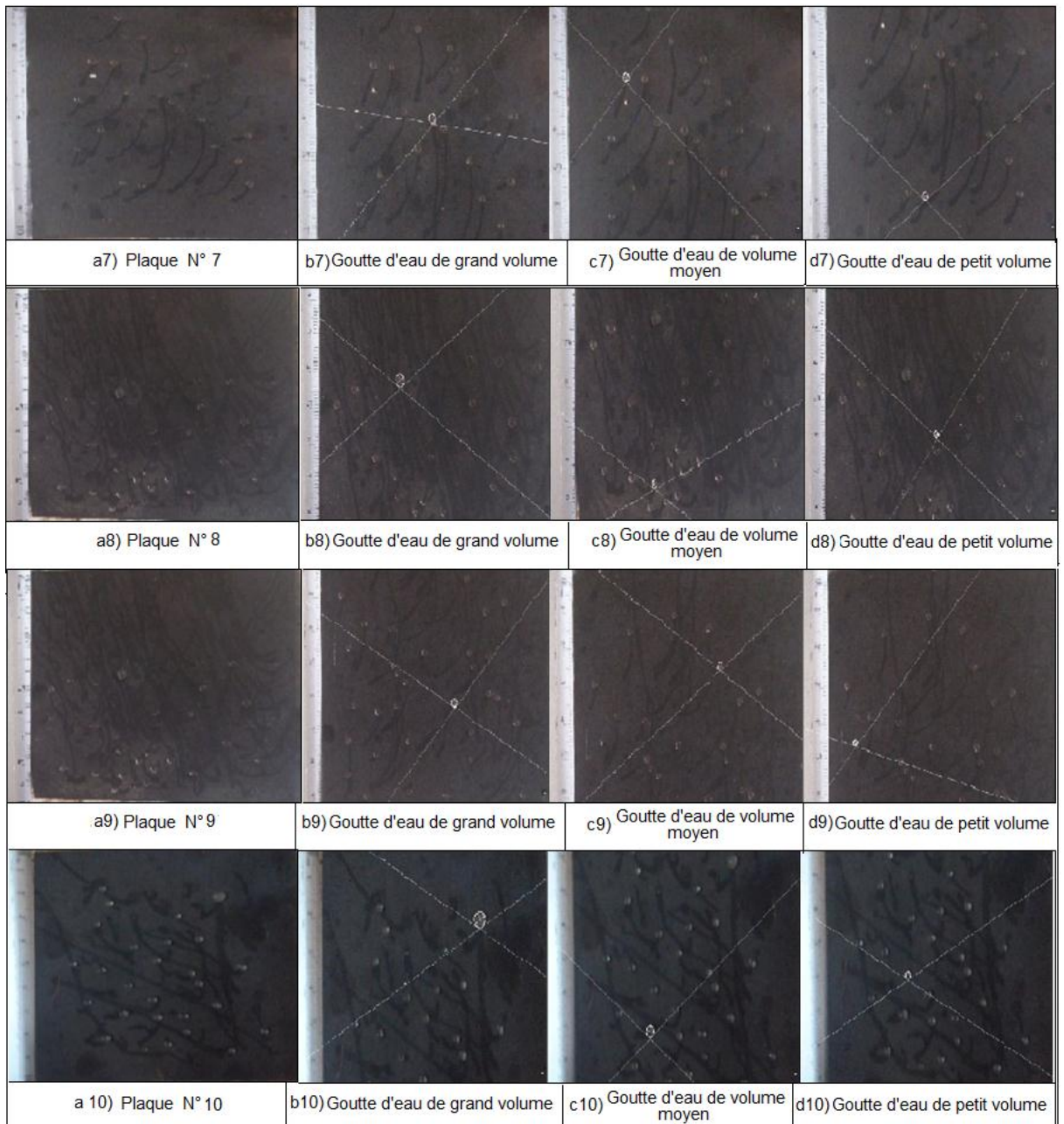
Les résultats de mesure de l'angle de contact des gouttes de volume différents sont présentés dans les tableaux IV.1, 2, et 3.



**Figure IV.7.** Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur la 2<sup>ème</sup> plaque



**Figure IV.8.** Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur les plaques 3, 4, 5 et 6



**Figure IV.9.** Mesure de l'angle de contact des gouttes déposées sur les plaques 7, 8, 9 et 10

### IV. 3. 2. 1. Goutte d'eau avec un grand volume

La mesure de cet angle à été effectuée à l'aide de l'équation mathématique suivante :

$$\Theta = 180 - (\text{Thêta Gauche} + \text{Thêta Right}) \quad (\text{IV. 1})$$



Le tableau suivant résume les résultats obtenus par le logiciel pour les dix plaques, il en résulte un angle de contact de la goutte d'eau de grand volume avec la surface superhydrophobe variable (entre 114.2 ° et 144 °), nous remarquons que ces surfaces perdent leur caractéristique de superhydrophobie après la contamination de celles-ci avec la présence de grain de sable et des gouttes d'eau de grand volume, elles deviennent des surfaces hydrophobe et les gouttes d'eau s'accrochent sur ses surfaces.

**Tableau IV. 1 :** Dimension de la grande goutte d'eau sur la surface des plaques isolantes

N de plaque	Angle (°)	Long- Ueur (cm)	Thêta C(°)	Incert itude	Thêta Gauch e (°)	Thêta Right (°)	Thêta E (°)	Rayon (cm)	Cercle St Dev	Ellipse St Dev	E	Poin - ts	Vol- Ume (µl)
P1(G)	180	23.53 72045 92	33.50 00000 00	8.200 0000 00	29.900 00000 0	35.900 00000 0	32.900 00000 0	21.400 00000 0	0.7805 72777	1.2197 59979	0.84000 0000	105	803.9 50000 000
P2(G)	180	18.35 75597 51	156.8 00000 000	1.900 0000 00	19.100 00000 0	20.100 00000 0	71.500 00000 0	22.140 00000 0	0.6033 29563	1.0392 21565	0.87000 0000	105	45264 .9500 00000
P3(G)	180	11.18 03398 87	17.30 00000 00	12	19.000 00000	17.000 00000	107	18.110 00000 0	0.4569 17010	1.2356 59012	0.85000 0000	105	37.32 00000 00
P4(G)	180	17.11 72427 69	18.20 00000 00	10.20 0000 000	18.300 00000 0	19.600 00000 0	19	27.610 00000 0	0.6301 72634	1.3691 09172	0.89000 0000	105	162.5 60000 000
P5(G)	180	18.24 82875 91	23.50 00000 00	7.100 0000 00	26.100 00000 0	28.500 00000 0	27.300 00000 0	22.770 00000 0	0.4795 65301	0.8703 29952	0.87000 0000	105	248.7 10000 000
P6(G)	180	23.08 67927 61	25.40 00000 00	9.700 0000 00	22.100 00000 0	24.900 00000 0	23.500 00000 0	26.040 00000 0	0.8160 23870	1.2850 64628	0.86000 0000	105	500.8 70000 000
P7(G)	180	22.80 35085 02	22.20 00000 00	6.900 0000 00	21.400 00000 0	22.900 00000 0	22.200 00000 0	30.400 00000 0	0.5825 04885	2.0773 13178	0.91000 0000	105	469.0 10000 000
P8(G)	180	35	27.90 00000 00	3.800 0000 00	28.900 00000 0	31.100 00000 0	30	38.470 00000 0	0.5245 11039	0.6570 29205	0.92000 0000	105	2320. 98000 0000
P9(G)	180	27.16 61554 14	33.60 00000 00	2.500 0000 00	33.400 00000 0	34.600 00000 0	34	25.480 00000 0	0.2787 72422	1.5203 59872	0.97000 0000	105	1377. 47000 0000
P10(G) )	180	41.01 21933 09	27.60 00000 00	5	25	23.300 00000 0	24.200 00000 00	44.560 00000 0	0.7956 95282	2.4204 55093	0.90000 0000	105	3446. 88000 0000

$$P1(G) = 180 - (29.900000000 + 35.900000000) = 114.2$$

$$P2(G) = 180 - (19.100000000 + 20.100000000) = 140^\circ$$

$$P3(G) = 180 - (19.000000000 + 17.000000000) = 144^\circ$$

$$P4(G) = 180 - (18.300000000 + 19.600000000) = 142.1^\circ$$

$$P5(G) = 180 - (26.100000000 + 28.500000000) = 125.4^\circ$$

$$P6(G) = 180 - (22.100000000 + 24.900000000) = 133^\circ$$

$$P7(G) = 180 - (21.400000000 + 22.900000000) = 135.7^\circ$$

$$P8(G) = 180 - (28.900000000 + 31.100000000) = 120^\circ$$

$$P9 (G) = 180 - (33.400000000 + 34.600000000) = 112^\circ$$

$$P10 (G) = 180 - (25 + 23.300000000) = 131.7^\circ$$

**IV. 3. 2. 2. Goutte d'eau avec un moyen volume :**

Dans le tableau ci-dessous sont illustrées les résultats de mesure de l'angle de contact des perles d'eau de moyen volume déposées sur les surfaces de nos dix échantillons, il est à signaler la diminution de la valeur des angles de contact de ces gouttes, ils sont moins de 150°, ce qui signifie que la nature de ces surfaces se change et elle devient hydrophobe.

**Tableau IV. 2 :** Dimension d'une moyenne goutte d'eau sur la surface des plaque isolantes

N de Plaque	Angle (°)	Long- Ueur (cm)	Thêta C (°)	Incert- itude	Thêta Gauch e (°)	Thêta Right (°)	Thêta E (°)	Rayon (cm)	Cercle St Dev	Ellip- se St Dev	E	Po- ints	Vol- ume (µl)
P1(M)	180	46388 8256. 39108 8300	61.30 00000 00	60.50 00000 00	42.50 00000 00	6.500 00000 0	64.50 00000 00	23185 3693. 41000 0000	13798 6677. 32142 4200	1.775 16405 4	0.44 0000 000	105	1.106 E25
P2(M)	180	11	29.10 00000 00	18.60 00000 00	37.40 00000 00	3.500 00000 0	45.40 00000 00	10.30 00000 00	0.724 64474 4	0.608 62117 5	0.64 0000 000	105	52.07 00000 00
P3(M)	180	16.27 88205 96	23.20 00000 00	10.50 00000 00	15.10 00000 00	33.90 00000 00	124.5 00000 000	20.38 00000 00	0.627 41229 6	1.240 14524 6	0.77 0000 000	105	168.3 40000 000
P4(M)	180	32.24 90309 93	32.24 90309 93	39.60 00000 00	5.600 00000 0	36.50 00000 00	33.10 00000 00	34.80 00000 00	24.70 00000 00	0.743 00531 7	1.41 7095 385	105	2303. 07000 0000
P5(M)	180	18.43 90889 15	24.40 00000 00	13.60 00000 00	23.30 00000 00	27.60 00000 00	25.50 00000 00	22.63 00000 00	0.952 49101 2	2.137 10128 0	0.81 0000 000	105	281.8 60000 000
P6(M)	180	20.59 12602 82	26.10 00000 00	10	19.30 00000 00	17.40 00000 00	107.8 00000 000	23.90 00000 00	0.800 82495 2	2.384 22737 1	0.80 0000 000	105	431.1 80000 000
P7(M)	180	27.01 85121 72	33.40 00000 00	4.900 00000 0	6.800 00000 0	40.60 00000 00	38.70 00000 00	24.55 00000 00	0.530 20628 0	0.879 26217 5	0.87 0000 000	105	1191. 97000 0000
P8(M)	180	16.03 12195 42	19.10 00000 00	9.800 00000 0	22.20 00000 00	23	22.60 00000 00	24.95 00000 00	0.575 03949 0	1.561 96841 4	0.86 0000 000	105	144.5 50000 000
P9(M)	180	19.02 62975 90	27.10 00000 00	5.600 00000 0	30.20 00000 00	28	29.10 00000 00	20.77 00000 00	0.406 38435 7	1.279 70556 9	0.91 0000 000	105	324.8 40000 000
P10(M)	180	36.01 38862 11	31.40 00000 00	5.400 00000 0	35.50 00000 00	34	34.80 00000 00	34.55 00000 00	0.772 43155 3	2.340 81285 9	0.91 0000 000	105	2641. 19000 0000

$$P1 (M) = 180 - (42.500000000 + 6.500000000) = 131^\circ$$

$$P2 (M) = 180 - (37.400000000 + 3.500000000) = 139.1^\circ$$

$$P3 (M) = 180 - (15.100000000 + 33.900000000) = 131.1^\circ$$

$$P4 (M) = 180 - (5.600000000 + 36.500000000) = 137.9^\circ$$

$$P5 (M) = 180 - (23.300000000 + 27.600000000) = 129.1^\circ$$

$$P6 (M) = 180 - (19.300000000 + 17.400000000) = 142.8^\circ$$

$$P7 (M) = 180 - (6.800000000 + 40.600000000) = 132.6^\circ$$

$$P8 (M) = 180 - (22.200000000 + 23) = 134.8^\circ$$

$$P9 (M) = 180 - (30.200000000 + 28) = 121.8^\circ$$

$$P10 (M) = 180 - (35.500000000 + 34) = 110.5^\circ$$

**IV. 3. 2. 3. Goutte d'eau avec un petit volume :**

D'après les résultats obtenus dans le tableau suivant, il est à signaler que nos échantillons peuvent garder leur pouvoir d'isolement malgré la présence de la pollution (grain de sable et petit volume de goutte d'eau), puisque l'angle de contact de ces perles d'eau est plus de 150°, ce qui veut dire que les surfaces sont superhydrophobe. De plus, durant les essais nous avons constaté que ces gouttes bougent rapidement en dehors de l'isolation, c'est vraiment difficile de les garder sur ces surfaces.

**Tableau IV. 3 :** Dimension de la petite goutte d'eau sur la surface des plaque isolantes

$$P1 (P) = 180 - (4.500000000 + 10.700000000) = 164.8^\circ$$

$$P2 (P) = 180 - (6.300000000 + 9) = 164.7^\circ$$

$$P3 (P) = 180 - (16 + 5.400000000) = 158.6^\circ$$

N de plaque	Angle (°)	Long- Ueur (cm)	Thêta C (°)	Incert - itude	Thêta Gauc he (°)	Thêta Right (°)	Thêta E (°)	Rayo n (cm)	Cercl eSt Dev	Ellip- seSt Dev	E	Po- ints	Vol- ume (µl)
P1(P)	180	8.246 21125 1	62.20 00000 00	10.80 00000 00	4.500 00000 0	10.70 00000 00	73.10 00000 00	4.680 00000 0	0.443 12863 0	0.854 17500 2	0.070 00000 0	104	75.22 00000 00
P2(P)	180	6.082 76253 0	49.50 00000 00	39.70 00000 00	6.300 00000 0	9	74.20 00000 00	3.620 00000 0	0.985 73107 7	0.845 03118 4	0.060 00000 0	105	16.23 00000 00
P3(P)	180	13.45 36240 47	35.20 00000 00	20.50 00000 00	16	5.400 00000 0	105.7 00000 000	11.55 00000 00	1.108 30588 3	0.989 67495 1	0.770 00000 0	203	152.5 00000 000
P4(P)	180	21.18 96201 00	41	5.500 00000 0	4.600 00000 0	8.300 00000 0	46	15.29 00000 00	0.465 91394 8	1.234 22682 5	0.860 00000 0	105	617.4 20000 000
P5(P)	180	29.06 88837 07	38.80 00000 00	7.500 00000 0	6.200 00000 0	6.800 00000 0	60.50 00000 00	23.17 00000 00	0.911 98356 6	1.350 27929 0	0.660 00000 0	105	1763. 59000 0000
P6(P)	180	17	25.20 00000 00	11.80 00000 00	6.100 00000 0	3.800 00000 0	29	18.80 00000 00	0.711 87773 7	0.918 88707 7	0.800 00000 0	104	184.2 80000 000
P7(P)	180	26.01 92236 63	35.30 00000 00	4.700 00000 0	10.50 00000 00	3.600 00000 0	31.60 00000 00	22.70 00000 00	0.504 66680 2	0.770 03273 6	0.920 00000 0	105	1169. 85000 0000
P8(P)	180	20.09 97512 42	30.30 00000 00	6.600 00000 0	8.500 00000 0	10.80 00000 00	40.20 00000 00	19.82 00000 00	0.513 95625 3	1.615 87010 1	0.810 00000 0	105	435.7 30000 000
P9(P)	180	14.56 02197 79	23.60 00000 00	14	20.10 00000 00	5.700 00000 0	26.90 00000 00	18.29 00000 00	0.767 05571 7	1.910 69085 7	0.850 00000 0	105	131.0 40000 000
P10(P )	180	25	29.90 00000 00	7.200 00000 0	10.00 00000 0	13.00 00000 0	24.70 00000 00	25.37 00000 00	0.714 63321 3	1.953 79284 0	0.880 00000 0	105	866.7 10000 000

$$P4 (P) = 180 - (4.600000000 + 8.300000000) = 167.1^\circ$$

$$P5 (P) = 180 - (6.200000000 + 6.800000000) = 167^\circ$$

$$P6 (P) = 180 - (6.100000000 + 3.800000000) = 170.1^\circ$$

$$P7 (P) = 180 - (10.500000000 + 2.600000000) = 166.9^\circ$$

$$P8 (P) = 180 - (8.500000000 + 10.800000000) = 160.7^\circ$$

$$P9 (P) = 180 - (19.100000000 + 5.700000000) = 155.3^\circ$$

$$P10 (P) = 180 - (10.000000000 + 13.000000000) = 157^\circ$$

## **IV. 4. Simulation de la performance de la plaque superhydrophobe**

### **IV. 4. 1. Comsol Multiphysics**

COMSOL Multiphysics est un logiciel avancé pour la modélisation et la simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Celui-ci est utilisé pour simuler plusieurs applications dans les divers domaines (biomédicale, aérospatial et industriel), spécialement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. Afin de simuler un modèle, il faut commencer par la définition du modèle (Model wizard, Blank Model), puis les dimensions d'espace (1D symétrique, 1D, 2D symétrique, 2D ou bien 3D). Après la définition des couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation. Après ces étapes nous pouvons dessiner notre géométrie. Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro-différentiels (EAD) sont également possibles [74].

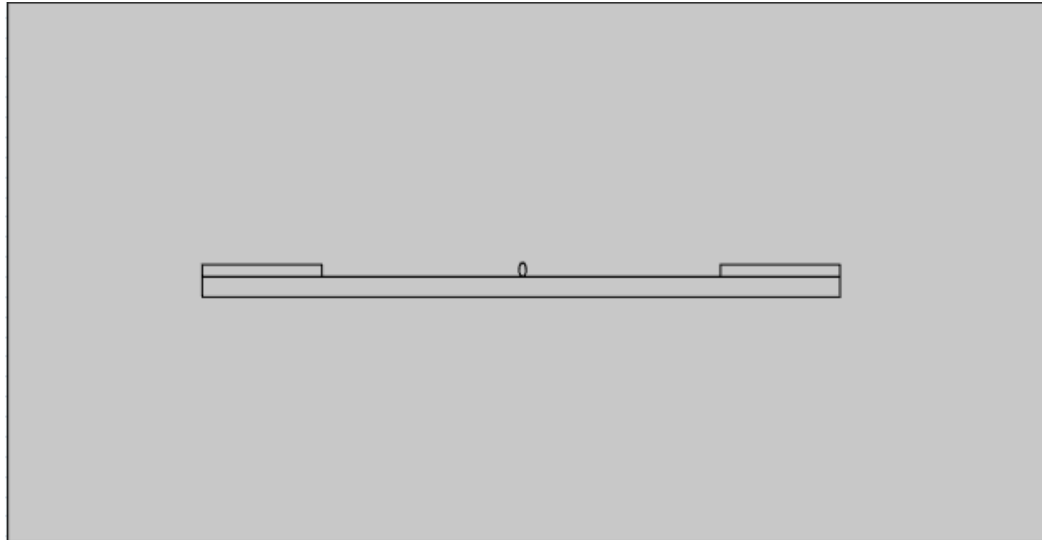
### **IV. 4. 2. Procédure de simulation**

Dans le but d'étudier l'influence de la présence des gouttes d'eau sur la distribution du champ et du potentiel électrique, nous avons construit un modèle plat composé d'une surface diélectrique superhydrophobe de forme carrée de 10 cm de dimensions, celle-ci est délimitée par deux électrodes en cuivre planes de dimensions 10 cm × 3 cm × 0.3 cm respectivement de longueur, largeur et épaisseur. La région de l'air entourant l'isolation a été spécifiée avec une très faible conductivité,  $\sigma = 1,0 \times 10^{-15}$  S/m. Les propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de notre modèle sont résumées dans le tableau suivant. La ligne de fuite entre les



deux électrodes est de l'ordre de 10 cm. Le modèle de simulation est basé sur la méthode des éléments finis (MEF), il est réalisé sous Comsol Multiphysics. Les paramètres d'influence examinés sont :

- La présence des gouttes d'eau
- Le volume des gouttes d'eau
- Le nombre des gouttes d'eau



**Figure IV.10 :** Modèle réalisé sous Comsole

**Tableau IV. 4 :** Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de l'isolation Superhydrophobe

<b>Matériaux</b>	<b>Permittivité relative <math>\epsilon_r</math></b>	<b>Conductivité <math>\sigma</math></b>
<b>Verre</b>	5.5	$10^{-14}$ (S/cm)
<b>Couche superhydrophobe</b>	2.8	$10^{-12}$ (S/cm)
<b>Electrode en Cuivre</b>	1	$5,9 \cdot 10^7$ (S/m)
<b>Gouttes d'eau</b>	81	$180 \cdot 10^{-6}$ (S/cm)
<b>Air</b>	1	$10^{-15}$ (S/cm)

Pour toutes les simulations, la tension appliquée aux bornes de l'isolation est de l'ordre de 50 kV. Dans ce modèle, nous avons une électrode sous tension, et la deuxième électrode et la zone entourant le modèle sont soumis au potentiel nul (0 V). De plus, l'espace

d'air est suffisamment grand afin d'éliminer l'effet sur la distribution du potentiel à proximité des électrodes.

Avant de passer à la phase d'étude, le problème de domaine entier est discrétisé en éléments finis de type tétraèdre pendant le processus de maillage. Le raffinement du maillage est effectuée afin d'améliorer la précision des résultats de simulation calculés, (Figure IV. 10 ) est effectué dans la région d'intérêt pour augmenter le nombre d'éléments de maillage le long de la surface de l'isolant et ainsi améliorer la précision de la solution. Le choix du nombre d'éléments est important et doit être équilibré, le nombre d'éléments de maillage peut réduire la précision des résultats de simulation, tandis qu'un grand nombre d'éléments augmente la taille du problème et entraîne un temps de traitement plus long. Ainsi, il est important de trouver un optimum d'éléments qui facilitera un temps de calcul plus rapide sans compromettre la précision du résultat.

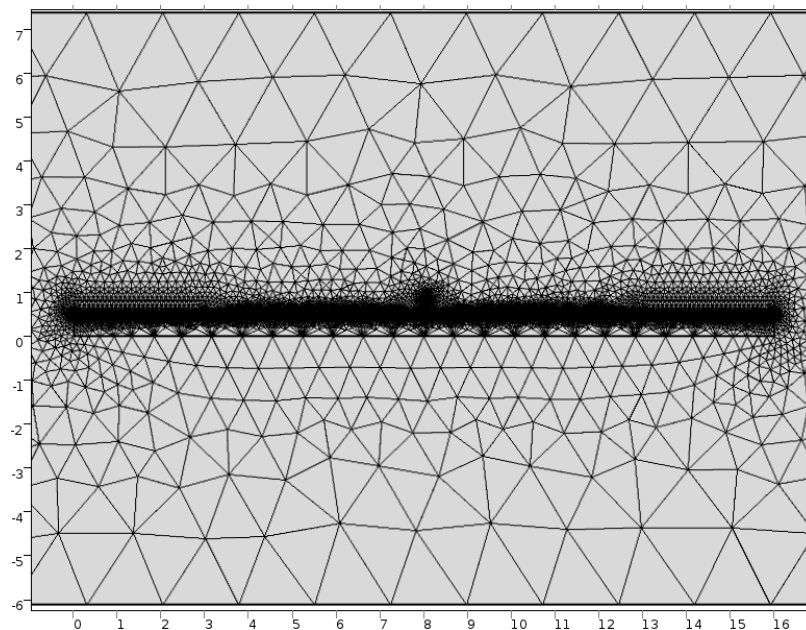


Figure IV. 11. Maillage du modèle

### IV.4. 3. Résultats et discussions :

#### IV.4. 3. 1. Volume de gouttes d'eau :

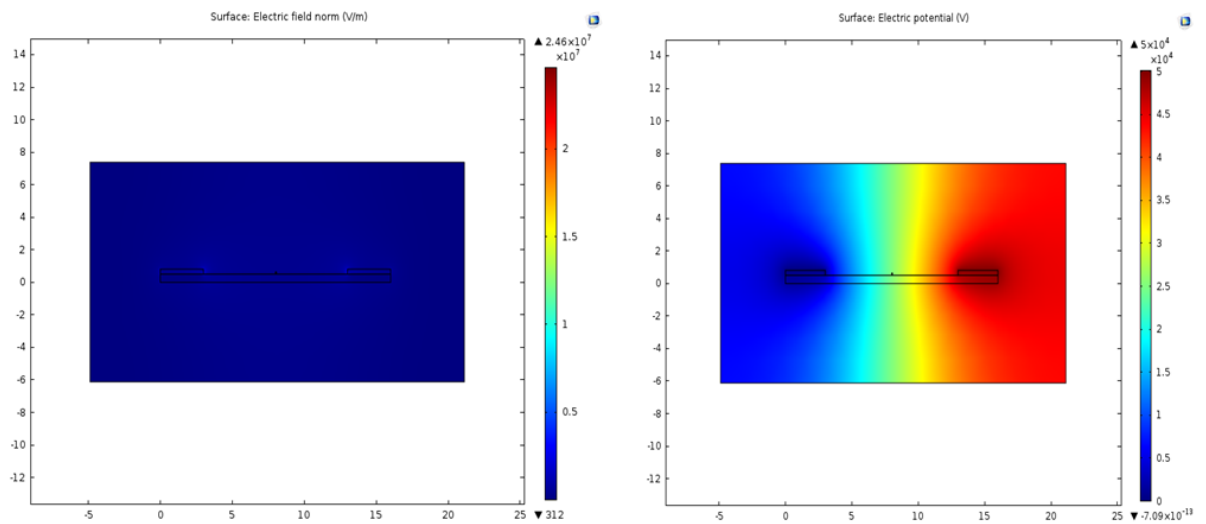
Dans cette simulation, nous nous intéressons à l'étude de l'effet de la variation du volume de gouttes d'eau conductrices sur la distribution du champ et du potentiel électrique, le long de la ligne de fuite de l'isolation superhydrophobe. La conductivité volumique de ces gouttes est fixée à  $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Nous avons analysé quatre volumes différents : 2, 5, 40 et 100

$\mu\text{l}$ , la forme des gouttes est toujours circulaire, les diamètres des gouttes d'eau sont cités dans le tableau suivant :

**Tableau IV. 3** : Diamètre des gouttes en fonction de leur volume [75]

Volume de la goutte d'eau ( $\mu\text{l}$ )	2	5	40	100
Diamètre (mm)	0,7	1,75	4,25	6,28

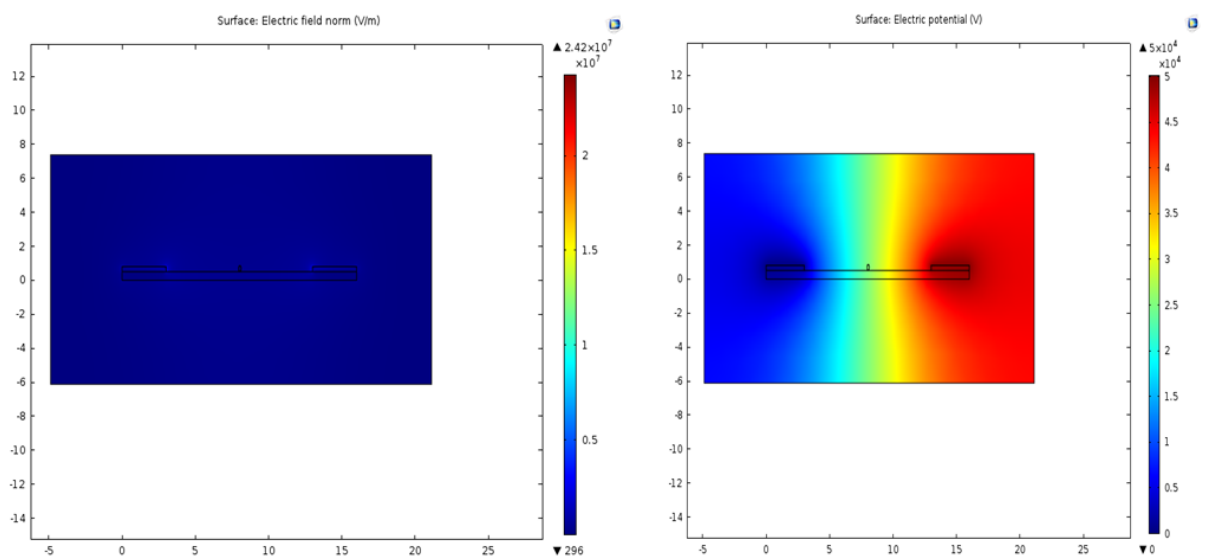
Les figures (IV. 11, 12, 13, 14) présentent les distributions du champ et du potentiel électriques pour chaque volume. D'après ces résultats, nous constatons que plus le volume de la goutte d'eau est grande plus la distribution du champ électrique alentour de la goutte est clair et elle est de l'ordre de  $0,5 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$ . Cela peut être expliqué par la présence des décharges électrique à l'extrémité de la goutte d'eau. De plus, il en résulte des lignes de champs très intense au niveau des deux électrodes HT et terre, la valeur de ce champs est égale à  $1 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$ , puisque c'est le point de naissance des décharges électriques positives et négatives. Concernant la distribution du potentiel électrique, nous remarquons qu'elle est concentrée au niveau de l'électrode sous tension, mais au fur et à mesure que nous éloignons vers l'électrode terre, la tension se diminue jusqu'à zéro à proximité de l'électrode terre. Au niveau de la goutte, la tension est de l'ordre de  $2,5 \times 10^4 \text{ V}$  indépendamment du volume du goutte (Figures IV 11b, 12b, 13b, 14b). Par contre, nous obtenons un champ électrique plus faible à l'intérieur de la goutte d'eau, il est presque  $0,1 \times 10^7 \text{ V/cm}$ , dans ce cas la présence de la goutte influence la distribution du champ électrique et il peut provoquer la distorsion des lignes équipotentielle à proximité de cette goutte.



a) Distribution du champ électrique

b) Distribution du potentiel électrique

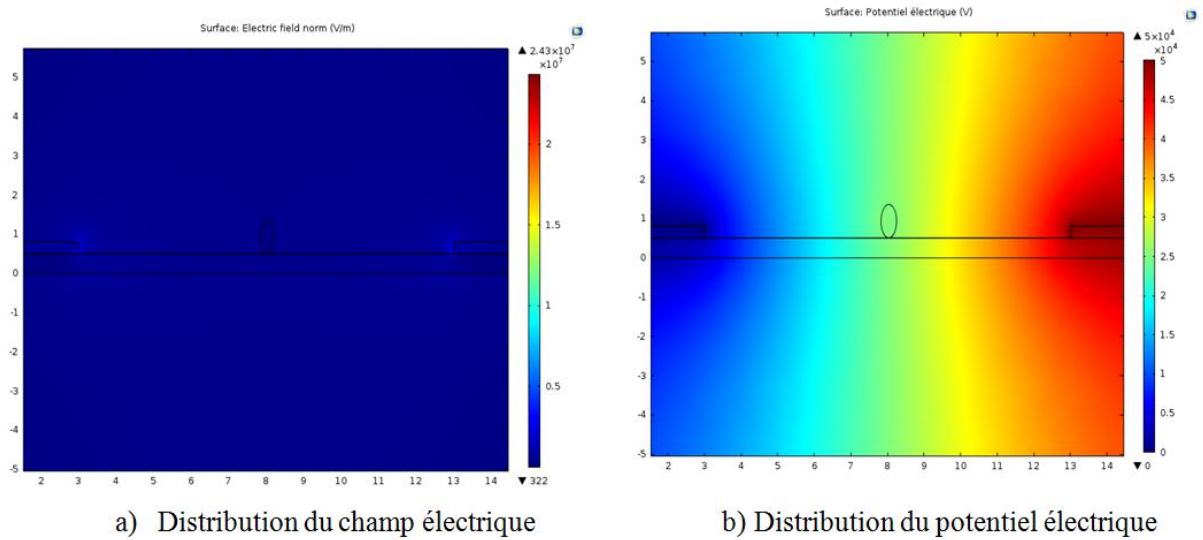
**Figure IV. 12.** Simulation d'une goutte d'eau de 2 µl de volume



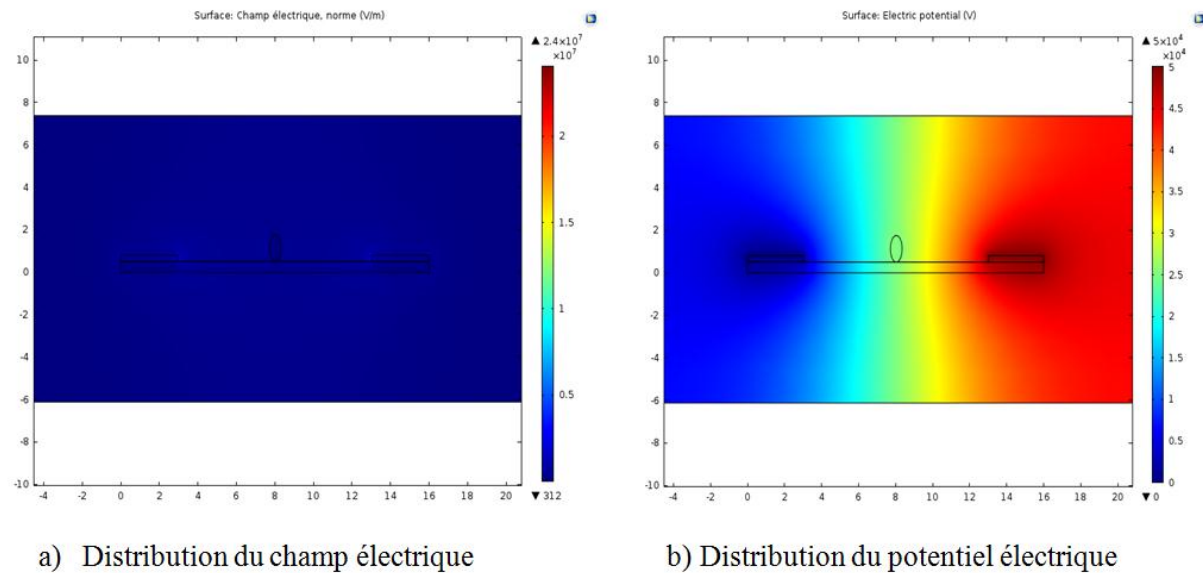
a) Distribution du champ électrique

b) Distribution du potentiel électrique

**Figure IV. 13.** Simulation d'une goutte d'eau de 5 µl de volume



**Figure IV. 14.** Simulation d'une goutte d'eau de 40 µl de volume

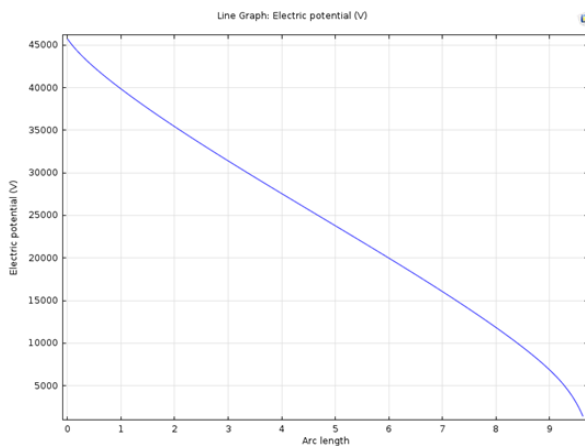


**Figure IV. 15.** Simulation d'une goutte d'eau de 100 µl de volume

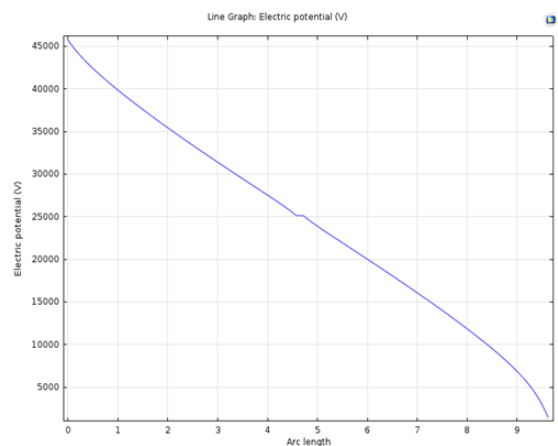
Les images présentées dans la figure IV. 15 donnent l'évolution du potentiel sur l'isolation superhydrophobe en fonction du volume de la goutte d'eau à conductivité électrique constante. Il en résulte une allure similaire des quatre courbes indépendamment du volume des gouttes d'eau. Il en découle une diminution de la caractéristique du potentiel jusqu'à une valeur limite à partir de laquelle, nous obtenons une constance de celui-ci, puis elle continue à se décroître jusqu'à son annulation au voisinage de l'électrode terre. Cette constance est expliquée par le fait que le potentiel est toujours nulle à l'intérieur de la goutte d'eau quel que ce soit son volume. Cependant, plus le volume de la goutte est grand, plus la constance est grande, à cause de la distance de fuite occupée par cette goutte. Cet effet est

négligeable pour un volume de goutte de 2  $\mu\text{l}$ , du fait de son petit diamètre, elle est considérée comme inexistante. De plus, la valeur de ce potentiel n'est pas influencée par le volume de la goutte, il est de l'ordre de 25000 V dans tous les cas. Dans ce cas, nous pouvons dire que la décharge électrique passe par l'extrémité de la goutte d'eau et elle ne peut pas passer à l'intérieure de celle-ci.

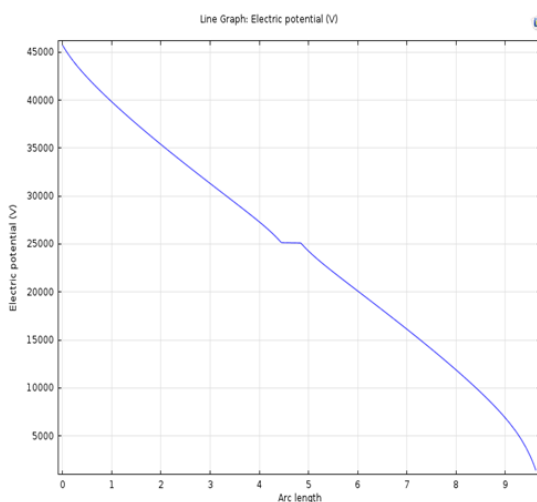
Les photographies illustrées dans la figure IV. 16. montrent les allures du champ électrique d'une surface superhydrophobe avec une seule goutte d'eau de différents volumes, située à une distance de 5 cm de la ligne de fuite. Comme nous avons cité auparavant, le champ électrique est très intense au voisinage des électrodes et à proximité de la goutte d'eau. Egalement, la valeur de ce champ est nulle à l'intérieur de la goutte d'eau.



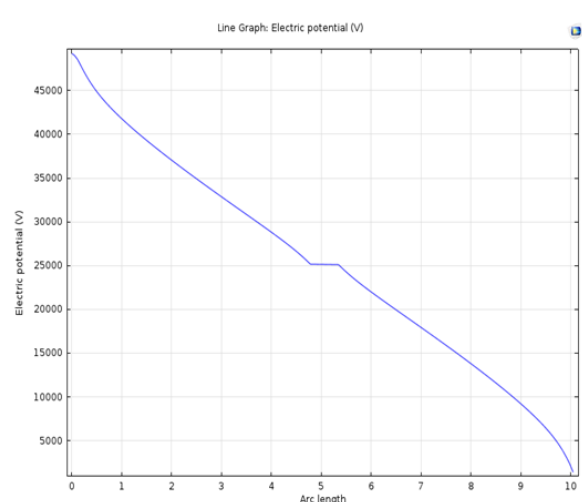
a) Volume de 2 $\mu\text{l}$



b) Volume de 5 $\mu\text{l}$

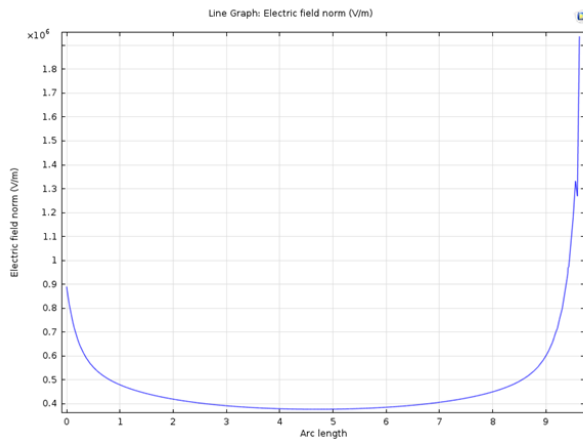
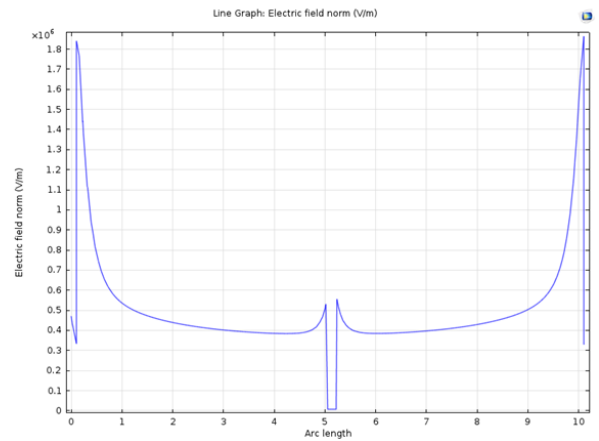
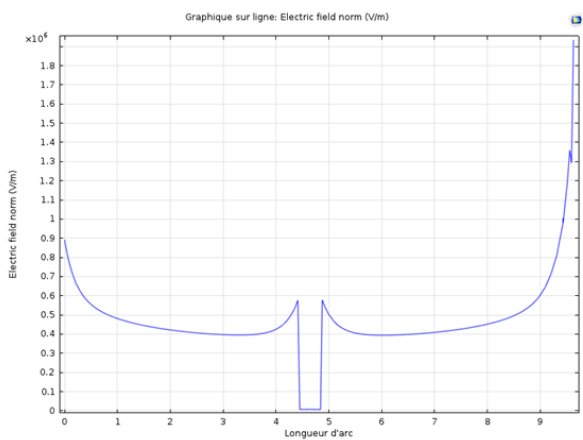
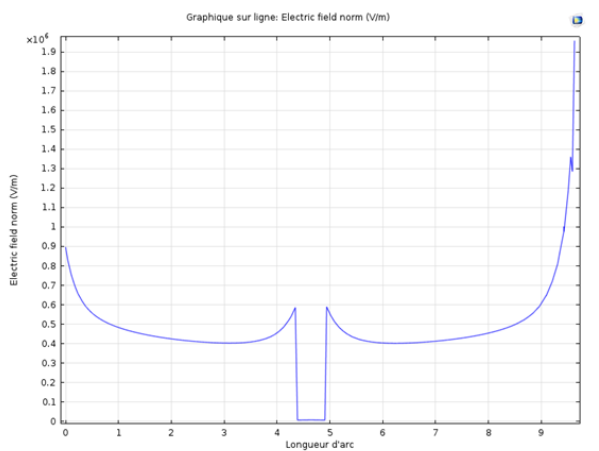


c) Volume de 40 $\mu\text{l}$



d) Volume de 100  $\mu\text{l}$

Figure IV. 16.  $U_{DC} = f(L_f)$  d'une surface superhydrophobe

a) Volume de 2 $\mu$ lb) Volume de 5 $\mu$ lc) Volume de 40 $\mu$ ld) Volume de 100 $\mu$ l

**Figure IV. 17.** Caractéristique du champ électrique d'une surface superhydrophobe avec une goutte d'eau

#### IV.4. 3. 2. Nombre de goutte :

Dans ce qui suit, nous avons examiné l'effet de l'ajout des gouttes d'eau sur la distribution du champ et du potentiel électrique. Nous avons présenté cinq gouttes d'eau de conductivité constante et du volume différents (Deux gouttes de 2  $\mu$ l, une goutte de 5  $\mu$ l, une goutte de 40  $\mu$ l et une goutte de 100  $\mu$ l), celles-ci sont positionnées en ligne droite sur la surface superhydrophobe.

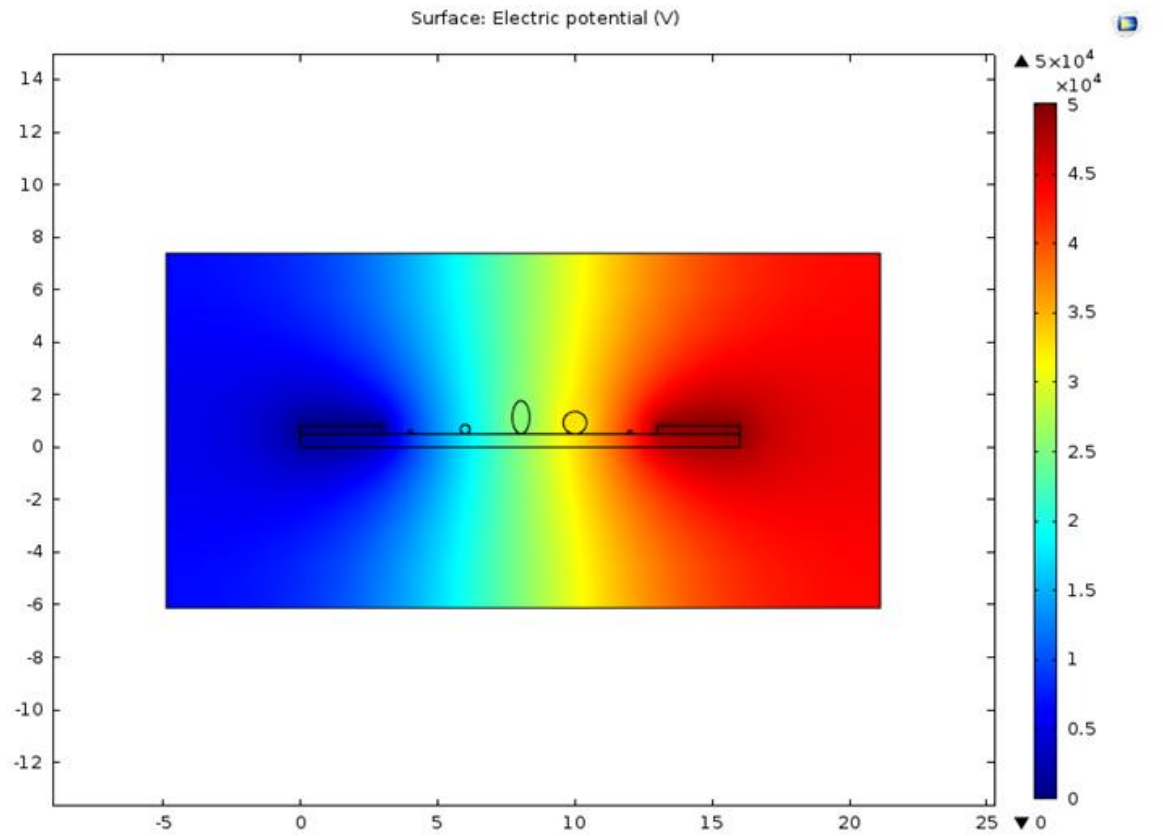


Figure IV. 18. Distribution du potentiel électrique sur la surface superhydrophobe

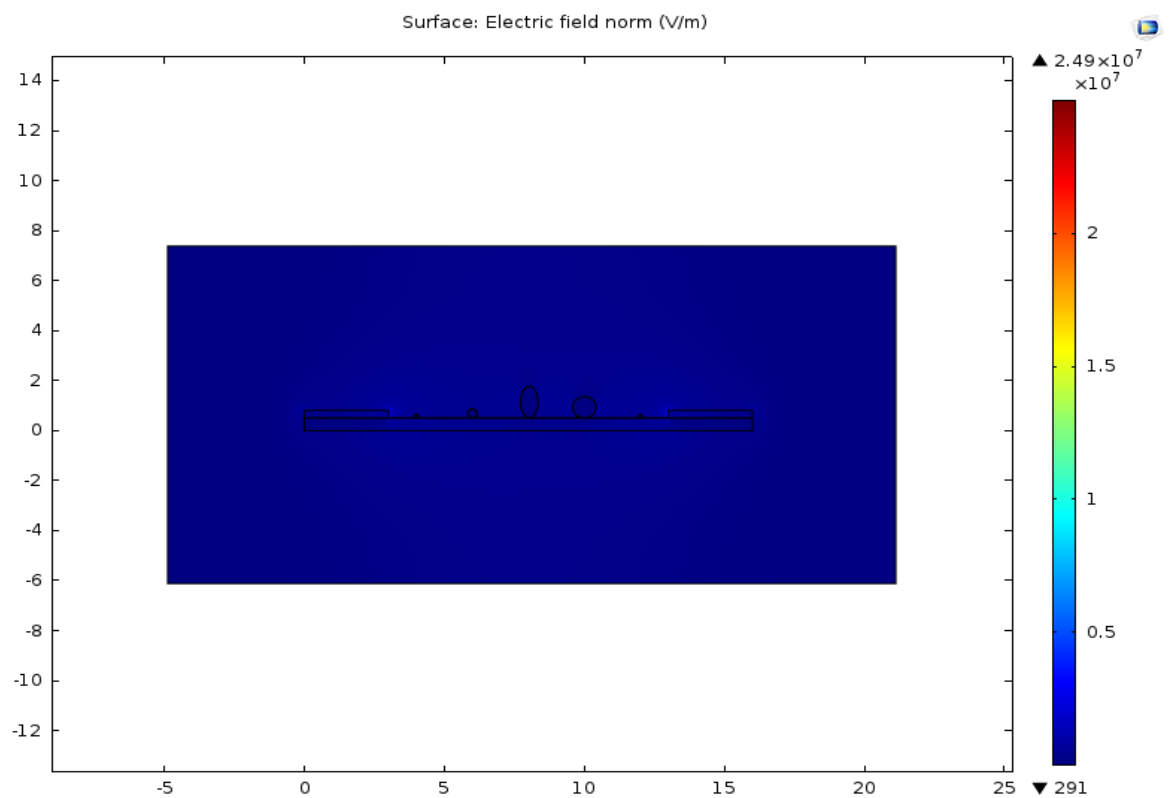
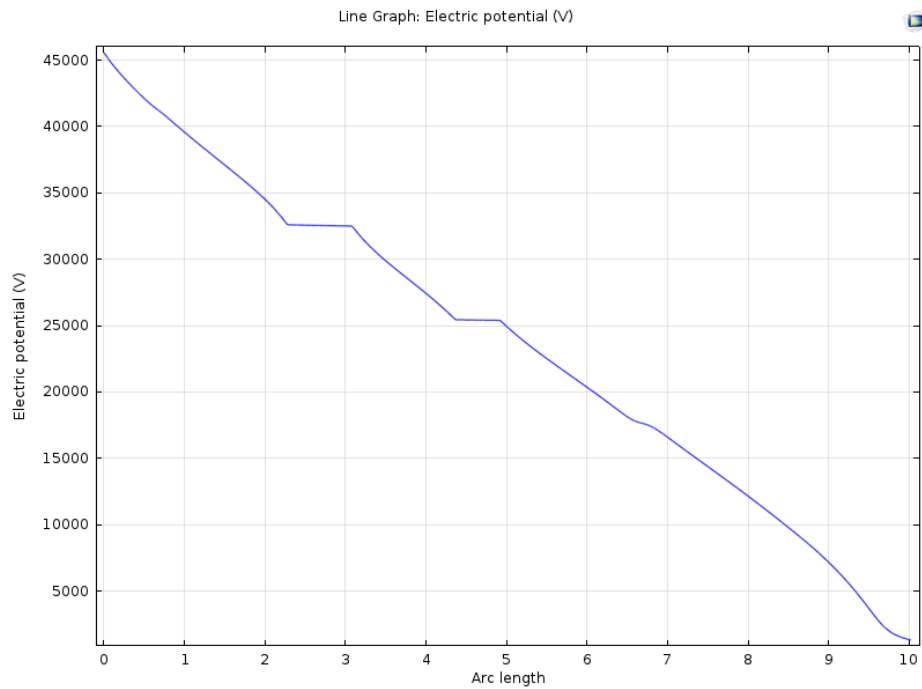
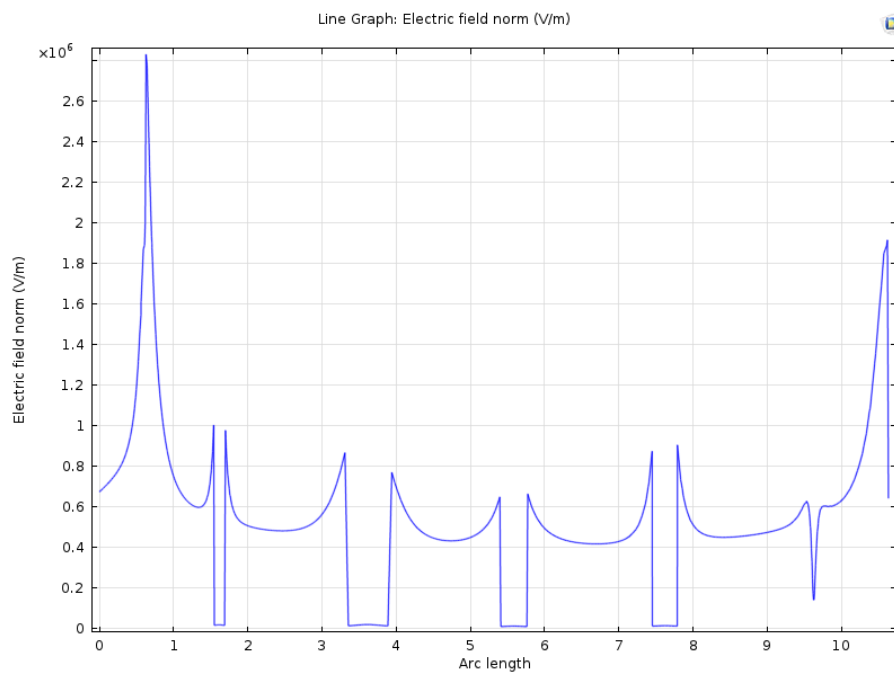


Figure IV. 19. Distribution du champ électrique sur la surface superhydrophobe





**Figure IV. 20.** Allure du potentiel électrique en fonction de la longueur de fuite



**Figure IV. 21.** Allure du champ électrique en fonction de la longueur de fuite

Il est à souligner que la concentration du potentiel est très élevée dans les gouttes près de l'électrode HT, ce qui a été déjà remarqué auparavant. Cela veut dire que le volume des gouttes et la distribution de celles-ci n'influent pas la distribution du potentiel électrique. D'après la figure IV.18 nous constatons que les lignes des champs électriques ne traversent pas les gouttes d'eau, par contre elles se concentrent sur les extrémités de celles-ci.

Il est à signaler également que la valeur maximale du champ électrique est élevée au niveau de la goutte située au voisinage de l'électrode terre et des deux autres de volume (40 et 5  $\mu\text{l}$ ). Cependant, la valeur la plus faible est obtenue au niveau de la goutte grand volume et de la goutte à côté de l'électrode HT.

#### **IV. 5. Conclusion**

Les résultats obtenus lors de notre étude expérimentale sur la performance d'une surface superhydrophobe recouverte de grain de sable et des gouttes d'eau de différents volumes sans et sous l'application d'un champ électrique, nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- La surface superhydrophobe garde ses caractéristiques d'isolement lorsqu'elle est contaminée par des grains de sable, ce qui n'est pas le cas avec la présence des gouttes d'eau de volume plus de 3  $\mu\text{l}$ .

- Plus le volume de la goutte d'eau est grand plus l'angle de contact de celle-ci avec la surface superhydrophobe est petit, donc la surface devient hydrophobe.

- La valeur maximale de la rigidité diélectrique longitudinale est obtenue en absence de gouttes d'eau sur la surface de l'isolation. A partir de ce point sa tension de contournement décroît avec l'augmentation du nombre de gouttes présent le long de la ligne de fuite.

- La distribution du potentiel électrique est influencée par le nombre des gouttes déposées sur la surface superhydrophobe.

- Les lignes des champs électriques sont concentrées au voisinage des gouttes d'eau et non à l'intérieure de celles-ci.

- Plus le volume de la goutte est grand, plus la constance du potentiel sur la ligne de fuite est grande.

- L'intensité du champ électrique est élevée pour le volume de goutte d'eau de plus de 5  $\mu\text{l}$ .



**Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Ces dernières années, un nombre important d'études a été consacré au développement des matériaux isolant utilisés dans la fabrication des isolateurs des lignes aériens. Dans ce contexte, de nombreuses recherches ont été proposées pour atteindre cet objectif. La fabrication des surfaces superhydrophobes stable et durable avec les meilleurs propriétés diélectriques est considérée comme étant la dernière technologie étudiée, ces méthodes nécessitent deux étapes essentiels : en premier lieu de rendre la surface rugueuse, puis de d'injecter des matériaux à faible énergie de surface. Ces méthodes sont généralement coûteuses, ce qui peut limiter leurs utilisations. Cependant, dans notre étude nous avons réussi à élaborer ce type de couche avec un prix moins chers et sans l'utilisation des installations coûteuses.

L'objectif principal de notre travail était l'étude de l'impact du dépôt de gouttes d'eau sur une surface superhydrophobe à base de silicone, ainsi que la distribution du champ électrique et du potentiel en fonction de certains paramètres géométriques et électriques. Les résultats essentiels de cette analyse peuvent être résumés comme suit:

- ❖ La rigidité diélectrique longitudinale optimale de l'isolation en superhydrophobe est obtenue en absence de gouttes d'eau.
- ❖ La rigidité diélectrique longitudinale d'une isolation recouverte de gouttes d'eau est toujours inférieure à celle obtenue sans ces gouttes seulement a présence des grains de sable.
- ❖ L'analyse de différents volumes des gouttes d'eau sur l'effet de la tension de contournement de la surface isolante superhydrophobe engendre la réduction de la performance de celle-ci.
- ❖ La distribution du potentiel électrique est influencée par le nombre des gouttes déposées sur la surface superhydrophobe.
- ❖ Les lignes des champs électriques sont concentrées au voisinage des gouttes d'eau et nulle à l'intérieure de celles-ci.
- ❖ Plus le volume de la goutte est grand, plus la constance du potentiel sur la ligne de fuite est grande.
- ❖ L'intensité du champ électrique est élevée pour le volume de goutte d'eau de plus de 5  $\mu\text{l}$ .
- ❖ Le volume de la goutte d'eau influence l'angle de contact de celle-ci avec la surface superhydrophobe.



**Les référence**

## Les référence

---

- [1] M.Slama “Experimental Characterization and Mathematical Modelling of Surface Flashover of Solid Insulator in Air”, the 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015.
- [2] F.Bouchelga , “Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante large et polluée sous tension continue”,thèse de doctorant ,université de Bejaia, 2016.
- [3] S. Gurbanski et R. Hartings, “Swedish Research on The Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.11, No.5, Septembre /Octobre1995.
- [4] M.A.R.M. Fernando , S. M. Gubanski, “Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces”, IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.6, No.5, Octobre1999.
- [5] N. M. Ijumba, A. C. Britten J. P. Swartz, “The Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulators Subjected to Water Droplet Corona under HVDC Potential”, IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, pp. 1884-1888,2002.
- [6] Y. Zhu, S. Yamashita, N. Anami, M. Otsulbo, C. Honda, and Y. Hashimoto, “Corona Discharge Phenomenon and Behavior of Water Droplets on the Surface of Polymer in the AC Electric Field”, IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5 Nagoya,2005.
- [7] K. Karakoulidis, M. G. Danikas, P. Rakitzis, “deterioration phenomena on polymeric insulating surfaces due to water droplets”, Journal of electrical engineering, Vol. 56, No. 7-8, 2005.
- [8] S. Thong-Om, W. Payakcho, J. Grasaesom, A. Oonsivilaiand B. Marungsri, “Comparison Ageing Deterioration of Silicone Rubber Outdoor Polymer Insulators in Artificial Accelerated Salt Fog Ageing Test”, World Academy of Science, Engineering and Technology 60, 2011.
- [9]J.Ndoumbe, " Etude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique ", Thèse de doctorant, Université de douala, 2014.

## Les référence

---

- [10] Yong Liu\*, Member, et al., "Dynamic Behavior of droplets and Flashover Characteristics for CFD and Experimental Analysis on SiR Composites", Digital Object Identifier 10, 2017.
- [11] A.B.D. Cassie, S. Baxter, "Les surfaces superhydrophobes", *Trans. Faraday Soc.*, 40, 546, 1944.
- [12] Shibuichi, S., Onda, T., Satoh, N. & Tsujii, "Super water-repellent surfaces resulting from fractal surfaces", *J. Phys. Chem*, 100, 19512–19517, 1996.
- [13] Onda et al., "Super water-Repellent Surface Resulting from Fractal Structure", *Langmuir*, 12, 2125, 1996.
- [14] D. Richard et al., "Contact time of a bouncing drop", *Nature*, 417, 811, 2002.
- [15] A. Lafuma, D. Quere, "Superhydrophobic states", *Nature Materials*, 2, 457-460, 2003.
- [16] M.-F. Wange, N. Raghunathan, and B. Ziaie, "Properties and application of superhydrophobic coatings in high voltage outdoor insulation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23, 2300-2303, 2007.
- [17] S. Srinivasan, V. K. Praveen et al., (Bioinspired Superhydrophobic Coatings of Carbon Nanotubes and Linear  $\pi$  Systems Based on the "Bottom-up" Self-Assembly Approach), *Angew. Chem*, Vol 47, P 5675-5859, 2008.
- [18] Isaac Ramalla et al., "Effect on superhydrophobic surfaces on electrical porcelain insulator, improved technique at polluted areas for longer life and reliability", *International Journal of engineering Technology*, 4 (4) pp 509-519, 2015.
- [19] Arshad, G. Momen et al., "Properties and Applications of superhydrophobic Coatings in High Voltage Outdoor Insulation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 24, No. 6, December 2017.
- [20] [http://www.mineralogie.fr/Structure\\_Matiere.html](http://www.mineralogie.fr/Structure_Matiere.html)
- [21] "Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces", Neinhuis, C. Barthlott, W., *Ann. Botan.* (1997), 79, 667-677.

## Les référence

---

- [22] D. Quéré, “ Lois du mouillage et de l’imprégnation, ” Tech. Ing, vol. Principe de formulation, no j2140, 2003.
- [23] R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water,” Ind. Eng. Chem., vol.28, no. 8, pp. 988–994, 1936.
- [24] H. Liu, S.-W. Gao, J.-S. Cai, C.-L. He, J.-J. Mao, and T.-X. Zhu, "Recent Progress in Fabrication and Applications of Superhydrophobic Coating on Cellulose-Based Substrates," Materials, vol. 9, no. 3, p. 124, 2016.
- [25] A. Tuteja, W. Choi, J. M. Mabry, G. H. McKinley, and R. E. Cohen, "Robust omniphobic surfaces," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, no. 47, pp. 18200-18205, 2008.
- [26] B. He, J. Lee, and N. A. Patankar, "Contact angle hysteresis on rough hydrophobic surfaces," Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 248, no. 1, pp. 101-104, 2004.
- [27] Emmanuelle Guerret Elina Moncada-Potignon Professeur encadrant : M. Merilhou Lycée Clément Marot CAHORS, ‘Super-hydrophobie’, Olympiades de physique 2014-2015,pp .15-16.
- [28] B.Smati,S. Soudani, "Impact du dépôt de gouttes d’eau sur le comportement électrique d’une surface superhydrophobe sous tension continue négative ",thèse de master , université A. Mira de Bejaia,2017.
- [29] Sanjay S. Lathe, Chiaki Terashima, Kazuya Nakata and Akira Fujishima  
Superhydrophobic Surfaces Developed by Mimicking Hierarchical Surface Morphology of Lotus Leaf, Molecules 2014, 19, 4256-4283; doi: 10.3390/molecules19044256, pp. 4256-4283.
- [30] IEEE Std 957”IEEE guide for cleaning isolators”, 1995
- [31] B.Smati,S. Soudani, "Impact du dépôt de gouttes d’eau sur le comportement électrique d’une surface superhydrophobe sous tension continue négative ",thèse de master , université A. Mira de Bejaia,2017.



## Les référence

---

- [32] K.S. Lau, J. Bico and all, "Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests" ,ACS Publication, Nano Letter,3,12,pp 1701-1705,2003.
- [33] Huang, Y.; Sarkar,D.K.; Chen, X.G., Mater. Lett, "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces",. pp, 64, 2722-2724,2010.
- [34] 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, 441-444,2009.
- [35] 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, 54,3613-3616,2009.
- [36] T. Hang, A. Hu, H. Ling, M. Li, and D. Mao, "Super-hydrophobic nickel films with micro-nano hierarchical structure prepared by electrodeposition," Applied Surface Science, vol. 256, no. 8, pp. 2400-2404, 2010.
- [37] D. Kumar, X. Wu, Q. Fu, J. W. C. Ho, P. D. Kanhere, and L. Li, "Hydrophobic sol-gel coatings based on polydimethylsiloxane for self-cleaning applications," Materials & Design, vol. 86, pp. 855-862, 2015.
- [38] M. Karlsson, P. Forsberg, and F. Nikolajeff, "From hydrophilic to superhydrophobic: fabrication of micrometer-sized nail-head-shaped pillars in diamond," Langmuir, vol. 26, no. 2, pp. 889-893, 2009.
- [39] Y. Xiu, D. W. Hess, and C. Wong, "A novel method to prepare superhydrophobic, self-cleaning and transparent coatings for biomedical applications," 2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference, pp. 1218-1223, 2007.
- [40] Y. Huang, D. Sarkar, and X.-G. Chen, "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces," Materials letters, vol. 64, no. 24, pp. 2722-2724, 2010.
- [41] K. Chang, T. Chuang, W. Ji, C. Chang, Y. Peng, and H. Shih, "UV-curable nanocasting technique to prepare bioinspired superhydrophobic organic-inorganic composite anticorrosion coatings," Express Polymer Letters, vol. 9, no. 2, 2015.

## Les références

---

- [42] S. Kulinich and M. Farzaneh, "Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces," *Applied Surface Science*, vol. 255, no. 18, pp. 8153-8157, 2009.
- [43] D. Sarkar, and M. Farzaneh, "Superhydrophobic coatings with reduced ice adhesion," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, no. 9, pp. 1215-1237, 2009.
- [44] C. Neinhuis and W. Barthlott, "Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces," *Annals of botany*, vol. 79, no. 6, pp. 667-677, 1997.
- [45] S. Soni, *Handbook of Research on Diverse Applications of Nanotechnology in Biomedicine, Chemistry, and Engineering*: IGI Global, 2014.
- [46] R. Evershed, R. Berstan, F. Grew, M. Copley, A. Charmant, and E. Barham, "Water-repellent legs of water striders," *Carbohyd. Res*, vol. 113, pp. 291-299, 1983.
- [47] D. Quéré, M. Reyssat "l'effet lotus", pour la science.fr, pp. 35, 2006.
- [48] [www.biomimesis.fr](http://www.biomimesis.fr), consulté le 25/05/2016.
- [49] Descriptif Technique, "isolateurs composites au silicone silcosil", [www.pfisterer.com](http://www.pfisterer.com).
- [50] Wacker, "silicones pour applications haute et moyenne tension" [www.wacker.com](http://www.wacker.com).
- [51] Philippe Platteau, "Glass insulators in polluted environment: design, test, experiences and benchmarking with other materials", Javier GARCIA Technical Manager SGD La Granja.
- [52] S. Dupuy "ANGLE DE CONTACT", Document technique Angle de Contact, vol. 1, pp. 4, 2013.
- [53] Y. L'hôte "mesure et étude des précipitations en hydrologie", université de Montpellier II, génie hydro sanitaire et aquacole, 1993.
- [54] M. Nemamcha, "claquage des isolants hautes tensions". 2001.
- [55] A. Tilmatine, "[http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437 Chapitre\\_7.pdf](http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437%20Chapitre_7.pdf)"  
tension alternative" PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.

## Les références

---

- [56] F. Amir et KH. Namaoui: “ étude du comportement d’un isolateur pollué soumis à une tension alternative” PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [57] A. Chabloz, “Technologie des matériaux a l’usage de profession de l’électricité”, 1986.
- [58] A. Simuila, L. dascalescu et R. Tabazeon, “breackdown on ionized air gaps in the presence of spherical conductive particle” session 2143. 9th ISH, Graz 1995, pp. 1-4.
- [59] S. Djafri, “pollution des isolateurs”. PFE Ingénieur, promotion 1982, ENP Alger.
- [60] A. Kuechler, “Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen”, 3ème édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [61] M. Soufi, M. Zemirline, “Conception d’un modèle dynamique de contournement d’un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 2004.
- [62] S. Bouazabia, T. Chikhaoui, “Méthode d'essai sur des isolateurs pollués dans des conditions désertiques”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 1988.
- [63] G. le Roy, C. Gary, “Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions”, Eyrolles, Paris, 1984.
- [64] A. Cimador, S. Vitet, “La pollution des isolateurs”, EDF-Epure N°27, juillet 1990.
- [65] A. Bouarouri, R. Ladjal, “Comportement et caractérisation électrique d’un modèle d’isolateur sous tension alternative”, PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 2006.
- [66] G. Neumärker, "Verschmutzungs Zustand und Kriechweg", Monatsber. D. Deut. Akad, Wiss., Berlin, vol.1, pp.352 – 359, 1959.
- [67] D. Namane, "Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d’isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Février 1998.
- [68] CEI 60, "Technique des essais à M.T, définitions et prescriptions générales aux essais", Première édition 1973.

## Les référence

---

- [69] A. Mekhaldi, "Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz", Thèse de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [70] C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. Swift C.E.G.B " Contournement des polymères humides et pollués l'ailette Booster", CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [71] A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.
- [72] A. Mekhaldi, H. Boudjelthia, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba", PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 1984.
- [73] Z. Sahli, "Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [74] [WWW.comsol.com/patents](http://WWW.comsol.com/patents).
- [75] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai, T. Kulworawanichpong, "Analysis of electric field and potential distributions along surface of silicone rubber insulators under various contamination conditions using finite element method," World Academy of Science, Engineering and Technology 53, 2009.